



ΑΣΚΗΣΗ 6

ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ & ΤΡΟΠΟΙ ΔΟΝΗΣΗΣ

ΣΕ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΜΙΚΡΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Σκοπός της άσκησης είναι ο υπολογισμός των πρώτων ιδιοσυχνοτήτων του χώρου του εργαστηρίου και η επίδειξη και χαρτογράφηση των αντίστοιχων τρόπων δόνησης.



1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

Ακουστικά μικροί / μεγάλοι χώροι

Όπως έχουμε δει ξανά ανάλογα με τις διαστάσεις τους, στην ακουστική διαχωρίζουμε τους χώρους σε δύο βασικές κατηγορίες, διότι ο ήχος συμπεριφέρεται διαφορετικά στις δύο περιπτώσεις. Ο διαχωρισμός γίνεται σύμφωνα με τη συχνότητα / μήκος κύματος του ήχου σε σχέση με τις διαστάσεις του χώρου:

- (1) Ακουστικά **μεγάλοι** χώροι, για $\lambda \ll$ διαστάσεις του χώρου και
- (2) Ακουστικά **μικροί** χώροι, για $\lambda \approx$ διαστάσεις του χώρου (της ίδιας τάξης μεγέθους).

Στην δεύτερη περίπτωση τα κυματικά φαινόμενα είναι τόσο πολύπλοκα και η χωρική διακύμανση του ηχητικού πεδίου τόσο μικρή, που η προσέγγιση της συμπεριφοράς του ήχου γίνεται με στατιστικό τρόπο. Έτσι, θεωρούμε ότι ο ήχος διαδίδεται σε ευθεία γραμμή μεταξύ ανακλαστικών επιφανειών (ακτίνες), ανακλάται με ίση πιθανότητα από όλες τις επιφάνειες του χώρου και το δημιουργούμενο πεδίο είναι διάχυτο, με αποτέλεσμα η μελέτη να μπορεί να γίνει με βάση τις αρχές της **Γεωμετρικής Ακουστικής**.

Στη δεύτερη περίπτωση τα κυματικά φαινόμενα είναι πολύ έντονα, η έννοια της διάδοσης σε ακτίνες δεν ισχύει πλέον και παρουσιάζονται έντονες διακυμάνσεις της στάθμης καθώς ένας ακροατής κινείται μέσα στο χώρο. Στην περίπτωση αυτή προσεγγίζουμε τη συμπεριφορά του ήχου με βάση τις αρχές τις **Κυματικής Ακουστικής**.

Όλοι οι χώροι πάντως εμφανίζουν φαινόμενα συντονισμών σε κάποια περιοχή χαμηλών συχνοτήτων, με αποτέλεσμα από κάποια συχνότητα και κάτω (που εξαρτάται από τον συγκεκριμένο χώρο) οι συντονισμοί να κυριαρχούν και το πεδίο να μην μπορεί να θεωρηθεί διάχυτο.

Στις προηγούμενες ασκήσεις ασχοληθήκαμε με την πρώτη περίπτωση, δηλαδή με χώρους των οποίων οι διαστάσεις θεωρήσαμε ότι ήταν μεγαλύτερες από τα μήκη κύματος των υπό εξέταση ήχων. Σε αυτή την υπόθεση βασίστηκε μάλιστα και η εξαγωγή των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων.

Στη συγκεκριμένη άσκηση θα ασχοληθούμε με τις χαμηλές εκείνες συχνότητες που καθιστούν έναν **χώρο ακουστικά μικρό**, λόγω της εμφάνισης έντονων στάσιμων κυμάτων. Σε αυτή την περίπτωση οι εξισώσεις που είδαμε στις προηγούμενες εργαστηριακές ασκήσεις πρέπει να τροποποιηθούν.



Διαίρεση ακουστικού φάσματος

Το παρακάτω διάγραμμα των Bolt – Beranek - Newman, που ονομάζεται «Ελεγκτής της σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου», παρουσιάζει το διαχωρισμό της συμπεριφοράς ενός χώρου σύμφωνα με τη συχνότητα ή αλλιώς το μήκος κύματος του ήχου ως προς τις διαστάσεις του χώρου:

- (1) **Ζώνη πίεσης (pressure zone / cut-off region):** για $f \leq f_{min}$, όπου $f_{min} = \frac{c}{2 L_{max}}$ (1)

Αντιστοιχεί στην περιοχή που βρίσκεται κάτω από την κατώτατη συχνότητα συντονισμού, δηλαδή στην περιοχή όπου οι διαστάσεις του χώρου είναι μικρότερες από το μισό μήκος κύματος του ήχου, όπως μπορεί να συμβεί στο εσωτερικό των ηχείων και των μουσικών οργάνων. Αυτό δε σημαίνει ότι δεν υπάρχει τόσο χαμηλή συχνότητα, αλλά ότι δεν ενισχύεται από τους συντονισμούς του χώρου.

- (2) **Ζώνη στάσιμων κυμάτων (modal zone):** για $f_{min} \leq f \leq f_c$, όπου f_c η συχνότητα αποκοπής. Αντιστοιχεί στην περιοχή όπου το μήκος κύματος του ήχου είναι της τάξης μεγέθους του χώρου, και συγκεκριμένα στην περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα στην κατώτατη συχνότητα συντονισμού, f_{min} , και τη συχνότητα αποκοπής, f_c . Η συχνότητα αποκοπής δεν είναι ορισμένη, αλλά δίνεται κατά

προσέγγιση από τη σχέση: $f_c = k \cdot \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}}$ (2), όπου k σταθερά, $k=2102$ (στο S.I. σύστημα),

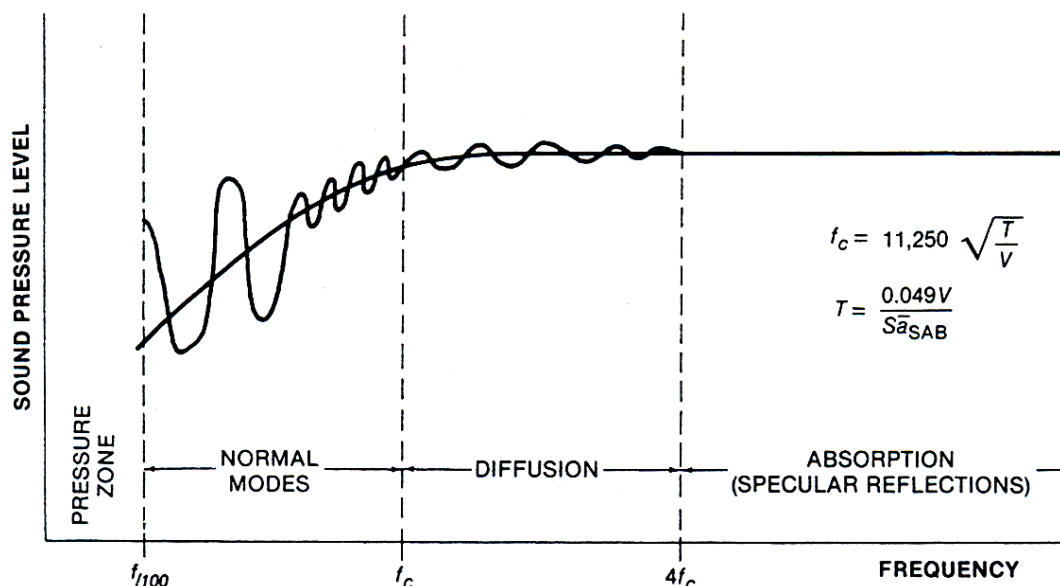
RT_{60} ο χρόνος αντήχησης σε sec και V ο όγκος του χώρου σε m^3 . Σε αυτή την περιοχή εφαρμόζουμε τις αρχές της Κυματικής Ακουστικής και το πεδίο δεν μπορεί να θεωρηθεί διάχυτο.

- (3) **Ζώνη διάχυσης (diffusion zone):** $f_c \leq f \leq 4 \cdot f_c$ περίπου.

Είναι η περιοχή μετάβασης μεταξύ της προηγούμενης και της επόμενης ζώνης. Είναι μια δύσκολη συχνотική περιοχή, γιατί ο χώρος θεωρείται αρκετά μικρός για τη χρήση της Γεωμετρικής Ακουστικής και της στατιστικής (αφού εμφανίζονται ακόμα έντονοι συντονισμοί) αλλά και αρκετά μεγάλος για την εφαρμογή της Κυματικής Ακουστικής, σύμφωνα με το μήκος κύματος.

- (4) **Ζώνη ανακλάσεων (specular reflection zone):** $f \geq 4 \cdot f_c$.

Εδώ τα κυματικά φαινόμενα εξασθενούν, επικρατούν οι τυχαίες ανακλάσεις, ο ήχος διαδίδεται σε ευθείες (ακτίνες) και εφαρμόζονται πλέον οι αρχές της Γεωμετρικής Ακουστικής.



Σχήμα 1. Διάγραμμα Bolt-Beranek-Newmann: «Ελεγκτής σταθερής κατάστασης ακουστικής απόκρισης δωματίου» [1]



Η συχνότητα f_c (συχνότητα αποκοπής) είναι το όριο διαχωρισμού ανάμεσα σε ένα ακουστικά μεγάλο και ένα ακουστικά μικρό δωμάτιο.

Από τη σχέσεις $f_c = k \cdot \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}}$ και $RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A} \Rightarrow f_c = k \cdot \sqrt{\frac{0,161}{S \cdot a}}$ (3), δηλαδή προκύπτει ότι:

Η συχνότητα αποκοπής των μεγαλύτερων χώρων είναι εν γένει μικρότερη από αυτή των μικρότερων χώρων. Γι' αυτό και μεγάλοι χώροι είναι και ακουστικά μεγάλοι.

Σε έναν ακουστικά μεγάλο χώρο η συχνότητα αποκοπής είναι μικρότερη από τη χαμηλότερη συχνότητα που θα παραχθεί εντός του. Σε έναν ακουστικά μικρό χώρο η συχνότητα αποκοπής θα εμφανιστεί στη συχνοτική περιοχή εμφάνισης συντονισμών.

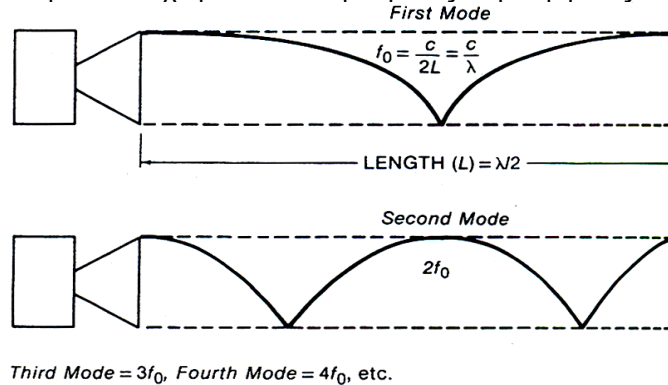
Παραδείγματα ακουστικά μεγάλων χώρων αποτελούν αίθουσες συναυλιών, καθεδρικοί ναοί, μεγάλα studio ηχογραφήσεων. Στις περισσότερες, πάντως, περιπτώσεις παραγωγής και αναπαραγωγής μουσικής βρισκόμαστε σε ακουστικά μικρούς χώρους, όπως τα δωμάτια ενός σπιτιού, το μπάνιο κλπ.

Παρακάτω θα μελετήσουμε τη δημιουργία στάσιμων κυμάτων και τους συντονισμούς ενός χώρου, αφού σε χαμηλές συχνότητες το άθροισμά τους αποτελεί το ίδιο το ηχητικό πεδίο του χώρου.

Δημιουργία στάσιμων κυμάτων

Σωλήνας κλειστός – κλειστός

Έστω ένας σωλήνας κλειστός και στα δύο του άκρα, τα οποία είναι τελείως ανακλαστικά. Ο ήχος ενός καθαρού τόνου που παράγεται στο ένα του άκρο διαδίδεται μέσα στο σωλήνα, ανακλάται στο απέναντι άκρο του και στη συνέχεια συμβάλλει με τον προσπίπτοντα ήχο. Κάτω από ορισμένες συνθήκες μήκους κύματος (λ συχνότητας) του ήχου ως προς το μήκος του σωλήνα, το αποτέλεσμα της συμβολής του οδεύοντος και του ανακλώμενου κύματος παρουσιάζει συγκεκριμένα σημεία μέγιστης πίεσης (δεσμούς) και άλλα μηδενικής (κοιλίες) πίεσης (το αντίστροφο ισχύει για τη μετατόπιση των σωματιδίων από τη θέση ισοροπίας). Τότε λέμε ότι έχει δημιουργηθεί ένα *στάσιμο κύμα*, ένας χαρακτηρισμός που αναφέρεται στο γεγονός ότι το κύμα φαίνεται σαν να μη μετακινείται στο χώρο (οι δεσμοί και οι κοιλίες δε μετακινούνται), ενώ η ενέργεια εγκλωβίζεται μέσα στο χώρο του σωλήνα για τις συγκεκριμένες συχνότητες.



Σχήμα 2. Σχηματισμός στάσιμων κυμάτων σε σωλήνα [1]

Οι συχνότητες εμφάνισης αυτών των τρόπων δόνησης ικανοποιούν τη σχέση:

$$f_n = n \frac{c}{2L} \quad (4)$$

, όπου c η ταχύτητα του ήχου (m/sec),

L το μήκος του σωλήνα (m) και

n η τάξη του στάσιμου κύματος, δηλαδή ακέραιος αριθμός που χαρακτηρίζει τον τρόπο δόνησης (*mode*).

Από τη σχέση $c = \lambda \cdot f$ προκύπτει η συνθήκη για το μήκος κύματος ως προς το μήκος του σωλήνα:

$$\frac{c}{\lambda_n} = n \frac{c}{2L} \Leftrightarrow L = n \cdot \frac{\lambda_n}{2} \quad (5)$$

Η σχέση αυτή δείχνει ότι υπάρχει ένα άπειρο πλήθος δυνατών τρόπων δόνησης, οι οποίοι εμφανίζονται όταν χωράει στο μήκος του σωλήνα ακριβώς ένας ακέραιος πλήθος (n) μισού μήκους κύματος ($\lambda/2$).

Η χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού εμφανίζεται για $n=1$, δηλαδή όταν χωράει ακριβώς ένα μισό μήκος κύματος στο μήκος του σωλήνα, ενώ οι υπόλοιπες συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια αυτής ($n=1, n=2, n=3$, κλπ), δηλαδή έχουμε ένας πλήθος αρμονικών.

Έτσι, θα έχουμε τους παρακάτω τρόπους δόνησης:

- Για $n=1$: $f_{1-\min} = \frac{c}{2L}$
- Για $n=2$: $f_2 = 2 \frac{c}{2L} = 2 \cdot f_{1-\min}$
- Για $n=3$: $f_3 = 3 \frac{c}{2L} = 3 \cdot f_{1-\min}$ κλπ.

Όπως φαίνεται και στα προηγούμενα σχήματα, σε όλους τους τρόπους δόνησης παρουσιάζονται πάντα μέγιστα πίεσης (κοιλίες) στα άκρα του σωλήνα, ενώ ενδιάμεσα έχουμε ένα πλήθος δεσμών και κοιλιών, διαφορετικό ανάλογα με τον τρόπο δόνησης.



Γενίκευση στις 3 διαστάσεις – ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο δωμάτιο

Αναφερόμενοι στη ακουστική χώρων, η εμφάνιση στάσιμων κυμάτων στον τρισδιάστατο χώρο αποτελεί γενίκευση της παραπάνω μονοδιάστατης περίπτωσης. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αντί για τα κλειστά άκρα ενός σωλήνα έχουμε τους 6 τοίχους.

Στην ιδανική περίπτωση ενός χώρου όπου ο ήχος ανακλάται από όλες τις επιφάνειες με την ίδια πιθανότητα, έχουμε τη δημιουργία ενός διάχυτου πεδίου. Στην πράξη, όμως, η ενέργεια δεν ανακλάται μόνο με τον παραπάνω τυχαίο τρόπο, αφού ένα μέρος της διαδίδεται σε κλειστές διαδρομές μεταξύ συγκεκριμένων τοίχων, όταν στο μήκος τους χωράει ακριβώς ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος. Υπάρχει ένα άπειρο πλήθος τέτοιων κλειστών διαδρομών, για διάφορες συχνότητες.

Έτσι εμφανίζονται τα στάσιμα κύματα, των οποίων η χωρική κατανομή της ηχητικής πίεσης στο χώρο είναι συγκεκριμένη υπό την έννοια ότι δε μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου (έτσι σε κάθε χώρο οι θέσεις λ.χ. στις οποίες εμφανίζονται μέγιστα πίεσης είναι συγκεκριμένες σε κάθε συχνότητα).

Σε σχέση με τις υποθέσεις που κάναμε για την εφαρμογή των αρχών της γεωμετρικής ακουστικής, τα στάσιμα κύματα:

- Δεν ανακλώνται σε όλους τους τοίχους με την ίδια πιθανότητα. Αντιθέτως, κινούνται μεταξύ κάποιων συγκεκριμένων από αυτούς.
- Δεν προσπίπτουν σε αυτούς σε τυχαίες γωνίες. Αντιθέτως, συγκεκριμένες γωνίες εμπλέκονται στο σχηματισμό των στάσιμων κυμάτων.
- Ως συνέπεια των παραπάνω, τα στάσιμα κύματα απορροφώνται εν γένει με διαφορετικό ρυθμό από τα κύματα των υψηλότερων συχνοτήτων στα οποία ισχύουν οι αρχές της στατιστικής ακουστικής.
- Είναι απαραίτητη η επιστροφή του κύματος σε έναν αρχικό τοίχο, δηλαδή η διάδοση του κύματος σε κάποια κλειστή κυκλική διαδρομή, μήκους πολλαπλάσιου του μισού μήκους κύματος.

Οι συχνότητες εμφάνισης συντονισμών καθορίζονται από τη **γεωμετρία του χώρου**.

Κατά συνέπεια:

Σε δωμάτια απλού γεωμετρικού σχήματος μπορούμε συχνά να εξαγάγουμε μια αναλυτική σχέση για τις συχνότητες εμφάνισης συντονισμού.

Στην κλασική περίπτωση ενός χώρου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου οι συχνότητες εμφάνισης στάσιμων κυμάτων δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (6)$$

, όπου c η ταχύτητα του ήχου (m/sec),

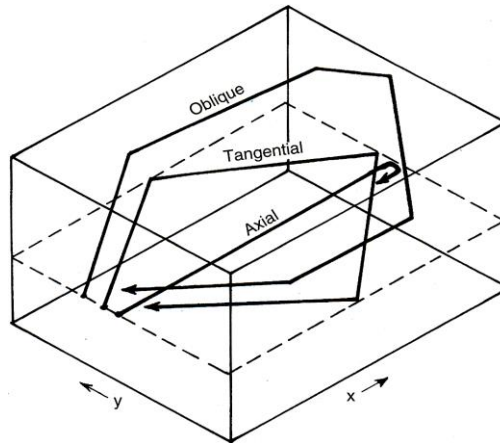
L_x, L_y, L_z οι διαστάσεις του χώρου στους αντίστοιχους άξονες και

n_x, n_y, n_z η τάξη του στάσιμου κύματος στον αντίστοιχο άξονα.

Σε αυτές τις συχνότητες λέμε επίσης ότι συμβαίνει ένας *συντονισμός* ή ότι έχουμε έναν *τρόπο δόνησης* ή έναν *τρόπο ταλάντωσης* (*resonance mode*). Αντί για την τιμή της συχνότητας, μάλιστα, χρησιμοποιούμε συχνά το είδος του τρόπου δόνησης με βάση την τάξη του στάσιμου κύματος στους τρεις άξονες, δηλαδή: $(n_x; n_y; n_z)$. Για να υπολογίσουμε από την παραπάνω σχέση τις αντίστοιχες συχνότητες συντονισμού

απλώς δίνουμε τις τιμές για τα $n_x, n_y, n_z, L_x, L_y, L_z$.

Η συνθήκη του ακέραιου πολλαπλάσιου του μισού μήκους κύματος μπορεί να εκπληρωθεί για διαφορετικές συχνότητες από την ανάκλαση του ήχου σε διαφορετικό πλήθος τοίχων. Σε ένα χώρο σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου έχουμε τις παρακάτω βασικές περιπτώσεις:

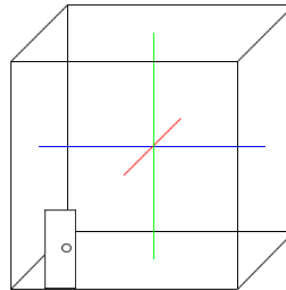


Σχήμα 3. Όλοι οι τρόποι δόνησης στον τρισδιάστατο χώρο [3]

Οι **αξονικοί τρόποι δόνησης** εμφανίζονται όταν έχουμε διαδοχικές ανακλάσεις του ήχου και δημιουργία στάσιμων κυμάτων ανάμεσα σε **δύο (2)** παράλληλους τοίχους του δωματίου, δηλαδή εμφανίζονται λόγω της δημιουργίας στάσιμου κύματος σε μία διάσταση από τις τρεις (είναι η περίπτωση που ισοδυναμεί με αυτήν του σωλήνα). Μπορούμε να έχουμε τρεις διαφορετικές υποπεριπτώσεις από ζεύγη παράλληλων επιφανειών: ανάμεσα στους δύο απέναντι τοίχους από τους τέσσερις και ανάμεσα σε ταβάνι – πάτωμα, ή αλλιώς τους παρακάτω τρόπους:

$$(n_x; 0; 0) \text{ ή } (0; n_y; 0) \text{ ή } (0; 0; n_z)$$

, όταν δηλαδή ένας μόνο από τους n_x, n_y, n_z είναι διάφορος του μηδενός και δύο ίσοι με το μηδέν.



Σχήμα 4 Αξονικά modes [13]

Σε κάθε άξονα μπορούμε να έχουμε μια σειρά από στάσιμα κύματα, των οποίων η συχνότητα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της χαμηλότερης αξονικής συχνότητας στον αντίστοιχο άξονα, π.χ.

$(1; 0; 0)$	$(0; 1; 0)$	$(0; 0; 1)$
$(2; 0; 0)$	$(0; 2; 0)$	$(0; 0; 2)$
$(3; 0; 0)$	$(0; 3; 0)$	$(0; 0; 3)$
...

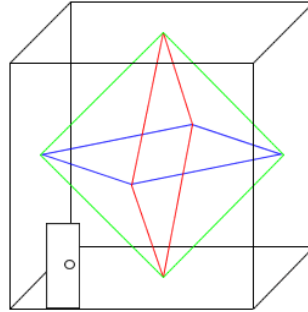


Οι **εφαπτομενικοί τρόποι δόνησης** εμφανίζονται όταν έχουμε ανάκλαση του ήχου και δημιουργία στάσιμων κυμάτων ανάμεσα σε **τέσσερις (4)** τοίχους του δωματίου, δηλαδή όταν χωρά ένα ακέραιο πολλαπλάσιο μισού μήκους κύματος στις δύο διαστάσεις.

Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί σε κάποιον από τους παρακάτω τρόπους:

$$(n_x; n_y; 0) \text{ ή } (0; n_y; n_z) \text{ ή } (n_x; 0; n_z)$$

, όταν δηλαδή δύο από τους $(n_x; n_y; n_z)$ είναι διάφοροι του μηδενός και ένας μόνο ίσος με μηδέν.

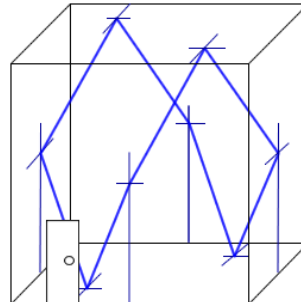


Σχήμα 5 Εφαπτομενικά modes [13]

Οι **πλάγιοι τρόποι δόνησης** εμφανίζονται όταν έχουμε ανάκλαση του ήχου και δημιουργία στάσιμων κυμάτων ανάμεσα και στους **έξι (6)** τοίχους του δωματίου ή αλλιώς και στα τρία ζεύγη παράλληλων επιφανειών. Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί σε κάποιον από τους παρακάτω τρόπους:

$$(n_x; n_y; n_z)$$

, όταν δηλαδή όλοι οι n_x, n_y, n_z είναι διάφοροι του μηδενός.



Σχήμα 6 Πλάγια modes [13]

ΠΡΟΣΟΧΗ:

Σε όλους τους τρόπους δόνησης παρουσιάζονται **μέγιστα** πίεσης (κοιλίες) στις **γωνίες** του δωματίου, ενώ ενδιάμεσα έχουμε ένα πλήθος δεσμών και κοιλιών, διαφορετικό ανάλογα με τον τρόπο δόνησης.



Όπως φαίνεται από τις παραπάνω περιπτώσεις έχουμε ένα πλήθος συχνοτήτων όπου έχουμε την εμφάνιση στάσιμων κυμάτων. Σε κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες έχουμε την εμφάνιση στάσιμων κυμάτων σε μια ελάχιστη συχνότητα και μια σειρά αρμονικών αυτής. Κοιτώντας, όμως, τις συχνότητες συντονισμού ενός χώρου στο σύνολό τους, αυτές δε σχετίζονται όλες αρμονικά μεταξύ τους. Πάντως:

Η **χαμηλότερη συχνότητα** εμφάνισης συντονισμού είναι η συχνότητα εκείνου του **αξονικού** συντονισμού για $n=1$ που αντιστοιχεί στη **μεγαλύτερη διάσταση** του χώρου, δηλαδή:

$$f_{min} = \frac{c}{2 L_{max}} \quad (7)$$

Το γεγονός ότι οι εφαπτομενικοί και ακόμα περισσότερο οι πλάγιοι τρόποι δόνησης προκύπτουν από ανάκλαση σε περισσότερες επιφάνειες από ότι οι αξονικοί, οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι (στην περίπτωση που τα απορροφητικά υλικά είναι ισοκαταναμημένα στο χώρο) μεγαλύτερη απορρόφηση υφίστανται οι πλάγιοι τρόποι δόνησης, στη συνέχεια οι εφαπτομενικοί και λιγότερο από όλους οι αξονικοί. Κατά συνέπεια:

Οι **αξονικοί** τρόποι δόνησης τείνουν να έχουν **μεγαλύτερη ενέργεια** από ότι οι εφαπτομενικοί και ακόμα περισσότερο οι πλάγιοι.

Συγκεκριμένα:

- Οι εφαπτομενικοί τρόποι δόνησης έχουν το $\frac{1}{2}$ της ενέργειας των αξονικών, άρα 3 dB χαμηλότερη στάθμη και
- Οι πλάγιοι τρόποι δόνησης έχουν το $\frac{1}{4}$ της ενέργειας των αξονικών, άρα 6 dB χαμηλότερη στάθμη.

Τρόποι δόνησης	Πλήθος ανακλάσεων	Ενέργεια	Στάθμη
Αξονικοί	2 επιφάνειες	1	0
Εφαπτομενικοί	4 επιφάνειες	1/2	- 3 dB
Πλάγιοι	6 επιφάνειες	1/4	- 6 dB

Αυτό δεν ισχύει πάντως σε όλες τις περιπτώσεις, αφού στην περίπτωση ανώμαλης κατανομής των απορροφητικών υλικών στις διάφορες επιφάνειες ανάλογα με τα απορροφητικά υλικά του κάθε τοίχου μπορεί να τύχει ένας εφαπτομενικός τρόπος ταλάντωσης να είναι πιο έντονος από έναν αξονικό.

Ακριβώς επειδή οι αξονικοί τρόποι δόνησης φέρουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας και είναι διακριτοί είναι και αυτοί που προκαλούν και τα μεγαλύτερα προβλήματα.

Το γεγονός ότι στους εφαπτομενικούς τρόπους δόνησης (δύο διαστάσεις) χωρούν περισσότερα μισά μήκη κύματος από ότι στους αξονικούς για την ίδια συχνότητα, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι:

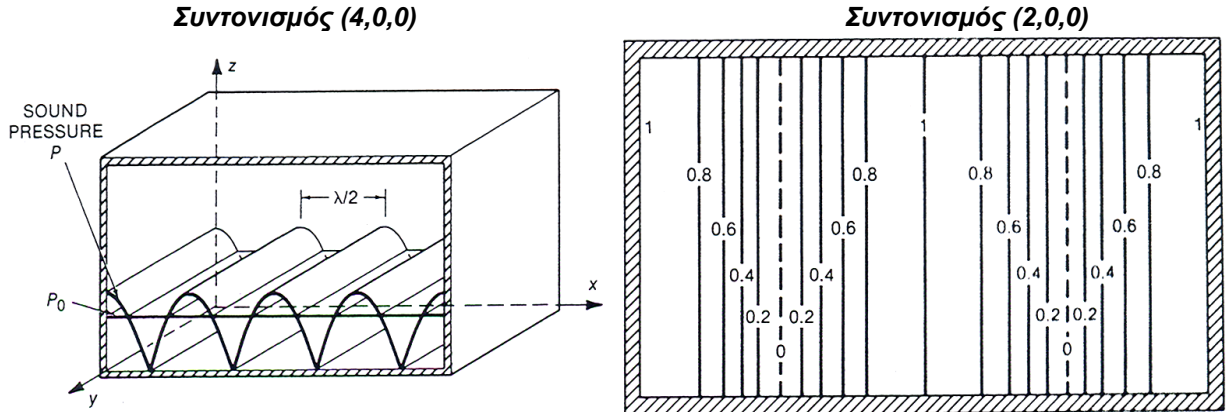
Οι συχνότητες των αξονικών τρόπων δόνησης εμφανίζονται εν γένει σε χαμηλότερες συχνότητες από ότι οι συχνότητες των εφαπτομενικών και ακόμη περισσότερο των πλάγιων τρόπων δόνησης.

Απεικόνιση των τρόπων δόνησης στο χώρο

Κατά αντιστοιχία της περίπτωσης του μονοδιάστατου σωλήνα μπορούμε να σχεδιάσουμε και τους τρόπους δόνησης ενός τρισδιάστατου χώρου.

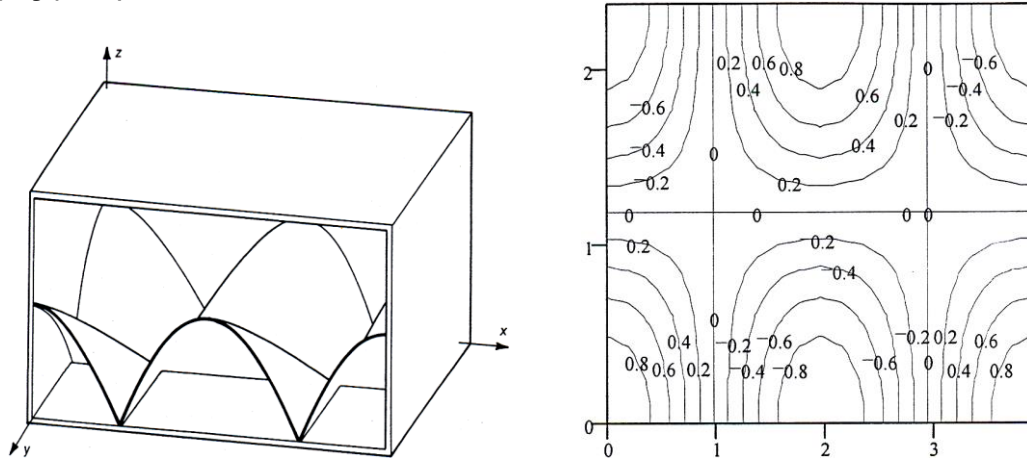
Αυτό μπορεί να γίνει είτε με ένα τρισδιάστατο σχέδιο είτε με χαρτογράφηση σε ένα δυσδιάστατο σχέδιο με τη χρήση ισούψων καμπύλων (contour plots), όπως γίνεται και με τη σχεδίαση των βουνών στους γεωφυσικούς χάρτες.

Παρακάτω δίνουμε μερικά παραδείγματα για έναν παραλληλεπίπεδο χώρο με το ηχείο σε μία γωνία του:



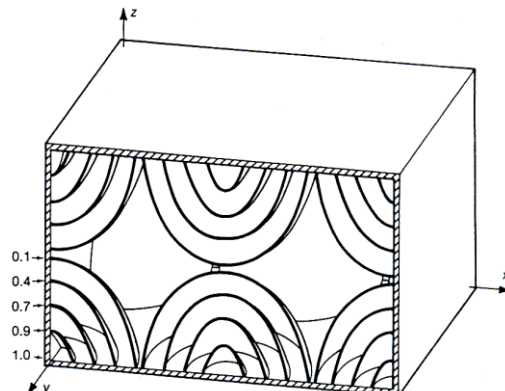
Σχήμα 7. Αξονικός τρόπος δόνησης (α) (4,0,0) - τρισδιάστατη απεικόνιση, (β) (2,0,0) - χαρτογράφηση ισούψων καμπύλων [1]

Συντονισμός (2,1,0)



Σχήμα 8 Εφαπτομενικός τρόπος δόνησης, (α) τρισδιάστατη απεικόνιση [1], (β) χαρτογράφηση ισούψων καμπύλων [10]

Συντονισμός (2,1,1)

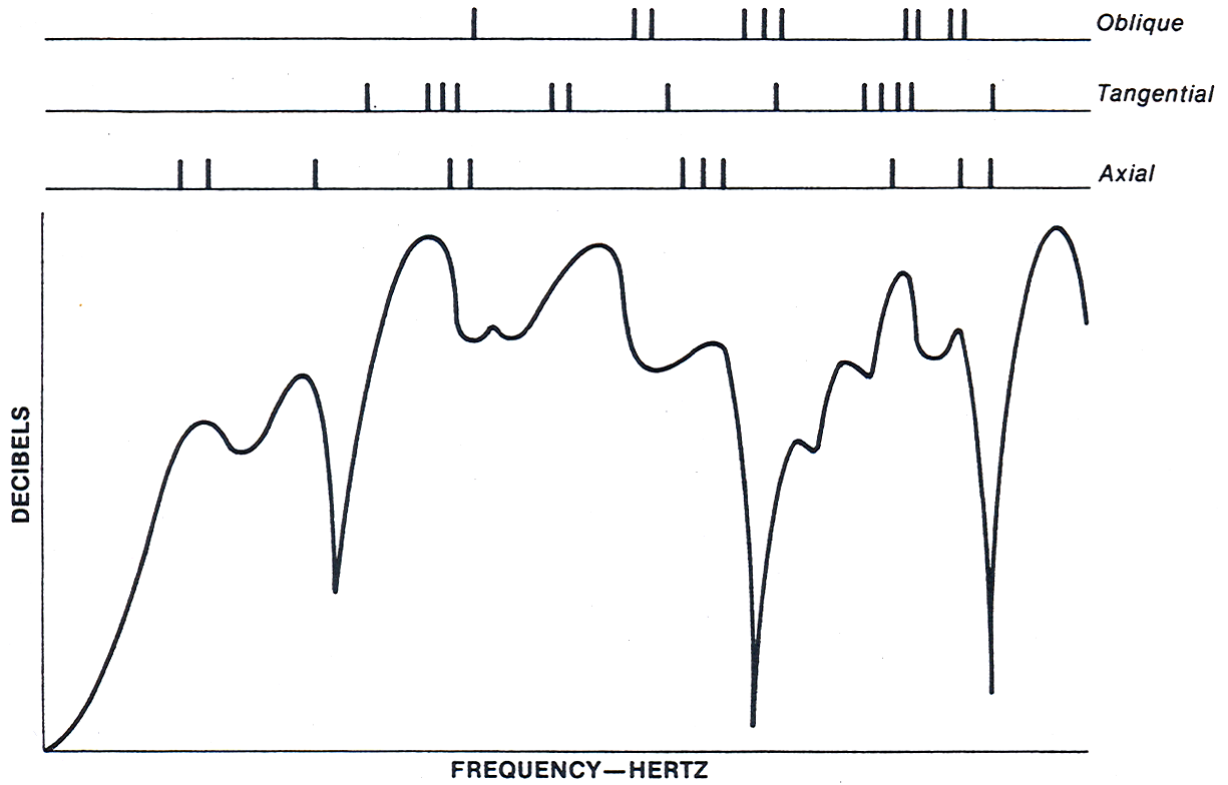


Σχήμα 9 Πλάγιος τρόπος δόνησης, τρισδιάστατη απεικόνιση [1]



Απεικόνιση των συχνοτήτων των τρόπων δόνησης

Μπορούμε να σχεδιάσουμε τις συχνότητες των τρόπων δόνησης σε ένα διάγραμμα ή να αναπαραστήσουμε με απλές γραμμές σε ξεχωριστούς άξονες τις αξονικές, εφαπτομενικές και πλάγιες συχνότητες συντονισμού.



Σχήμα 10 Σχεδίαση συχνοτήτων συντονισμού [1]



Πυκνότητα τρόπων ταλάντωσης

Το πλήθος των συντονισμών ενός χώρου αυξάνεται με τη συχνότητα και τις διαστάσεις του χώρου.

(1) Εξίσωση για τον υπολογισμό του πλήθους των στάσιμων κυμάτων N ανά συχνότητα f :

$$N \cong \frac{4\pi V f^3}{3c^3} + \frac{\pi S f^2}{4c^2} + \frac{L f}{8c} \quad (8)$$

, όπου N το πλήθος των συντονισμών, f η συχνότητα σε Hz, c η ταχύτητα του ήχου σε m/sec, V ο όγκος του χώρου σε m^3 , S η συνολική επιφάνεια και L η συνολική περιμετρική απόσταση του δωματίου.

(2) Εξίσωση για τον υπολογισμό του πλήθους των στάσιμων κυμάτων ΔN ανά ζώνη συχνοτήτων εύρους Δf κεντραρισμένο στη συχνότητα f :

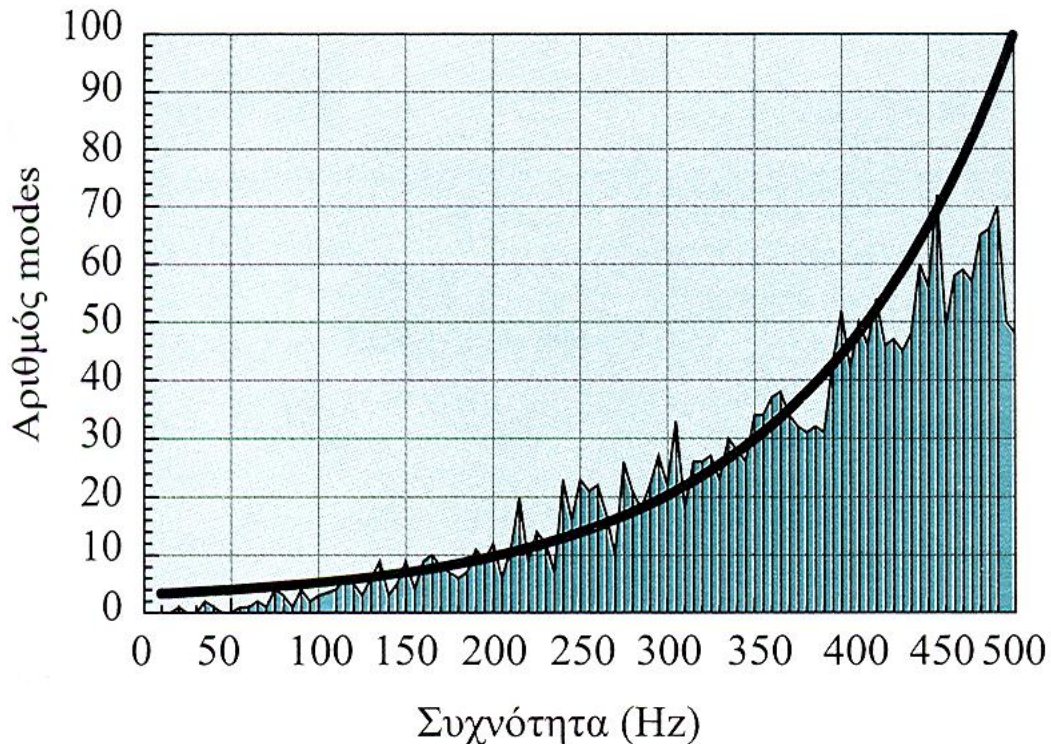
$$\Delta N \cong \left[4\pi V \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi S}{2} \left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L}{8} \left(\frac{f}{c}\right) \right] \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (9)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις φαίνεται ότι το πλήθος των τρόπων δόνησης ενός χώρου αυξάνεται με τη συχνότητα και τις διαστάσεις του χώρου, δηλαδή:

$$N \propto V \quad \text{και}$$

$$N \propto f^3$$

Το παρακάτω διάγραμμα δίνει το πλήθος των τρόπων δόνησης ενός χώρου συναρτήσει της συχνότητας που έχει σχηματιστεί με σταθερό εύρος ζώνης 5 Hz. Από αυτό φαίνεται καθαρά ότι το πλήθος των συντονισμών αυξάνει εκθετικά με τη συχνότητα.



Σχήμα 11 Πλήθος τρόπων ταλάντωσης συναρτήσει της συχνότητας για ζώνες σταθερού εύρους 5 Hz [8]



Επίδραση των συντονισμών στην ακουστική του χώρου

Η βασική επίδραση των στάσιμων κυμάτων στην ακουστική ενός χώρου είναι οι χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις, δηλαδή:

- (α) οι έντονες διακυμάνσεις της ηχητικής στάθμης από σημείο σε σημείο του χώρου και
- (β) η επιλεκτική ενίσχυση ή εξασθένιση συγκεκριμένων συχνοτήτων.

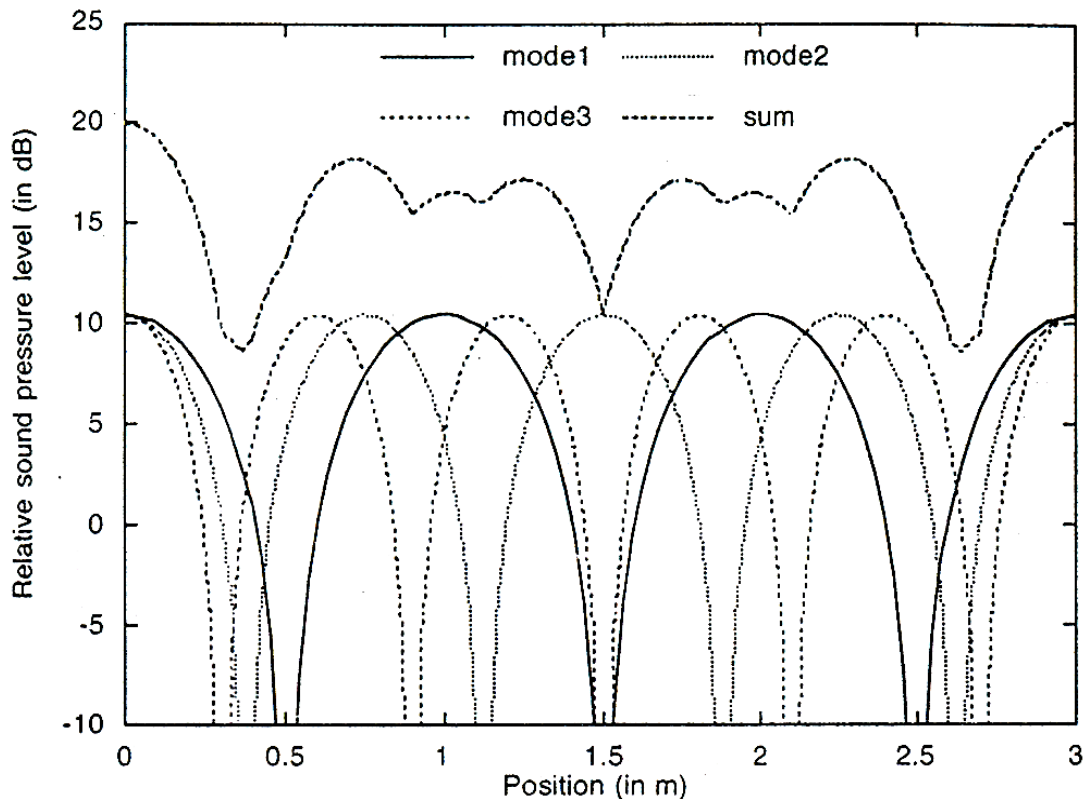
Έντονες διακυμάνσεις της στάθμης στο χώρο

Για συχνότητες της πηγής που συμπίπτουν με κάποια από τη συχνότητα συντονισμού του χώρου, ένας ακροατής που θα κινηθεί μέσα σε αυτόν θα αντιληφθεί έντονες αυξομειώσεις της στάθμης πίεσης από σημείο σε σημείο αυτού.

Όπως προαναφέραμε, οι συχνότητες εμφάνισης των τρόπων δόνησης όπως και οι σχηματισμοί τους εξαρτώνται από τις διαστάσεις και τη γεωμετρία του χώρου και από τη συχνότητα του ήχου.

Από τη σχέση (8) φαίνεται ότι καθώς οι διαστάσεις ενός χώρου αυξάνονται, το πλήθος των συντονισμών στην ακουστή περιοχή του φάσματος αυξάνεται επίσης ραγδαία. Σε ένα μεγάλο δωμάτιο υπάρχουν τόσοι πολλοί συντονισμοί, που οι διακυμάνσεις της στάθμης στο χώρο δεν γίνονται πλέον αισθητές και τελικά ο χώρος εμφανίζει μια σχετικά ομαλή συχνοτική απόκριση, αν και μπορεί να εμφανίζει κάποια έμφαση ή εξασθένιση σε κάποια/ες περιορισμένη/ες συχνοτική/ές περιοχή/ές.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, με μία συχνότητα μπορούμε να διεγείρουμε περισσότερες από μία γειτονικές συχνότητες συντονισμού και να δημιουργήσουμε περισσότερα στάσιμα κύματα στον ίδιο χώρο. Το αποτέλεσμα αυτού είναι οι χωρικές διακυμάνσεις της στάθμης (όπως και οι συχνοτικές) να παρουσιάζουν έντονη ύφεση. Κάτι τέτοιο φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα, το οποίο δείχνει το αποτέλεσμα του αθροίσματος τριών γειτονικών τρόπων δόνησης που διεγέρθηκαν από κάποια συχνότητα:



Σχήμα 12 Το χωρικό αποτέλεσμα του αθροίσματος τριών γειτονικών τρόπων δόνησης σε ένα χώρο [2]

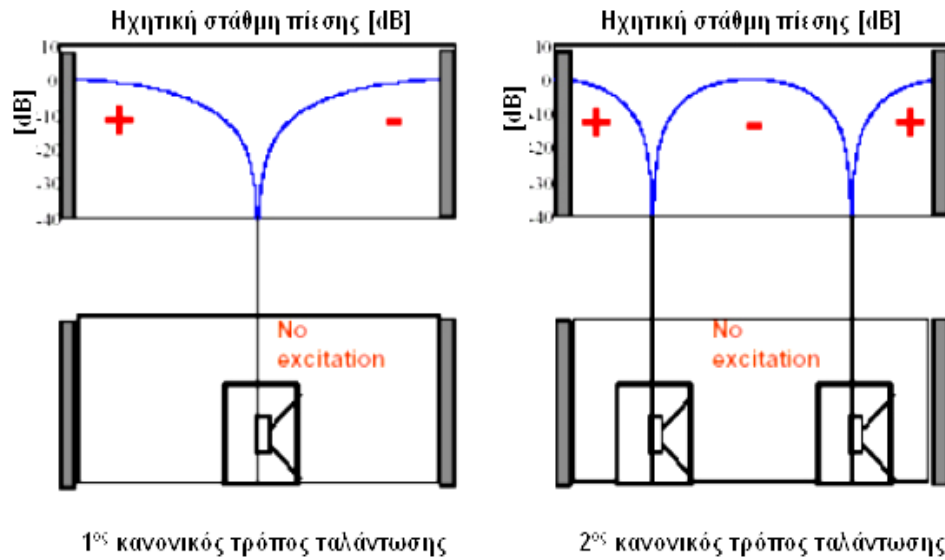
Το αντίθετο συμβαίνει σε μικρούς χώρους, όπου διεγείρονται μεμονωμένα στάσιμα κύματα με μία συχνότητα, με αποτέλεσμα οι διακυμάνσεις που αυτά προκαλούν στην ηχητική στάθμη μέσα στο χώρο να είναι πολύ πιο έντονες.



Οι αξονικοί τρόποι δόνησης έχοντας περισσότερη ενέργεια από τους άλλους και όντας διακριτοί στο φάσμα είναι συνήθως και οι πιο αισθητοί, άρα και οι περισσότερο προβληματικοί.

Η διάταξη των δεσμών και κοιλιών των στάσιμων κυμάτων στο χώρο εξαρτάται τόσο από τον τρόπο δόνησης, δηλαδή τη συχνότητα συντονισμού, όσο και από τη γεωμετρία του χώρου (σχήμα και αναλογίες). Για παράδειγμα, η κατασκευή των κλασικών παραλληλεπίπεδων χώρων οδηγεί στην εμφάνιση συμμετρικών διατάξεων των δεσμών και κοιλιών, ενώ χώροι με ακανόνιστες διαστάσεις οδηγούν στην ακανόνιστη εμφάνισή τους, πράγμα επιθυμητό.

Οι έντονες διακυμάνσεις στο χώρο μπορούν να αποτελέσουν σοβαρό πρόβλημα και στην τοποθέτηση των ηχείων σε ένα δωμάτιο, σε περίπτωση που τύχει να πέσουμε σε θέση δεσμού, όπως στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 13 Τοποθέτηση ηχείων σε θέσεις δεσμών [12]

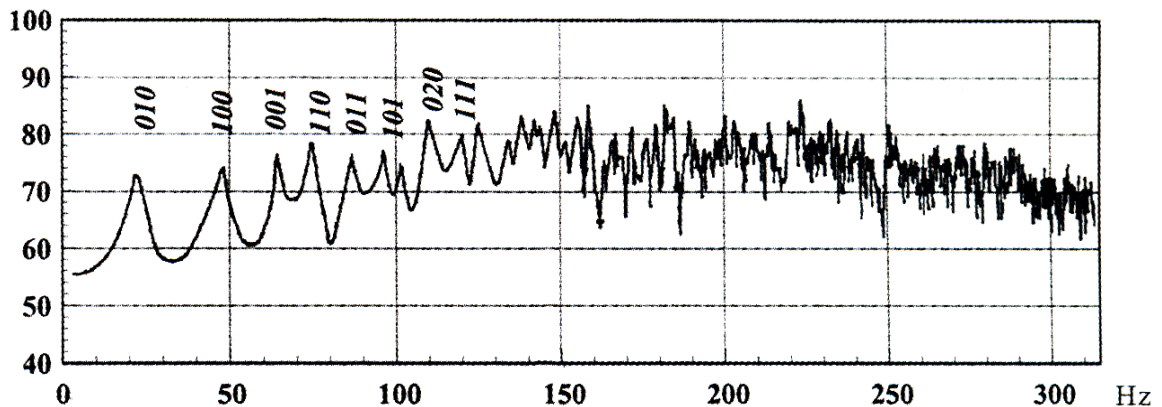


Συχνοτική απόκριση δωματίου

Η παρουσία στάσιμων κυμάτων σε έναν μικρό χώρο ακρόασης, όπως είναι κατά βάση τα δωμάτια ενός σπιτιού, μπορεί να χρωματίσει τον ήχο και να μειώσει ακόμα και την απόδοση ενός πολύ καλού ηχητικού συστήματος. Κάτι τέτοιο συμβαίνει όταν οι συχνότητες συντονισμού δεν είναι ισοκαταναμημένες στο φάσμα. Αυτό εξαρτάται από την περιοχή συχνότητων, την απορρόφηση του χώρου, τις διαστάσεις, τις αναλογίες και τη γεωμετρία του.

Από τη σχέση (9) είχαμε διαπιστώσει ότι το πλήθος των κανονικών τρόπων ταλάντωσης ανά σταθερό εύρος συχνότητων αυξάνει με τη συχνότητα. Αυτό σημαίνει, ότι στην περιοχή των χαμηλών συχνότητων οι συχνότητες συντονισμού απέχουν πολύ μεταξύ τους, ενώ σε υψηλότερες συχνότητες πλησιάζουν μεταξύ τους. Από μια συγκεκριμένη συχνότητα και πάνω δημιουργούνται μάλιστα τόσοι πολλοί συντονισμοί ανά οκτάβα, που είναι δύσκολο να τους διακρίνουμε. Κατά κανόνα οι συντονισμοί τείνουν να είναι προβληματικοί μέχρι περίπου τα 200 Hz – 300 Hz.

Για παράδειγμα, στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η απόκριση ενός χώρου με όγκο 180 m³ σε ήχους μέχρι περίπου 300 Hz. Στις πιο χαμηλές συχνότητες φαίνεται ότι οι τρόποι δόνησης είναι διακριτοί, που σημαίνει ότι κάθε συντονισμός διεγείρει κάποιο μεμονωμένο στάσιμο κύμα. Αν ηχήσει στο χώρο μια από αυτές τις συχνότητες, θα ενισχυθεί έντονα, ενώ οποιαδήποτε άλλη συχνότητα θα είναι ασθενική. Αντίθετα, στις υψηλότερες συχνότητες οι συχνότητες συντονισμού πλησιάζουν μεταξύ τους, έτσι ώστε από κάποιο σημείο και πέρα να μην μπορούμε πλέον να τις διακρίνουμε και ο χώρος να συμπεριφέρεται πλέον ως μεγάλος, δηλαδή να είναι διάχυτος και η μελέτη του να γίνεται με τη βοήθεια της στατιστικής ακουστικής.



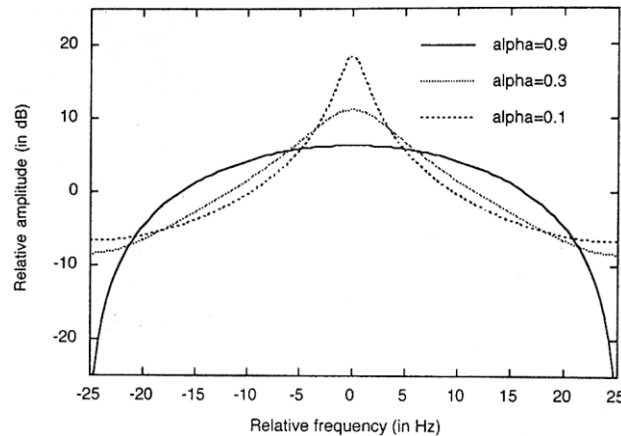
Σχήμα 14 Συμπεριφορά κλειστού χώρου σε υψηλές και χαμηλές συχνότητες [8]



Η απόκριση του δωματίου στην πραγματικότητα αποτελείται από συνδυασμένες αποκρίσεις τρόπων ταλάντωσης. Κάθε τρόπος ταλάντωσης έχει την κορυφή του στη συχνότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (6), αλλά έχει και ένα ορισμένο συχνοτικό εύρος ζώνης, που εξαρτάται από τον χρόνο αντήχησης ως εξής:

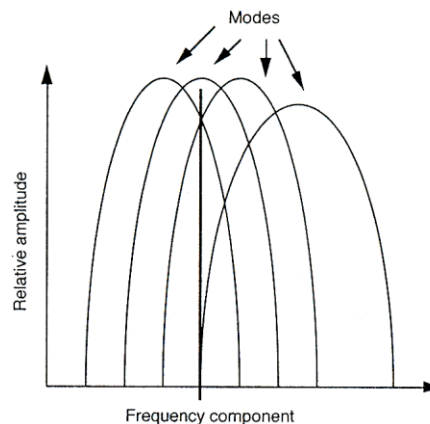
$$BW_{mode} \approx \frac{2.2}{RT_{60}} \quad (10)$$

Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος αντήχησης ή όσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση (για τη συγκεκριμένη συχνότητα), τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης του συντονισμού. Αυτό σημαίνει ότι γειτονικοί τρόποι δόνησης έχουν την τάση να υπερκαλύπτονται σε δωμάτιο με μικρό χρόνο αντήχησης.



Σχήμα 15 Συχνοτικό εύρος ζώνης τρόπων δόνησης ως προς διάφορες τιμές συντελεστή απορρόφησης [2]

Έτσι, ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων (το πλήθος των modes που διεγείρονται) και το εύρος ζώνης των συχνοτήτων συντονισμού, μία συχνότητα από μια πηγή μπορεί να διεγείρει μόνο έναν τρόπο δόνησης ή περισσότερους. Αν μια συχνότητα διεγείρει μόνο έναν τρόπο δόνησης, τότε οι συχνοτικές διακυμάνσεις θα είναι πολύ έντονες. Αν όμως αυτή η μία συχνότητα διεγείρει περισσότερους από έναν (γειτονικούς) τρόπους δόνησης, τότε οι συχνοτικές διακυμάνσεις θα μειωθούν. Για παράδειγμα, στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ότι μια συχνότητα διεγείρει περισσότερες συχνότητες συντονισμού:



Σχήμα 16 Το συχνοτικό αποτέλεσμα του αθροίσματος τριών γειτονικών τρόπων δόνησης [2]

Αφού μπορούν να διεγερθούν περισσότερες συχνότητες συντονισμού, σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο του χώρου μπορεί να ενισχύονται κάποιες συχνότητες από αυτές (κοιλία) και να αποσβένονται άλλες (δεσμός). Ο συνδυασμός των παραπάνω είναι συγκεκριμένος και διαφορετικός ανάλογα με τη θέση μας στο χώρο. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικό χρωματισμό του ήχου ανάλογα με τη θέση του ακροατή, δηλαδή έντονες διακυμάνσεις και του ηχοχρώματος (εκτός της στάθμης) μέσα στο χώρο.

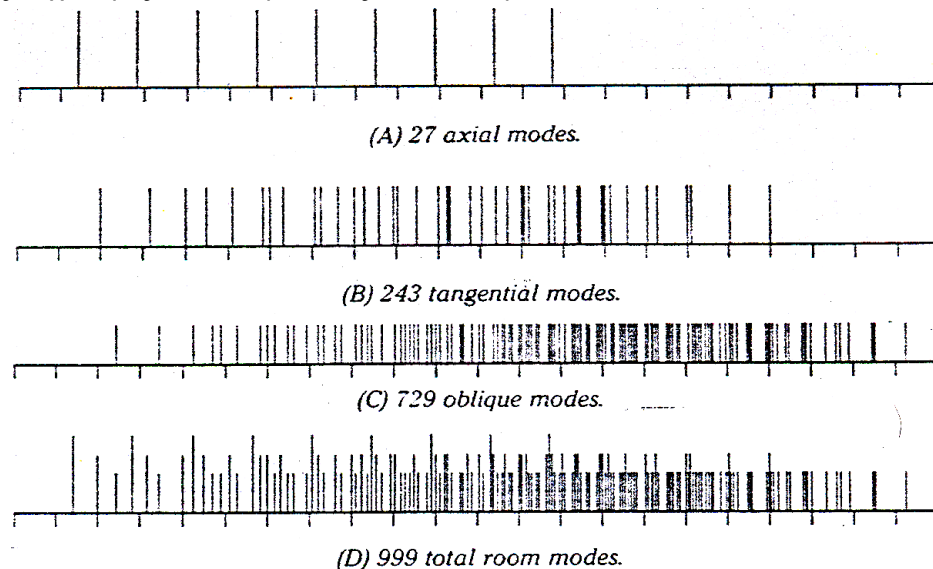


Ένας άλλος λόγος χρωματισμού του ήχου στις χαμηλότερες συχνότητες προέρχεται από την ιδιότητα των αξονικών στάσιμων κυμάτων να χάνουν μικρότερο μέρος της ενέργειας τους από ότι τα υπόλοιπα, λόγω λιγότερων ανακλάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να φθίνουν πιο αργά από ότι τα εφαπτομενικά, και τα πλάγια, και πολύ περισσότερο από τις συχνότητες που αντιστοιχούν στο διάχυτο πεδίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επικρατούν τα αξονικά στάσιμα κύματα σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες συχνότητες και να χρωματίζουν τον ήχο.

Η κατανομή των συχνοτήτων συντονισμού εξαρτάται επίσης από τις αναλογίες των διαστάσεων του χώρου, σύμφωνα με τη σχέση (6).

Δωμάτια με διαστάσεις που είναι ακέραια πολλαπλάσια μεταξύ τους προκαλούν την εμφάνιση κάποιων συντονισμών σε κοινές συχνότητες, με αποτέλεσμα την ακόμα μεγαλύτερη ενίσχυσή των συγκεκριμένων συντονισμών, πράγμα προς αποφυγή.

Η χειρότερη περίπτωση χώρου είναι ένα κυβικό δωμάτιο, όπου δηλαδή και οι τρεις διαστάσεις του είναι ίσες. Σε αυτή την περίπτωση αρκετές συχνότητες συντονισμού συμπίπτουν επακριβώς δημιουργώντας ακόμα μεγαλύτερη ενίσχυση κάποιων συγκεκριμένων συχνοτήτων. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζουμε τις θεωρητικές συχνότητες συντονισμού ενός τέτοιου δωματίου, διαστάσεων 40 x 40 x 40 feet.



Σχήμα 17 Συχνότητες συντονισμού για τη χειρίστη περίπτωση κυβικού δωματίου, διαστάσεων 40 x 40 x 40 feet [4]

Στο παραπάνω διάγραμμα έχουμε υπολογίσει τους συντονισμούς για τη συχνοτική περιοχή: 14.13 – 220.19 Hz και για $0 < n < 9$, δηλαδή υπολογίσαμε $3 \times 9 = 27$ αξονικούς τρόπους ταλάντωσης. Παρ' όλα αυτά μπορούμε να διακρίνουμε μόνο 9 γραμμές. Οι υπόλοιπες γραμμές δεν λείπουν, απλώς συμπίπτουν με αυτές που βλέπουμε. Έτσι, σχηματίζονται συχνότητες υπερβολικής ενίσχυσης και ενδιάμεσες μεγάλες περιοχές χωρίς ενίσχυση. Αν και οι υπόλοιποι τρόποι δόνησης, εφαπτομενικοί και πλάγιοι, είναι αρκετά πυκνοί, μπορούμε παρ' όλα αυτά να εξαγάγουμε κάποια γενικά συμπεράσματα.

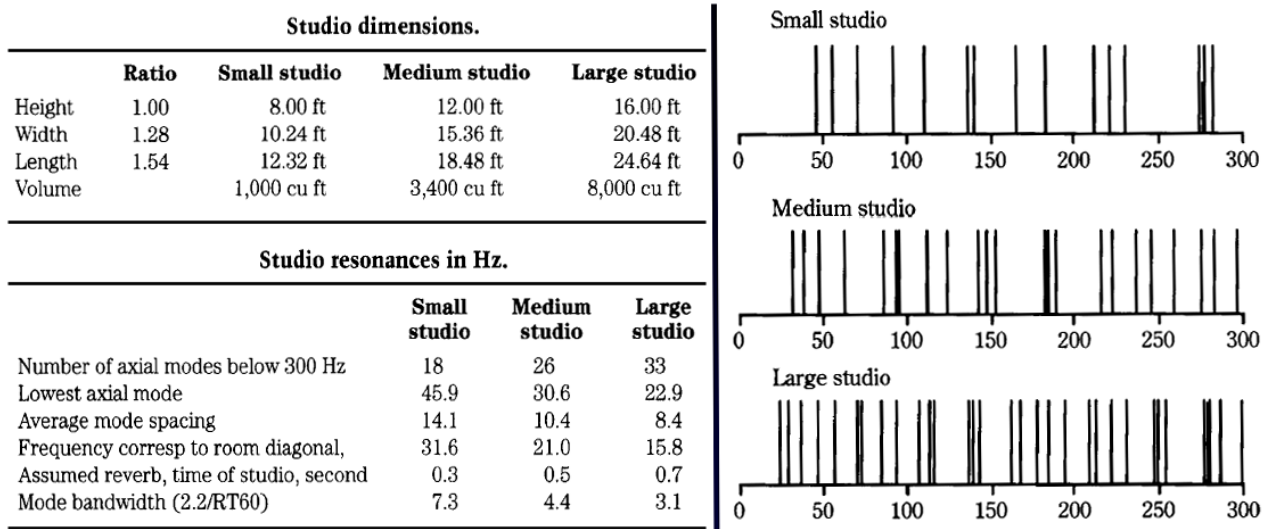
Δύο χώροι με τις ίδιες αναλογίες $x:y:z$ αλλά διαφορετικό όγκο (πολλαπλασιασμός διαστάσεων με τον ίδιο αριθμό) παρουσιάζουν τις ίδιες σχέσεις συχνοτήτων συντονισμού, αλλά με μετατόπιση ολόκληρου του φάσματος προς τις χαμηλότερες ή υψηλότερες συχνότητες ανάλογα. Για παράδειγμα, στον επόμενο πίνακα έχουμε πολλαπλάσια των διαστάσεων της περίπτωση D για βέλτιστες αναλογίες του χώρου (από αυτές που παρουσιάζουμε πιο κάτω):

Διαστάσεις (feet)			Συχνότητες συντονισμού (Hz)		Κλίμακα συχνοτήτων (Hz/υποδιαίρεση)
X	Y	Z	Υψηλές	Χαμηλές	
32.36068	20	12.36158	17.46	508.50	20
64.72136	40	24.72316	8.73	254.25	10
129.44272	80	49.44632	4.37	127.13	5

Πίνακας 1. Συντονισμοί για χώρους διαφορετικού όγκου, αλλά ίσων αναλογιών [4]



Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι περιπτώσεις κάποιων studio ηχογραφήσεων, των οποίων οι διαστάσεις είναι ίσα πολλαπλάσια, δηλαδή οι αναλογίες παραμένουν οι ίδιες, αλλά αυξάνει ο όγκος:



Σχήμα 18 Συντονισμοί για χώρους διαφορετικού όγκου, αλλά ίσων αναλογιών [12]

Συχνά οι αγοραστές καλών ηχητικών συστημάτων απογοητεύονται από την απόδοσή τους όταν τα τοποθετούν στον προσωπικό τους χώρο, αφού οι έντονοι συντονισμοί στα συνηθισμένα δωμάτια ακρόασης (που δεν υπήρχαν πιθανώς στον χώρο δοκιμής του καταστήματος) προκαλούν συχνά και έντονους χρωματισμούς. Γι' αυτό το λόγο κάποια καταστήματα επιτρέπουν τη δοκιμή του συστήματος από τους καταναλωτές στο σπίτι τους.

Επίδραση στο χρόνο αντήχησης

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα των ιδιοτήτων των στάσιμων κυμάτων που αναφέρθηκαν νωρίτερα είναι το γεγονός ότι στη συχνотική ζώνη των στάσιμων κυμάτων ο χώρος δεν υποστηρίζει πλέον ένα διάχυτο πεδίο κι έτσι η μέθοδος υπολογισμού του χρόνου αντήχησης δεν έχει πλέον ισχύ σε αυτή τη συχνотική περιοχή. Εξάλλου, η εξαγωγή της σχέσης του χρόνου αντήχησης είχε γίνει με αυτή την προϋπόθεση της ύπαρξης διάχυτου πεδίου. Ακριβώς για το λόγο αυτό η έννοια του υπολογισμού του χρόνου αντήχησης σύμφωνα με αυτά που γνωρίζουμε ως τώρα δεν έχει ισχύ για τη συχνотική ζώνη των στάσιμων κυμάτων.

Εφόσον τα στάσιμα κύματα προσπίπτουν σε λιγότερες επιφάνειες, δεν απορροφώνται τόσο γρήγορα όσο οι συχνотότητες που αντιστοιχούν στο αντηχητικό πεδίο. Η εξασθένιση της ηχητικής ενέργειας στο χώρο δεν είναι πλέον εκθετική με χρονική σταθερά ανάλογη της μέσης απορρόφησης του δωματίου. Αντίθετα, υπάρχουν διάφοροι χρόνοι εξασθένισης. Ο συντομότερος αντιστοιχεί στο διάχυτο πεδίο, ενώ ο μεγαλύτερος οφείλεται στους συντονισμούς του δωματίου, για λόγους που αναφέραμε πιο πάνω.

Οι συντονισμοί κάνουν την εμφάνισή τους σε ένα διάγραμμα RIR ως κορυφές, που αποκλίνουν από την ομαλή πτώση του διάχυτου πεδίου.



Τρόποι ελέγχου των συντονισμών

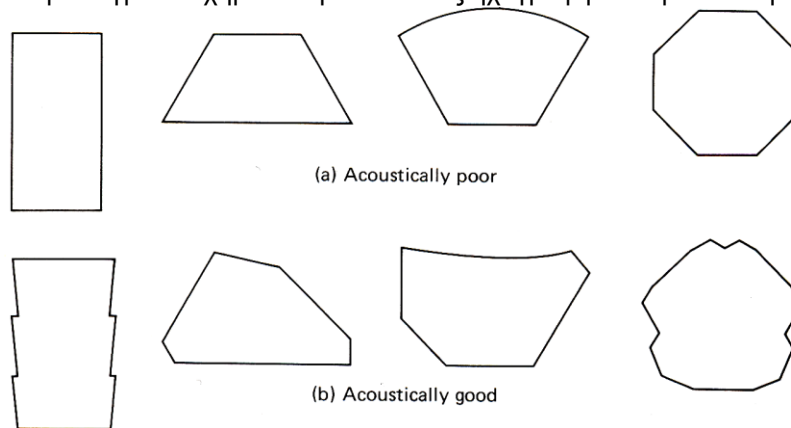
Κατάλληλες αναλογίες του χώρου

Εφόσον οι συντονισμοί των χαμηλών συχνοτήτων δεν μπορούν να αποφευχθούν, εκτός και αν χρησιμοποιήσουμε τελείως απορροφητικά υλικά για αυτές, ο στόχος μας κατά τον σχεδιασμό ενός χώρου είναι να ελέγξουμε τουλάχιστον την επίδρασή τους μεταβάλλοντας τις αναλογίες τους με σκοπό να πετύχουμε ίσες αποστάσεις μεταξύ των συχνοτήτων.

Αν και δεν είναι πάντα δυνατόν να προσδιορίσει κανείς με μαθηματικό τρόπο το καλύτερο σχήμα και τις βέλτιστες διαστάσεις ενός χώρου βασιζόμενος στα στάσιμα κύματα, η φυσική ιδέα οδηγεί σε κάποια γενικά συμπεράσματα για τη δημιουργία ενός χώρου με καλά ακουστικά χαρακτηριστικά.

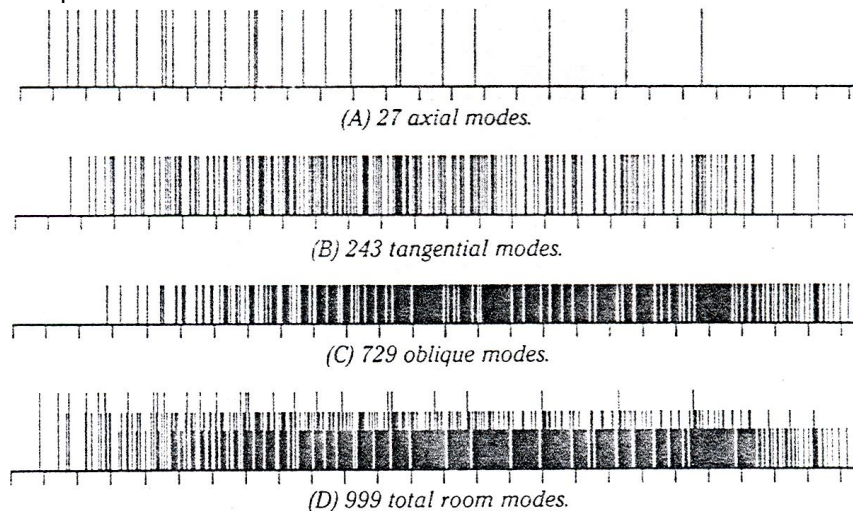
Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι για να επιτύχει κανείς μια ομοιόμορφη κατανομή στις πιθανές συχνότητες συντονισμού και για να δημιουργήσει την εμφάνιση όσο το δυνατόν περισσότερων από αυτές, οι κύριες διαστάσεις του χώρου δεν θα πρέπει να είναι ακέραια πολλαπλάσια μεταξύ τους. Μάλιστα, ένας χώρος με ακανόνιστο σχήμα θα δημιουργήσει καλύτερη διάχυση από έναν χώρο με συμμετρία.

Τα παρακάτω είναι παραδείγματα σχημάτων για αίθουσες ηχογραφήσεων με καλά ή άσχημα ακουστικά χαρακτηριστικά:



Σχήμα 19. Σχήματα αιθουσών συναυλιών (α) καλής και (β) κακής ακουστικής [11]

Γι' αυτό ενδείκνυται η κατασκευή ακανόνιστων και μη συμμετρικών χώρων, έτσι ώστε να διασφαλίσουμε ένα φάσμα με συχνότητες συντονισμών όσο το δυνατόν πιο διάσπαρτες και ισοκατανεμημένες. Σε έναν καλοσχεδιασμένο χώρο οι συχνότητες συντονισμού θα πρέπει να κατανέμονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην προκαλούν υπερβολική ενίσχυση ή εξασθένηση κάποιου τμήματος του φάσματος, όπως είναι η παρακάτω περίπτωση:



Σχήμα 20. Συχνότητες συντονισμού για χώρο με βέλτιστες αναλογίες: 64.72136 x 40 x 24.72136 feet (D) [4]

Η σύγκριση με την χειρίστη περίπτωση του κυβικού δωματίου (Σχήμα 15.) αποκαλύπτει τη διαφορά στα φάσματα των δύο περιπτώσεων.



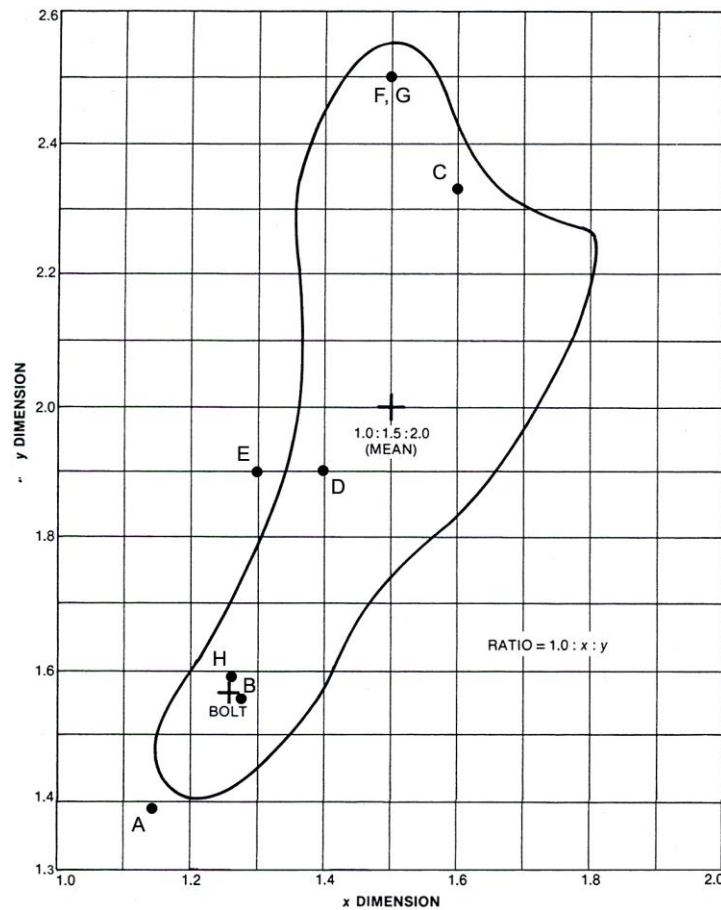
Αρκετές μελέτες έχουν γίνει για τον προσδιορισμό των βέλτιστων αναλογιών ενός χώρου και υπάρχει μια σειρά από τέτοιες προτάσεις, όπως οι παρακάτω:

		Height	Width	Length
Sepmeyer	A	1.00	1.14	1.39
	B	1.00	1.28	1.54
	C	1.00	1.60	2.33
Louden	D	1.00	1.40	1.90
	E	1.00	1.30	1.90
	F	1.00	1.50	2.50
Volkman	G	1.00	1.50	2.50
Boner	H	1.00	$\sqrt[3]{2} = 1.26$	$\sqrt[3]{4} = 1.59$

Πίνακας 2. Διάφορες προτάσεις για βέλτιστες αναλογίες ενός χώρου [2], [4], [10]

Αυτό δε σημαίνει ότι είναι και οι μοναδικές.

Ο Bolt δίνει τις βέλτιστες αναλογίες ενός παραλληλεπίπεδου δωματίου το οποίο έχει ηπιότερη συμπεριφορά στις χαμηλές συχνότητες ενός μικρού δωματίου με το διάγραμμα του επόμενου σχήματος. Η περιοχή μέσα από τις διακεκομμένες γραμμές ονομάζεται «περιοχή Bolt».



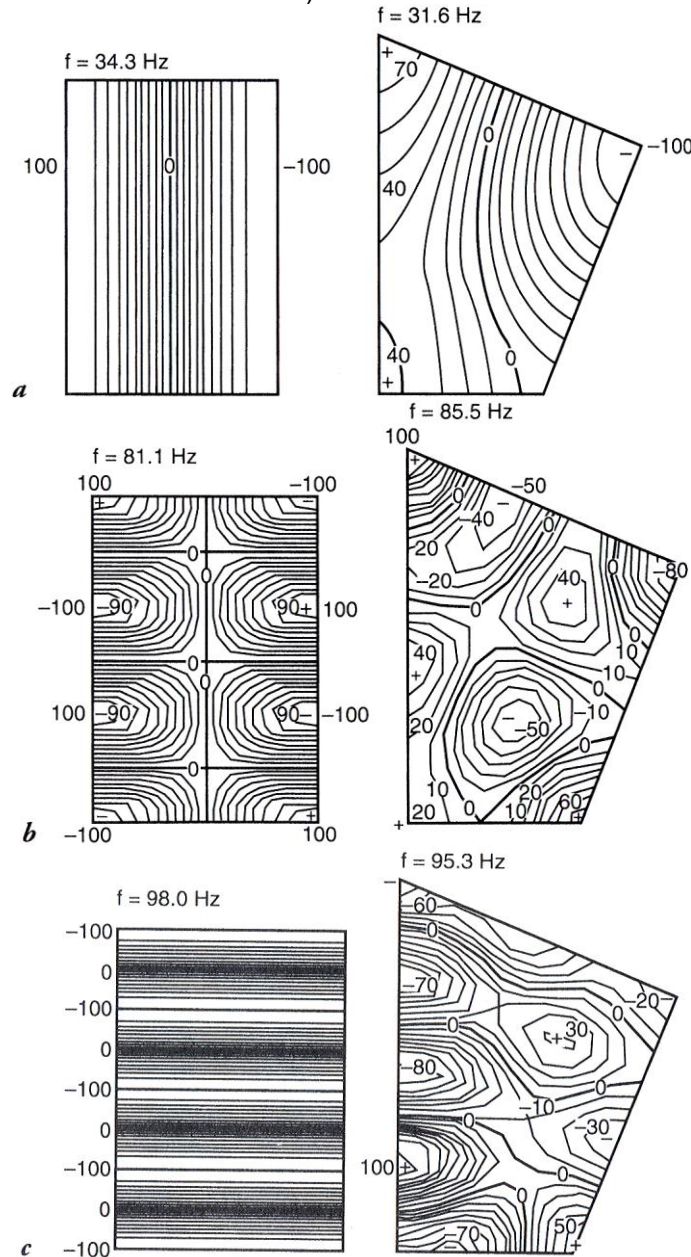
Σχήμα 21. Διάγραμμα Bolt για προτεινόμενες βέλτιστες αναλογίες διαστάσεων δωματίου [1]

Πάντως, κατά κανόνα μεγαλύτερα δωμάτια δημιουργούν πιο ευχάριστο ήχο από ότι τα μικρά. Αυτό συμβαίνει, επειδή στα μεγάλα δωμάτια οι συχνότητες συντονισμού είναι τόσο κοντά μεταξύ τους που δεν επιτρέπουν σε κάποιες συγκεκριμένες να ξεχωρίσουν. Δυστυχώς, υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος του χώρου λόγω της παραμέτρου του χρόνου αντήχησης.

Μη παράλληλοι τοίχοι

Όπως είδαμε νωρίτερα, η κατασκευή χώρων με ακανόνιστες διαστάσεις οδηγεί και στην ακανόνιστη εμφάνιση κοιλιών και δεσμών, πράγμα επιθυμητό.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι ισοϋψείς καμπύλες των στάσιμων κυμάτων που αντιστοιχούν στους ίδιους τρόπους δόνησης (παραπλήσιες συχνότητες) για δύο δωμάτια με ίδιες διαστάσεις αλλά διαφορετικό σχήμα (ένα παραλληλεπίπεδο και ένα ακανόνιστο).

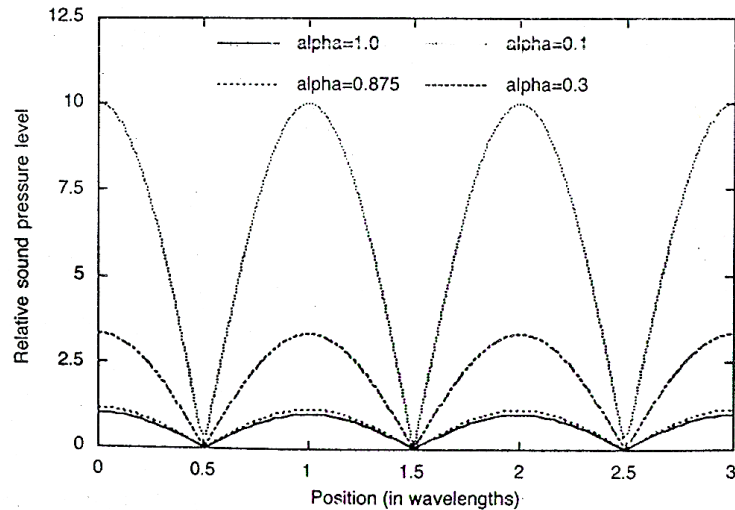


Σχήμα 22. Χαρτογράφηση Ισοϋψών καμπύλων για τους τρόπους δόνησης (α) (1,0,0), (β) (3,1,0) και (γ) (4,0,0) [5]

Πρέπει, βέβαια, να σημειώσουμε εδώ ότι η εμφάνιση στάσιμων κυμάτων ενυπάρχει σε κάθε χώρο. Κατασκευάζοντας έναν χώρο όπου οι τοίχοι δεν είναι παράλληλοι δεν αποφεύγουμε τη δημιουργία τους, απλώς μεταβάλλουμε το φάσμα τους, καθιστώντας μάλιστα πιο δύσκολο τον υπολογισμό των συχνοτήτων εμφάνισής τους. Άλλωστε, οι εφαπτομενικοί και πλάγιοι τρόποι ταλάντωσης εξακολουθούν να δημιουργούνται.

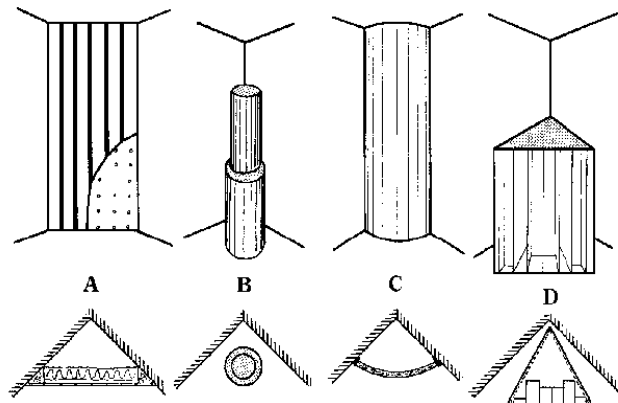
Προσθήκη ηχοαπορροφητικών υλικών χαμηλών συχνοτήτων – BASS Traps

Οι αξονικοί, εφαπτομενικοί και πλάγιοι τρόποι ταλάντωσης εξασθενούν με διαφορετικές ταχύτητες. Μπορούμε να μειώσουμε τη στάθμη κάποιου τρόπου ταλάντωσης χρησιμοποιώντας κάποιο απορροφητικό υλικό για τη συχνότητα που μας ενδιαφέρει.



Σχήμα 23. Χωρικές διακυμάνσεις της ηχητικής στάθμης των modes για διάφορες τιμές συντ/στή απορρόφησης [2]

Αυτό θα πρέπει να τοποθετηθεί σε επιφάνειες κοντά στις οποίες η πίεση δεδομένου τρόπου ταλάντωσης είναι μεγάλη, αν θέλουμε να είναι αποτελεσματικό στην απορρόφηση αυτού του τρόπου ταλάντωσης. Εφόσον όλοι οι τρόποι ταλάντωσης έχουν μέγιστα στις γωνίες του δωματίου, αυτή είναι και η συνήθης επιλογή.



Σχήμα 23. Bass traps [12]

Περαιτέρω διάχυση του ήχου μπορούμε να επιτύχουμε με μια ακανόνιστη κατανομή των απορροφητικών υλικών στο χώρο, αλλά η υπερβολή αυτού μπορεί να οδηγήσει στο εξίσου μη επιθυμητό αποτέλεσμα της έντονης μείωσης της ηχητικής στάθμης κοντά στα απορροφητικά υλικά και την αύξησή της σε άλλα σημεία του χώρου.

Απορρόφηση χώρου

Αυξάνοντας το εύρος της ζώνης κάθε τρόπου δόνησης μπορούμε να πετύχουμε καλύτερη επικάλυψη των γειτονικών συντονισμών, πράγμα επιθυμητό, ώστε οι διαφορές στις στάθμες των διαφόρων συχνοτήτων να μειωθούν και να λάβουμε ένα πιο ομαλό και ισοκατανομημένο συχνотικό αποτέλεσμα, χωρίς ενίσχυση συγκεκριμένων συχνотικών περιοχών (, δηλαδή χρωματισμό). Σύμφωνα με τη σχέση (10) αυτό το επιτυγχάνουμε ανάλογα με τη συχνотική περιοχή με αύξηση της απορρόφησης του χώρου.



2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Davis D., Davis C. (1997), "Sound system engineering"
- [2] Howard D., Angus J. (1996), "Acoustics and Psychoacoustics"
- [3] Everest A. F. (1998), "Εγχειρίδιο ακουστικής"
- [4] Woram J. (1989), "Sound Recording Handbook"
- [5] Huber M. D., Runstein R. E. (1997), "Modern Recording Techniques"
- [6] Everest A. F. (1997), "Sound Studio Construction on a Budget"
- [7] Rumsey F., McCormick T. (2002), "Sound and Recording"
- [8] Σκαρλάτος Δ. (2003), "Εφαρμοσμένη ακουστική"
- [9] Rossing T., Moore R., Wheeler P. (2002). "The science of sound"
- [10] Κουτσοδημάκης Χ., Σηφάκης Μ., "Εργαστηριακό Φυλλάδιο Μηχανικής Ήχου Ι"
- [11] Porges G. (1977), "Applied acoustics"
- [12] Bistafa S. R. (2002), "Acoustics of small rooms", *First Pan-American Iberian Meeting on Acoustics* Cancun, Mexico, at www.acoustics.org/smallrooms.pdf
- [13] Wieczorek M. (2006), "Acoustics Crash Course 1 – Modes", at <http://www.marktaw.com/recording/Acoustics/AcousticsCrashCourse1-Mod.html>

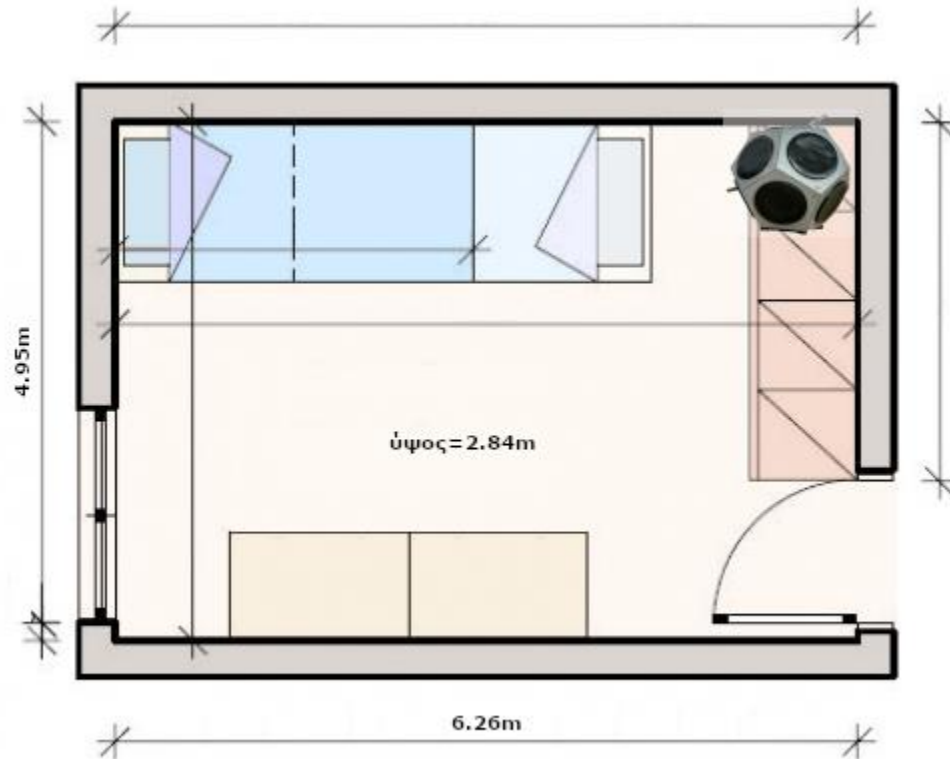


3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΜΕΡΟΣ

Είναι πολύ εύκολο να ακούσουμε τους τρόπους ταλάντωσης ενός χώρου, εάν παράξουμε έναν καθαρό τόνο από μια γεννήτρια, τοποθετήσουμε το ηχείο σε μια από τις γωνίες του δωματίου (αφού γνωρίζουμε ότι εκεί έχουμε μέγιστο) και μετακινηθούμε μέσα στο χώρο. Σε συγκεκριμένες συχνότητες που συμπίπτουν με τις συχνότητες συντονισμού του δωματίου θα διαπιστώσουμε ότι σε άλλα σημεία ενισχύεται έντονα ο ήχος, ενώ σε άλλα μειώνεται.

Πειραματική διάταξη

- Χρησιμοποιούμενες συσκευές: Η/Υ + {1},{2},{3},{5}
- Σχήμα (να γίνει κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου)





Πειραματική διαδικασία

1. Να γίνει βαθμονόμηση του ηχομέτρου (calibration).
2. Να μετρηθεί η στάθμη θορύβου βάθους (background noise) της αίθουσας: $B = \dots\dots\dots$ dB.
3. Να μετρηθούν οι διαστάσεις της αίθουσας του εργαστηρίου.
4. Να υπολογιστούν οι ιδιοσυχνότητες των εφαπτομενικών στάσιμων κυμάτων (1,0,0), (0,1,0), (1,1,0), (1,2,0) και (2,1,0).
5. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, τοποθετείστε την ιδιοσυχνότητα $f_{(2,1,0)} = \dots\dots$ Hz στη γεννήτρια συχνοτήτων (σε μία γωνία της αίθουσας) και λάβετε μετρήσεις στάθμης ηχητικής πίεσης σε ένα πλέγμα 45 σημείων του δωματίου.

Θέση (m;m)	(0;0)	(0;0,78)	(0;1,56)	(0;2,35)	(0;3,13)	(0;3,91)	(0;4,69)	(0;5,48)	(0;6,26)
(0;0)									
(1,21;0)									
(2,42;0)									
(3,64;0)									
(4,85;0)									

Επεξεργασία μετρήσεων

1. Να περιγράψετε το φαινόμενο των στάσιμων κυμάτων για την περίπτωση της παραπάνω ιδιοσυχνότητας.
2. Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις να σχεδιάσετε τις ισοφασικές καμπύλες για την αίθουσα και τη συγκεκριμένη συχνότητα. Συμφωνούν εν γένει με τις θεωρητικά αναμενόμενες; Πού πιστεύετε ότι οφείλονται τυχόν αποκλίσεις;