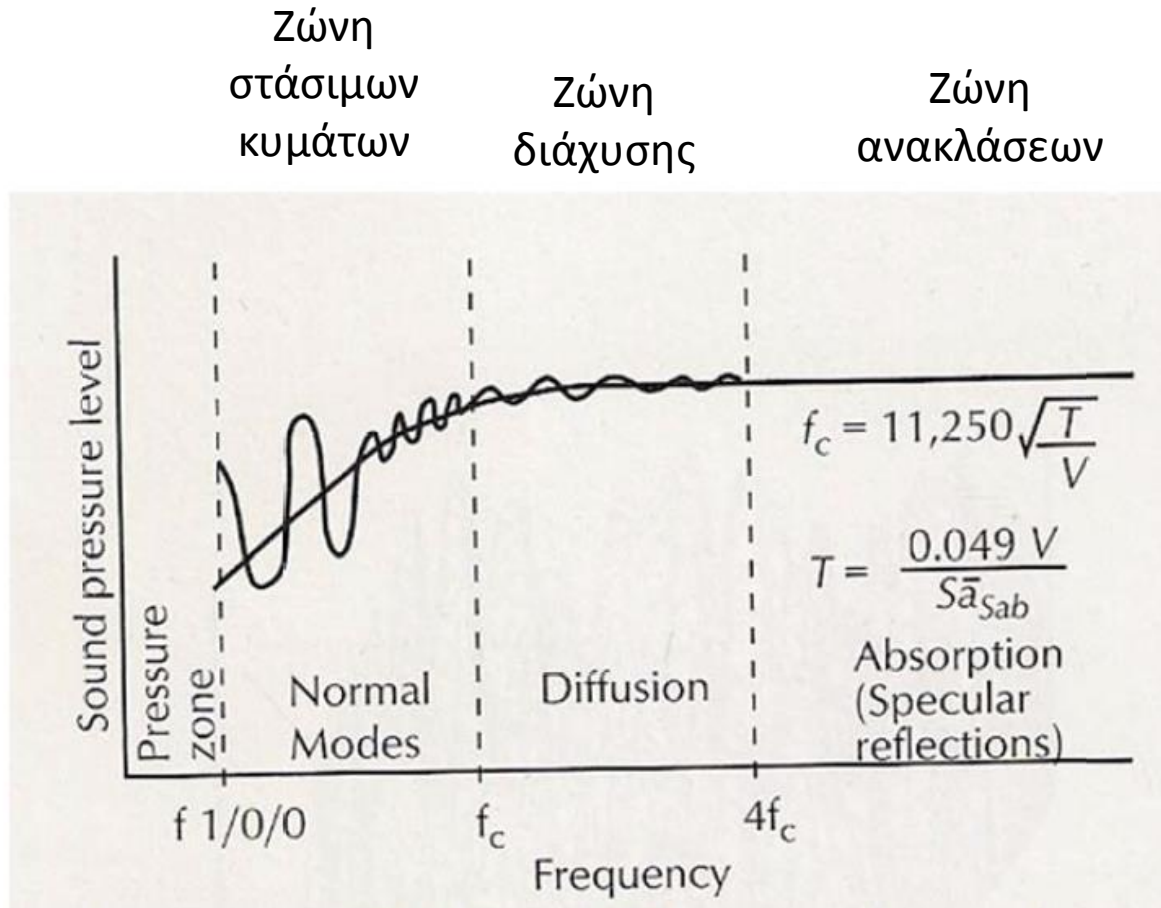


# Ύλη μαθήματος

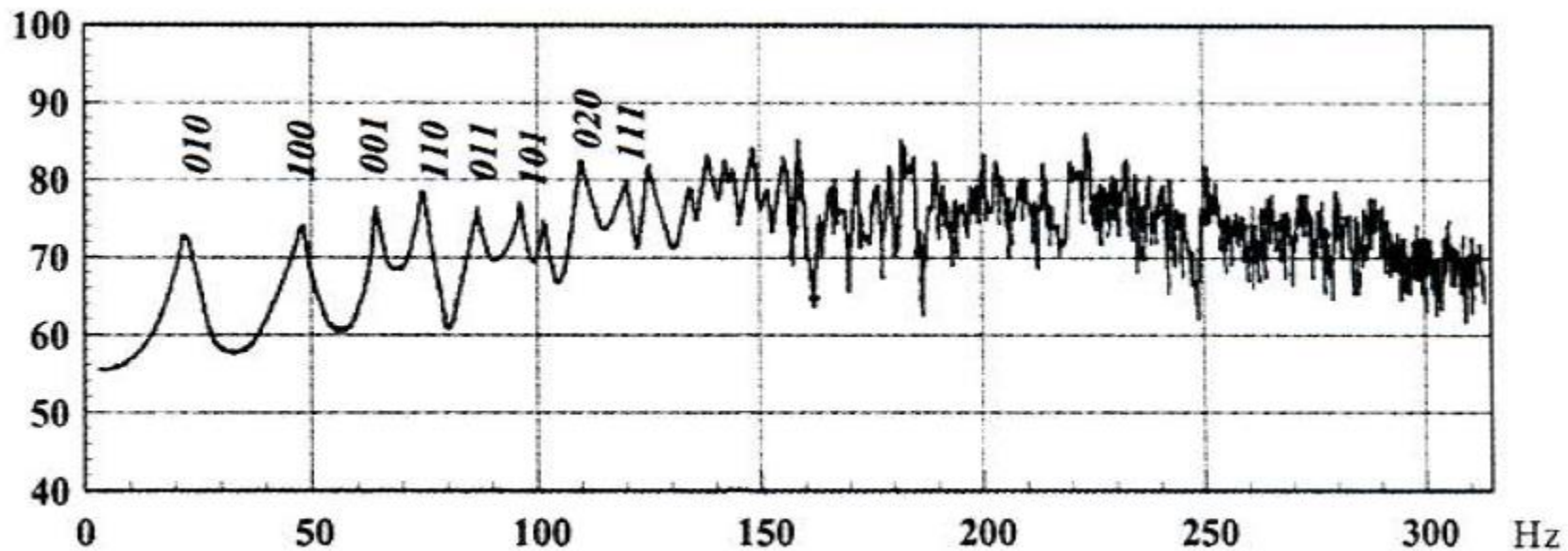
- Fundamentals of Acoustics (Kinsler), chapters 4.3 (σελ 93-95), 9.2 (σελ 246) και σελίδες 348-357 (optional)
- Σημειώσεις μαθήματος σελ 89-92
- Σημειώσεις\_ορθογώνιο\_δωμάτιο

# Διάγραμμα Bolt-Beranek-Newman



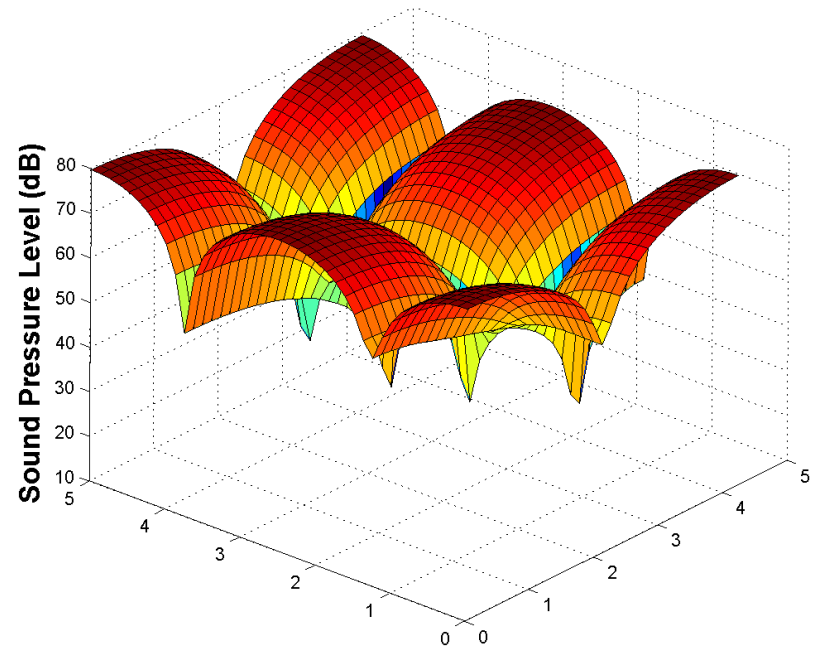
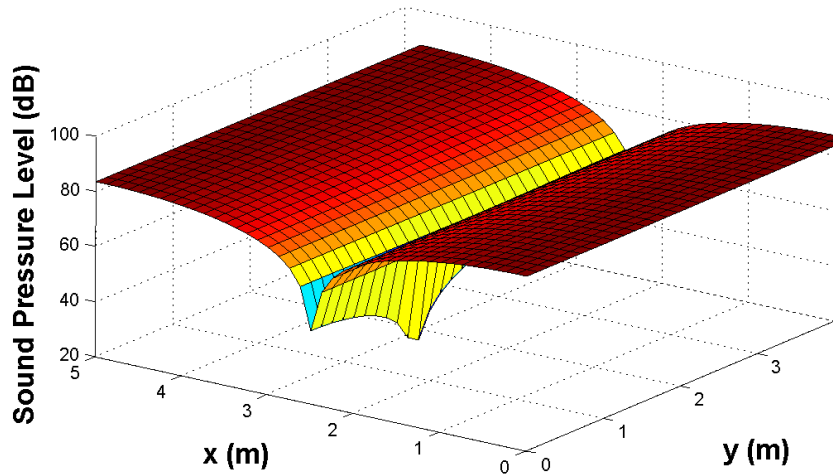
Σχήμα 6.4 Διάγραμμα Bolt-Beranek-Newmann – Ελεγκτής σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου

# Απόκριση Συχνότητας δωματίου



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

# Ηχητικό πεδίο στο ορθογώνιο δωμάτιο σε δύο διαφορετικές συχνότητες



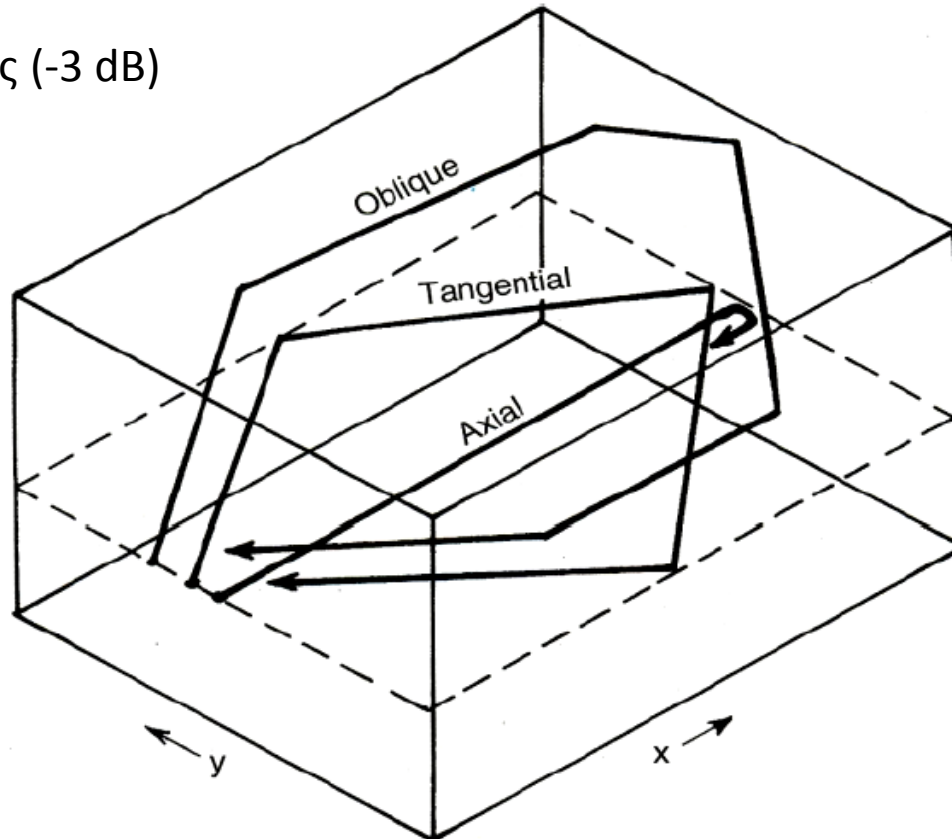
- Ιδιοσυχνότητα = συχνότητα συντονισμού
- Ιδιομορφή = τρόπος ταλάντωσης

# Κλειστές διαδρομές

Axial = αξονικές (0 dB)

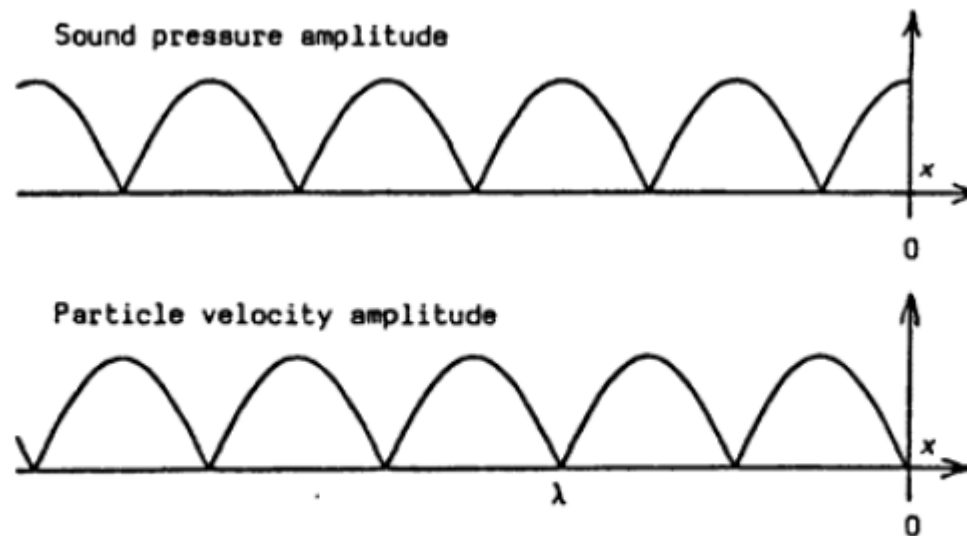
Tangential= εφαπτομενικές (-3 dB)

Oblique= πλάγιες (-6 dB)



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

Διακυμάνσεις της πίεσης και της ταχύτητας σε κατά την κάθετη πρόσπτωση επίπεδου κύματος σε άκαμπτη επιφάνεια



*Figure 1.2.9 Standing wave pattern caused by reflection from a rigid surface at  $x = 0$ .*

# Οπτικοποίηση φαινομένων

- <https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/StandingWaves/StandingWaves.html>
- <https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/rect-membrane/rect-mem.html>



# Υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων

Ιδιοσυχνότητες ορθογωνίου δωματίου:

$L_x$ : μήκος (m)

$L_y$ : πλάτος (m)

$L_z$ : ύψος (m)

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

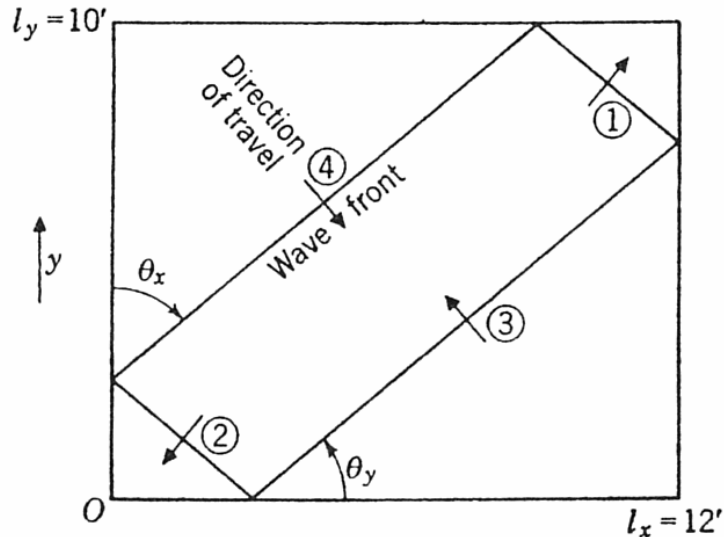
Συγκεκριμένα:

- Οι εφαπτομενικοί τρόποι δόνησης έχουν το ½ της ενέργειας των αξονικών, άρα 3 dB χαμηλότερη στάθμη και
- Οι πλάγιοι τρόποι δόνησης έχουν το ¼ 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

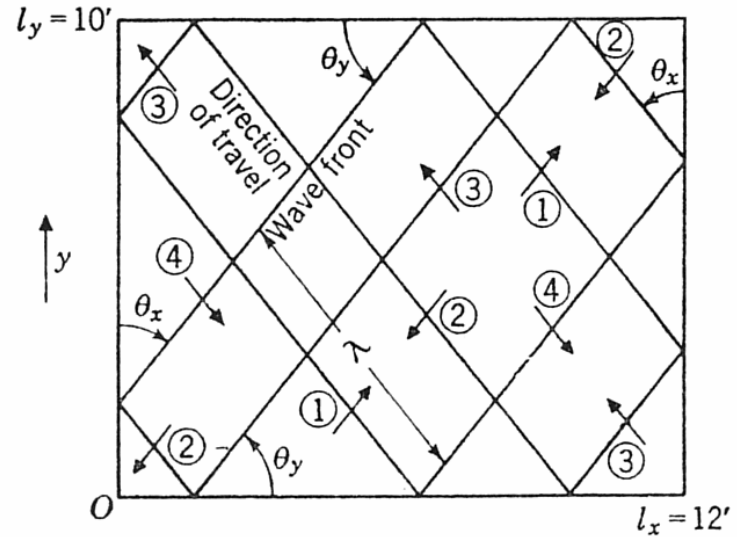
Αυτό δεν ισχύει πάντως σε όλες τις περιπτώσεις, αφού στην περίπτωση ανώμαλης κατανομής των απορροφητικών υλικών στις διάφορες επιφάνειες ανάλογα με τα απορροφητικά υλικά του κάθε τοίχου μπορεί να τύχει ένας εφαπτομενικός τρόπος ταλάντωσης να είναι πιο έντονος από έναν αξονικό.

# Κλειστές διαδρομές



(a)

$$n_x=1, n_y=1, n_z=0$$



(b)

$$n_x=3, n_y=2, n_z=0$$

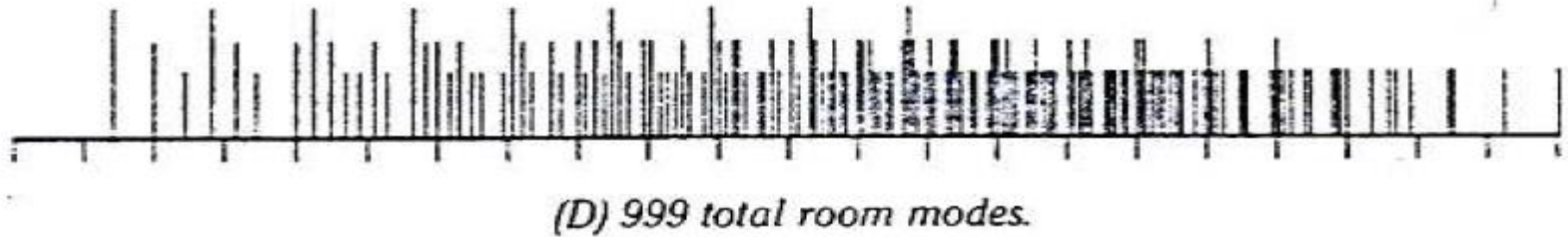
# Ιδιοσυχνότητες

$n_x$	$n_y$	$n_z$	$f_n$ (Hz)
0	1	0	25
1	0	0	30
0	0	1	36
1	1	0	39
0	1	1	43
1	0	1	47
0	2	0	49
1	1	1	53
1	2	0	58
2	0	0	60
0	2	1	61
2	1	0	65
1	2	1	68
2	0	1	70
0	0	2	72

*Table 3.1.1. Calculated natural frequencies at low frequencies using (3.1.5) in a rectangular room with dimensions 5.7 m, 7.0 m, 4.8 m.*

# Κατανομή ιδιοσυχνοτήτων

Κυβικό δωμάτιο



Δωμάτιο με βέλτιστες αναλογίες



# Προτεινόμενες αναλογίες διαστάσεων

		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]

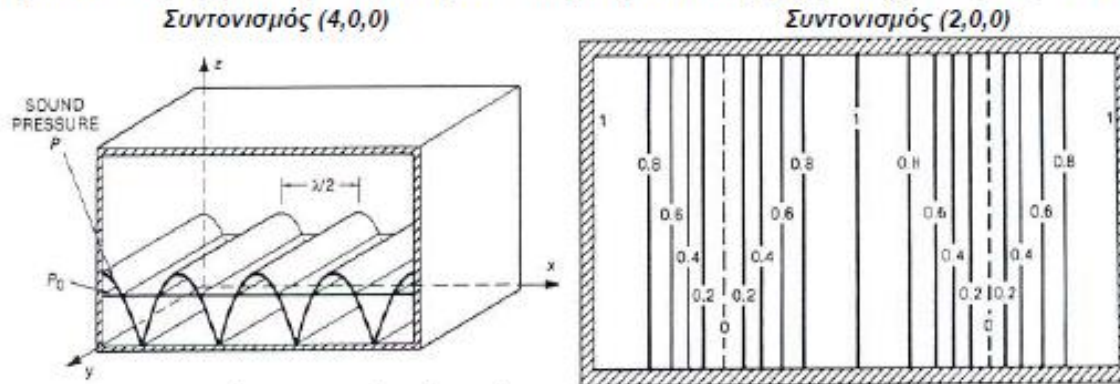
# Άσκηση

- Σε ένα ορθογώνιο δωμάτιο με διαστάσεις  $4 \times 5 \times 2.8 \text{ m}$  παρατηρούμε έντονο συντονισμό στα  $103 \text{ Hz}$ , τον οποίο θέλουμε να τον αποδυναμώσουμε. Έχουμε στη διάθεσή μας μικρή ποσότητα απορροφητικού panel. Προτείνεται τρόπο τοποθέτησης του panel (σε ποιους τοίχους πρέπει να μπει) ώστε να έχουμε το βέλτιστό δυνατό αποτέλεσμα. Δίνεται η ταχύτητα του ήχου  $c = 340 \text{ m/s}$ .

- Όταν η συχνότητα διέγερσης συμπίπτει με μία ιδιοσυχνότητα, τότε οι διακυμάνσεις του ηχητικού πεδίου περιγράφονται με πολύ καλή προσέγγιση από τη συγκεκριμένη ιδιομορφή.
- Όταν η συχνότητα διέγερσης δε συμπίπτει με κάποια ιδιοσυχνότητα, τότε οι διακυμάνσεις του ηχητικού πεδίου περιγράφονται από την υπέρθεση πολλών «γειτονικών» ιδιομορφών.

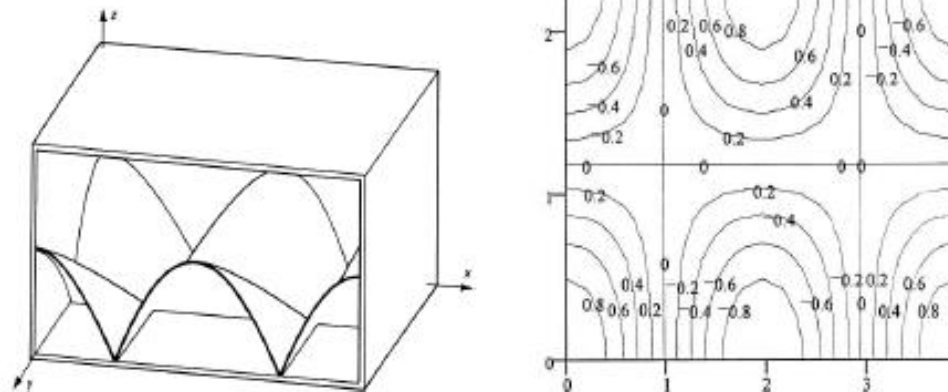
# Ισουψείς καμπύλες

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



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

**Συντονισμός (2,1,0)**



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



# Σχεδιασμός σημείων μεγίστων και ελαχίστων σε μία ιδιομορφή

Έστω λοιπόν ότι μας δίνεται η ιδιομορφή  $(\alpha, \beta, 0)$  και οι διαστάσεις του δωματίου  $Lx$  και  $Ly$  (η  $Lz$  θεωρούμε ότι είναι πολύ μικρότερη από τις άλλες διαστάσεις οπότε δεν τη λαμβάνουμε υπόψιν). Για να σχεδιάσουμε τις κομβικές γραμμές ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα.

- Αν η ιδιομορφή είναι εφαπτομενική, τη σπάμε στις δύο αξονικές της συνιστώσες  $(\alpha, 0, 0)$  και  $(0, \beta, 0)$  και μελετάμε κάθε περίπτωση χωριστά.
- Έστω ότι μελετάμε τώρα την  $(\alpha, 0, 0)$  ιδιομορφή. Χωρίζουμε τον μήκος του δωματίου σε  $2a$  ισομήκη τμήματα. Οι συντεταγμένες αυτών των σημείων θα εμφανίζονται προφανώς ως εξής: πρώτο σημείο:  $x = 0$ , δεύτερο σημείο  $x = \frac{Lx}{2a}$ , τρίτο σημείο  $x = \frac{2Lx}{2a}$ , τέταρτο σημείο  $x = \frac{3Lx}{2a}$ , ... προτελευταίο σημείο  $x = \frac{(2a-1)Lx}{2a}$  και τελευταίο σημείο  $x = Lx$ .
- Οι κομβικές γραμμές θα είναι κάθετες στον άξονα των  $x$  και θα περνάνε από τα σημεία που είναι περιττά πολλαπλάσια της υποδιαίρεσης  $\frac{Lx}{2a}$ , δηλαδή από τα  $\frac{Lx}{2a}, \frac{3Lx}{2a}, \dots$ , και  $\frac{(2a-1)Lx}{2a}$ .
- Κάνουμε το ίδιο για την  $(0, \beta, 0)$  ιδιομορφή και σχεδιάζουμε τις κομβικές γραμμές μαζί με τις προηγούμενες.

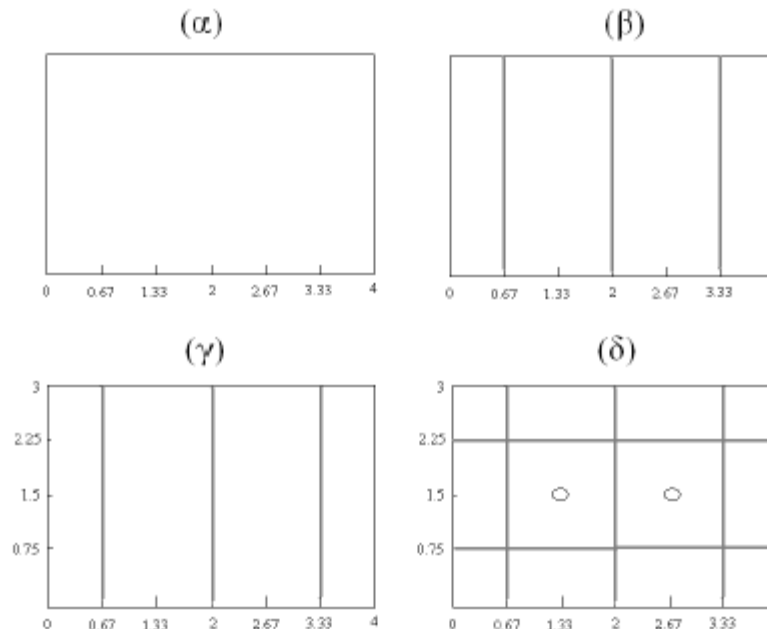
# Σχεδιασμός σημείων μεγίστων και ελαχίστων σε μία ιδιομορφή

**Παράδειγμα:** Σχεδιάστε τις κομβικές γραμμές της  $(3,2,0)$  ιδιομορφής σε ένα δωμάτιο διαστάσεων  $4 \times 3$  m. Υποδείξτε δύο διαφορετικά σημεία μέγιστης πίεσης τα οποία είναι μακριά από τις περατωτικές επιφάνειες του χώρου.

# Σχεδιασμός σημείων μεγίστων και ελαχίστων σε μία ιδιομορφή

**Παράδειγμα:** Σχεδιάστε τις κομβικές γραμμές της (3,2,0) ιδιομορφής σε ένα δωμάτιο διαστάσεων 4x3 m. Υποδείξτε δύο διαφορετικά σημεία μέγιστης πίεσης τα οποία είναι μακριά από τις περατωτικές επιφάνειες του χώρου.

**Απάντηση:** Χωρίζουμε το μήκος του δωματίου σε 6 ισομήκη τμήματα. Οι συντεταγμένες των σημείων θα είναι  $x=0$ ,  $x=1*4/6=0.67$ ,  $x=2*4/6=1.33$ ,  $x=3*4/6=2$ ,  $x=4*4/6=2.67$ ,  $x=5*4/6=3.33$  και  $x=4$  m. Αυτό το βήμα φαίνεται στο σχήμα 3(α). Τραβάμε τις κάθετες γραμμές στις περιττές υποδιαρέσεις σύμφωνα με το σχήμα 3(β). Χωρίζουμε το πλάτος του δωματίου σε 4 ισομήκη τμήματα. Οι συντεταγμένες των σημείων θα είναι  $y=0$ ,  $y=1*3/4=0.75$ ,  $y=2*3/4=1.5$ ,  $y=3*3/4=2.25$  και  $y=3$  m (βλ. σχήμα 3(γ)). Τραβάμε τις κάθετες γραμμές στις περιττές υποδιαρέσεις σύμφωνα με το σχήμα 3(δ). Έχουμε τελικά σχεδιάσει τις κομβικές γραμμές.

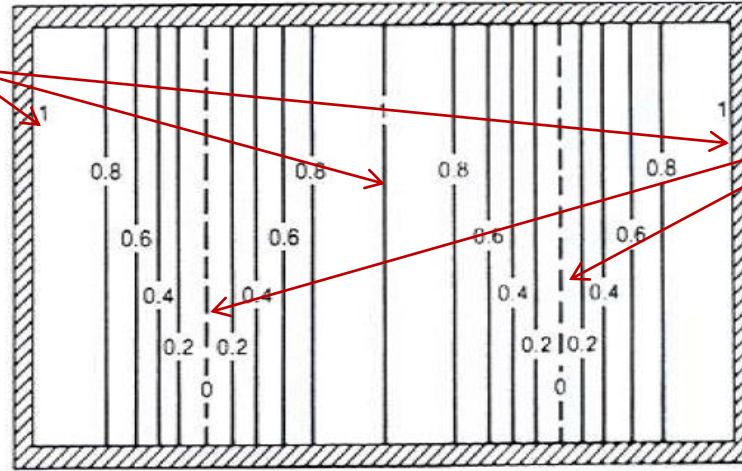


Σχήμα 3. Παράδειγμα για το σχεδιασμό των κομβικών γραμμών σε ένα δισδιάστατο δωμάτιο.

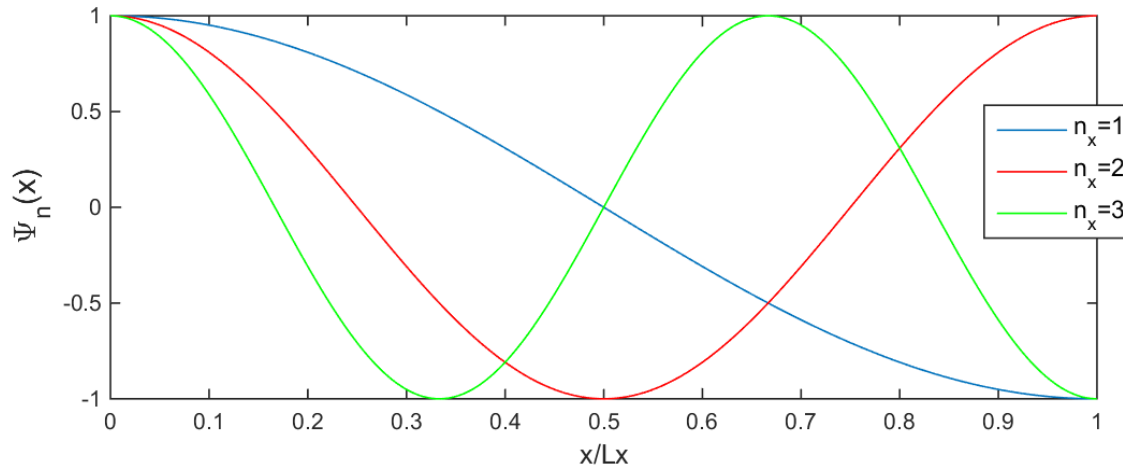
# Κανονική συνάρτηση VS ισοψείς καμπύλες

Συντονισμός (2,0,0)

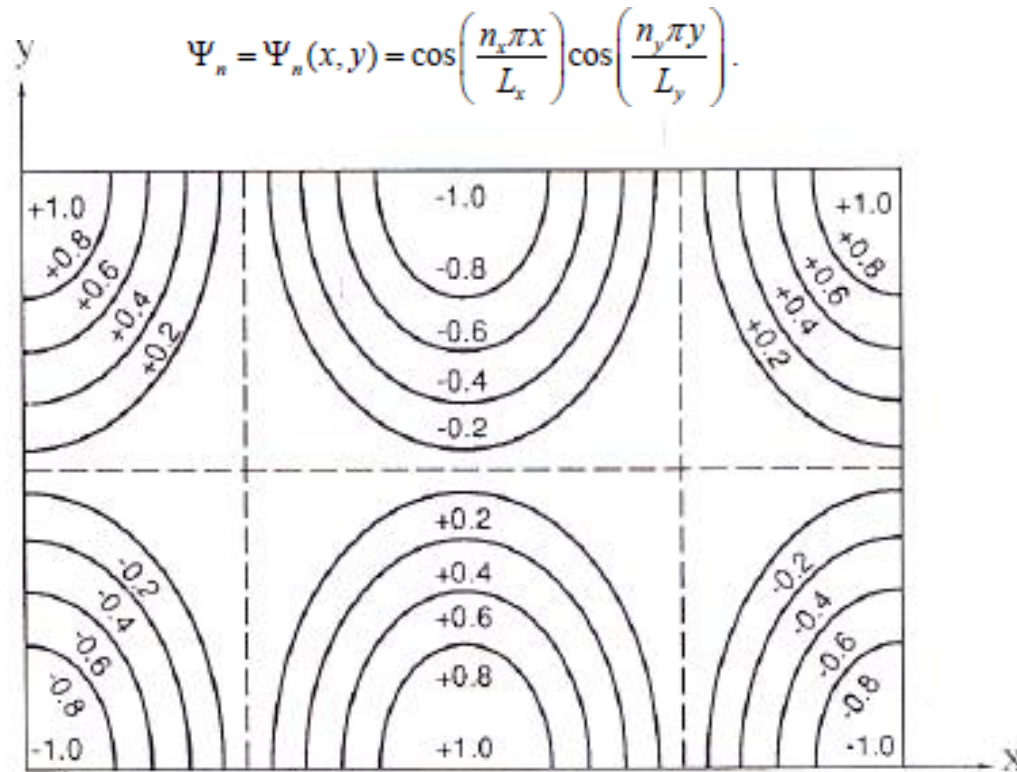
$$\cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) = 1$$



$$\cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) = 0$$



# Ισουψείς με πληροφορία φάσης



Σχήμα 4. Αναπαράσταση της (2,1,0) ιδιομορφής με ισοφασικές καμπύλες και με ακριβής απεικόνιση της φάσης.

# Χαρτογράφηση της φάσης σε μία ιδιομορφή

Είναι πολύ εύκολο να σχεδιάζουμε ένα διάγραμμα που να φανερώσει πως μεταβάλλεται η φάση για δεδομένη ιδιομορφή σε ένα ορθογώνιο χώρο. Αυτό μπορεί να γίνει ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- 1) Σχεδιάζουμε τις γραμμές ελαχίστης ταλάντωσης που αφορούν τη συγκεκριμένη ιδιομορφή, αυτό προφανώς θα χωρίσει το ορθογώνιο σε κάποιο αριθμό από μικρότερα ορθογώνια
- 2) Δίνουμε τα πρόσημα «+» ή «-» σε κάθε μικρό ορθογώνιο με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχουν ορθογώνια με το ίδιο πρόσημο εκατέρωθεν από την ίδια γραμμή ελαχίστης ταλάντωσης. Δεν έχει σημασία από ποιο πρόσημο θα ξεκινήσει κανείς.

# Χαρτογράφηση της φάσης σε μία ιδιομορφή

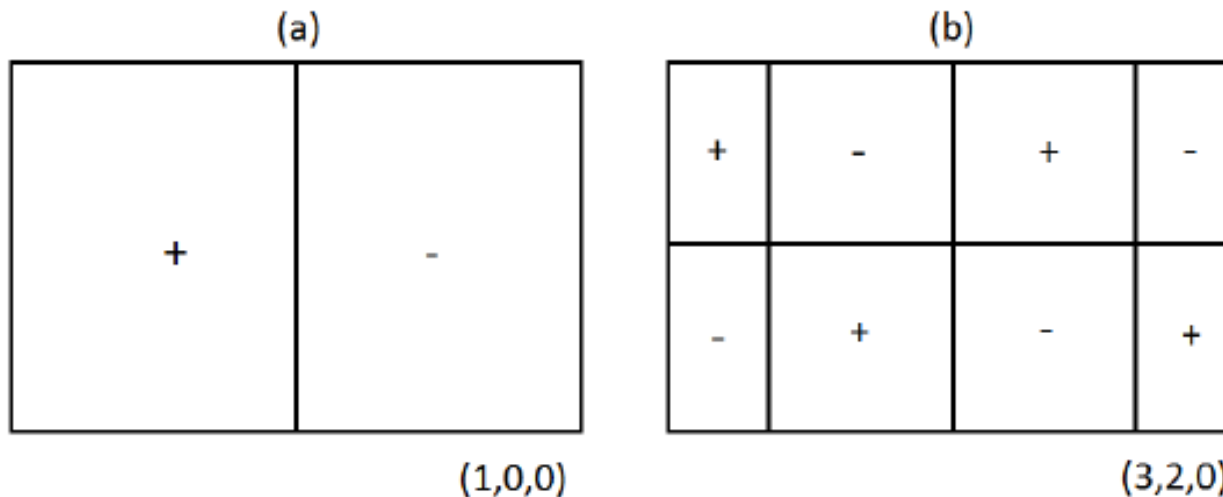
**Παράδειγμα:** Σχεδιάστε ένα χάρτη που να φανερώνει το πως μεταβάλλεται η φάση για την αξονική ιδιομορφή  $(1,0,0)$  και την εφαπτομενική ιδιομορφή  $(3,2,0)$ .



# Χαρτογράφηση της φάσης σε μία ιδιομορφή

**Παράδειγμα:** Σχεδιάστε ένα χάρτη που να φανερώνει το πως μεταβάλεται η φάση για την αξονική ιδιομορφή  $(1,0,0)$  και την εφαπτομενική ιδιομορφή  $(3,2,0)$ .

**Απάντηση:** Αξιοποιώντας τη μεθοδολογία που παρατίθεται σε προηγούμενες ενότητες, σχεδιάζουμε τις γραμμές ελαχίστης ταλάντωσης για την κάθε ιδιομορφή. Η  $(1,0,0)$  θα έχει μία γραμμή ελαχίστης ταλάντωσης κάθετη στον άξονα  $-x$ , και η  $(3,2,0)$  θα έχει 3 γραμμές ελαχίστης ταλάντωσης κάθετες στον άξονα  $-x$  και 2 γραμμές ελαχίστης ταλάντωσης κάθετες στον άξονα  $-y$ . Ακολουθώντας τον κανόνα για αλλαγή του προσήμου παίρνοντας από τις κομβικές γραμμές, συμπεραίνουμε με  $+$  και  $-$  το κάθε ορθογώνιο σύμφωνα με τα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 6. Διάγραμμα μεταβολής της φάσης σε ένα ορθογώνιο χώρο για την  $(1,0,0)$  ιδιομορφή στο (a) και την  $(3,2,0)$  ιδιομορφή στο (b).



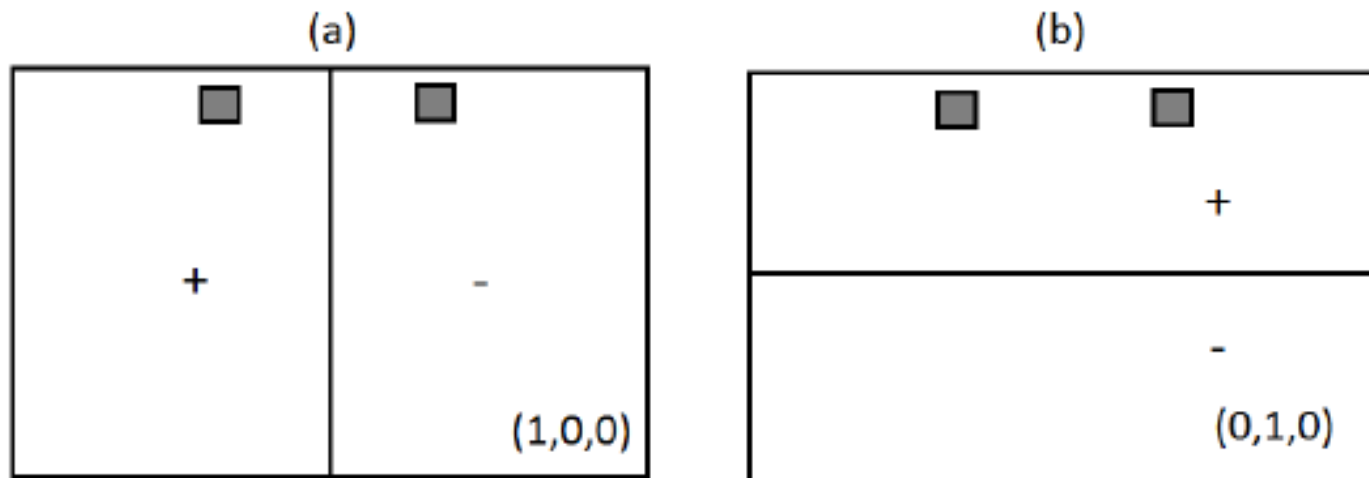
# Επίδραση της θέσης δύο ηχείων

**Παράδειγμα:** Δίνεται ένα δωμάτιο διαστάσεων  $L_x=6$ ,  $L_y=4$ ,  $L_z=2,8$  m. Εξετάζεται ένα σύστημα στερεοφωνικής αναπαραγωγής με δύο ίδια ηχεία τοποθετημένα στα σημεία  $(2, 3.5, 1.4)$  m και  $(4, 3.5, 1.4)$  m. Σχολιάστε το βαθμό που θα διεγείρεται κάθε μία από τις πρώτες αξονικές ιδιομορφές  $(1,0,0)$ ,  $(0,1,0)$  και  $(0,0,1)$ .

ΥΓ. Υποθέτουμε ότι τα δύο ηχεία είναι πανομοιότυπα και τροφοδοτούνται από την ίδια ηλεκτρική πηγή.

# Επίδραση της θέσης δύο ηχείων

**Παράδειγμα:** Δίνεται ένα δωμάτιο διαστάσεων  $L_x=6$ ,  $L_y=4$ ,  $L_z=2,8$  m. Εξετάζεται ένα σύστημα στερεοφωνικής αναπαραγωγής με δύο ίδια ηχεία τοποθετημένα στα σημεία  $(2, 3.5, 1.4)$  m και  $(4, 3.5, 1.4)$  m. Σχολιάστε το βαθμό που θα διεγείρεται κάθε μία από τις πρώτες αξονικές ιδιομορφές  $(1,0,0)$ ,  $(0,1,0)$  και  $(0,0,1)$ .



Σχήμα 7. Διάγραμμα μεταβολής της φάσης σε ένα ορθογώνιο χώρο για την  $(1,0,0)$  ιδιομορφή στο (a) και την  $(0,1,0)$  ιδιομορφή στο (b).

# Η κανονική συνάρτηση

$$\Psi_n(\mathbf{r}) = \Psi_n(x, y, z) = \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right)$$

Συντεταγμένες δέκτη:  $\mathbf{r}_\delta = (x_\delta, y_\delta, z_\delta)$

Συντεταγμένες ηχητικής πηγής:  $\mathbf{r}_\pi = (x_\pi, y_\pi, z_\pi)$

$\Psi_n(\mathbf{r}_\delta)$  Βαθμός ανίχνευσης της  $n$ -ιοστής ιδιομορφής στο ηχητικό πεδίο στη συγκεκριμένη θέση του δέκτη

$\Psi_n(\mathbf{r}_\pi)$  Βαθμός διέγερσης της  $n$ -ιοστής ιδιομορφής από την ηχητική πηγή στη συγκεκριμένη θέση

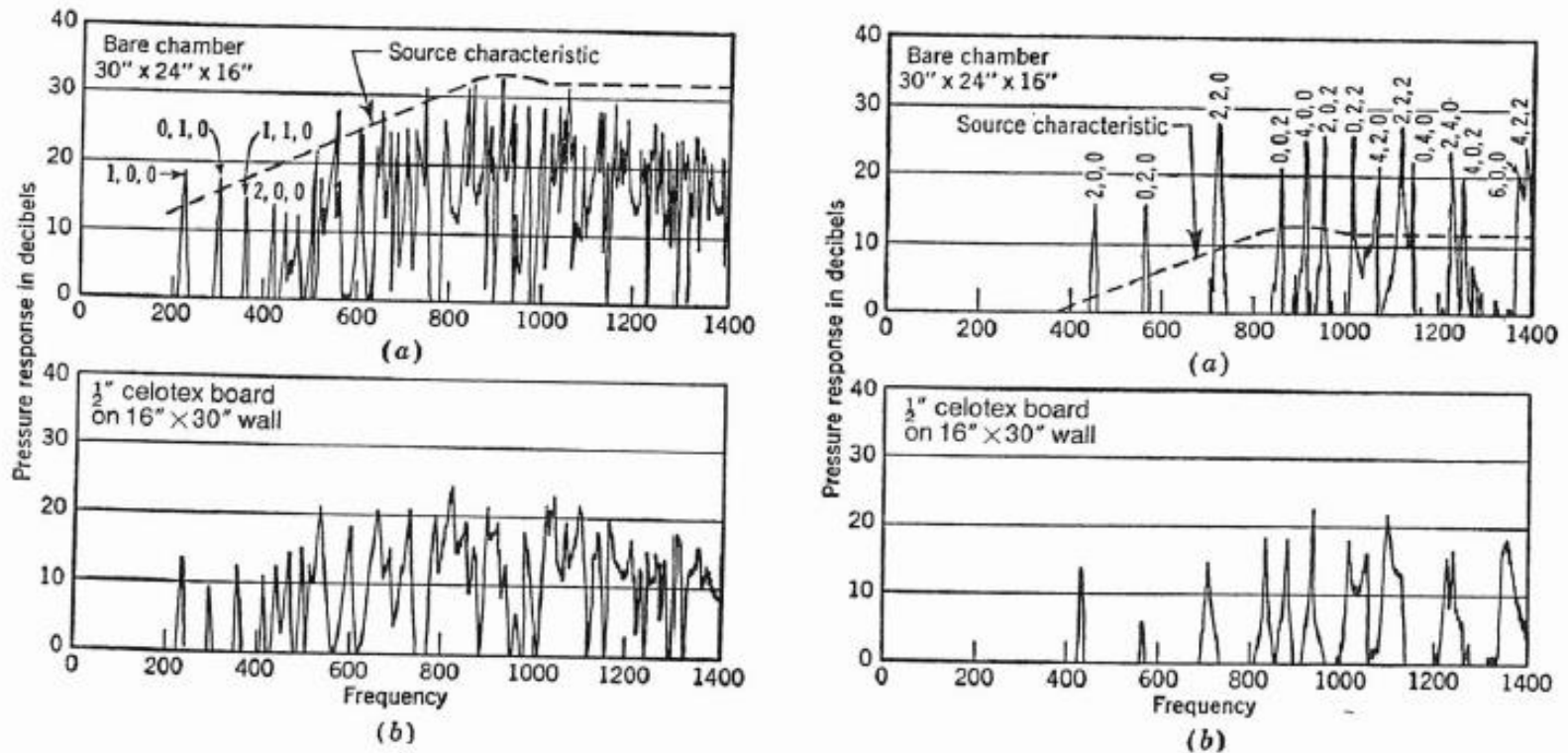
---

$\Psi_n(\mathbf{r}_\delta) \cdot \Psi_n(\mathbf{r}_\pi)$  Συνεισφορά της  $n$ -ιοστής ιδιομορφής στην ακουστική πίεση στη θέση του δέκτη λόγω τη μιας ηχητικής πηγής στη θέση  $\mathbf{r}_\pi$ .

# Άσκηση 2

- Έχουμε ένα ορθογώνιο δωμάτιο με διαστάσεις  $4 \times 5 \times 3$  m. Θεωρώντας ότι στην συχνότητα των 68 Hz το ηχητικό πεδίο περιγράφεται πλήρως από την ιδιομορφή  $(0, 2, 0)$ , υπολογίστε τη διαφορά στη στάθμη της ακουστικής πίεσης κατά τη μετακίνηση του δέκτη από τη θέση  $(1.2, 1.2, 0.1)$  m στη θέση  $(0.3, 0.3, 2)$  m. Δίνεται η ταχύτητα του ήχου ίση με 340 m/sec.

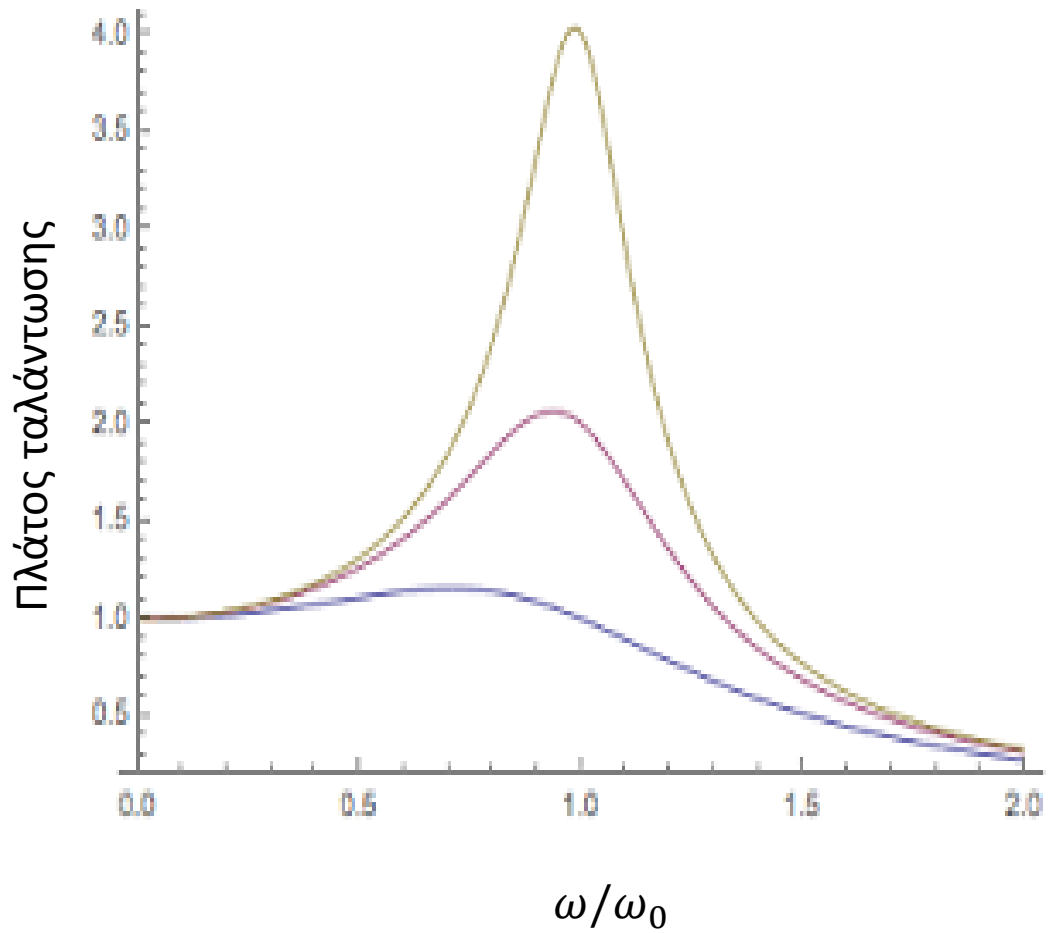
# Σημασία της θέσης της πηγής



Σχήμα 5. Συχνотική απόκριση σε τρισδιάστατο ορθογώνιο δωμάτιο για ένα δέκτη τοποθετημένο σε γωνία του δωματίου. Στη μία περίπτωση η πηγή τοποθετείται στην απέναντι γωνία (αριστερά διαγράμματα) και στην άλλη, στο κέντρο του δωματίου (δεξιά διαγράμματα).

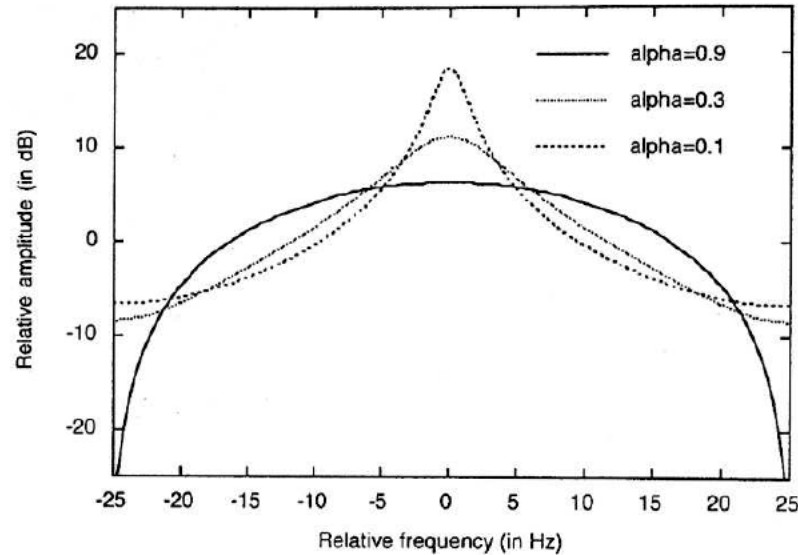
# Συντονισμός

Η οξύτητα (sharpness) του συντονισμού εξαρτάται από το λόγο  $\frac{Rm}{m}$ . Όσο πιο μικρός ο λόγος, τόσο πιο οξύς ο συντονισμός.



# Επίδραση της απορρόφησης στο συντονισμό

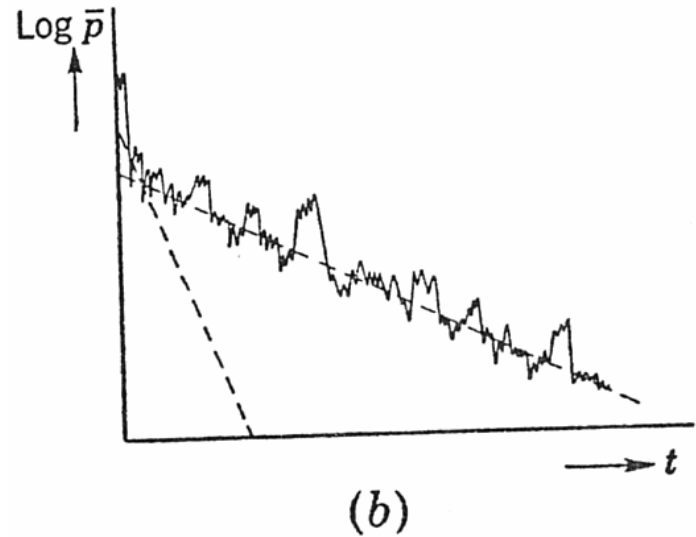
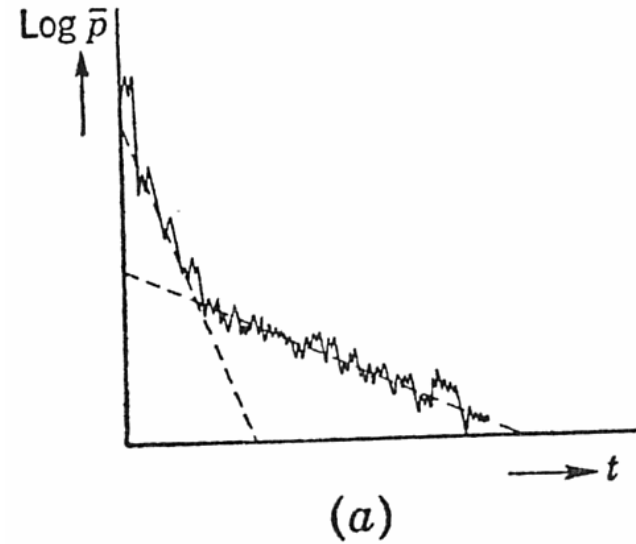
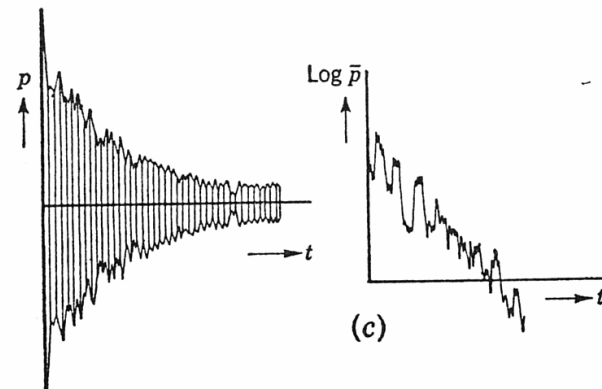
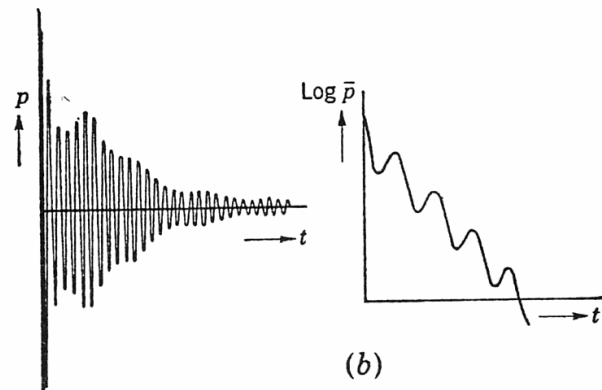
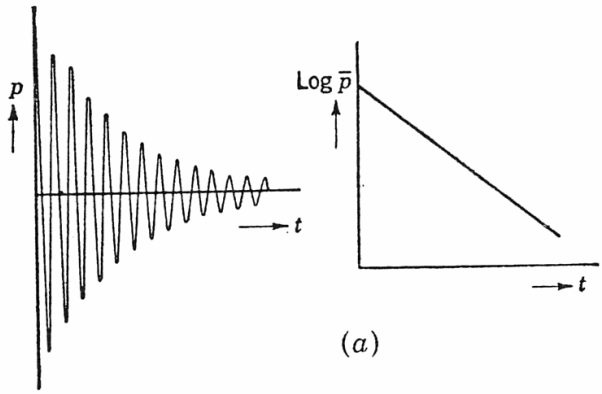
Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος αντήχησης ή όσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση (για τη συγκεκριμένη συχνότητα), τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης του συντονισμού. Αυτό σημαίνει ότι γειτονικοί τρόποι δόνησης έχουν την τάση να υπερκαλύπτονται σε δωμάτιο με μικρό χρόνο αντήχησης.



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

$$\frac{1}{2\omega_n \zeta_n + j(\omega^2 - \omega_n^2)},$$

# Ρυθμοί μείωσης στάσιμων κυμάτων

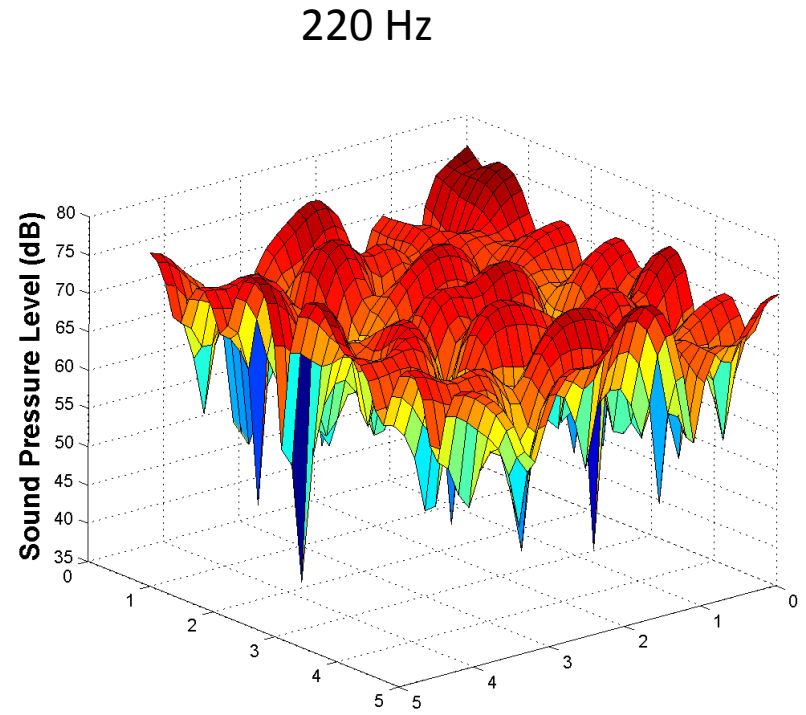
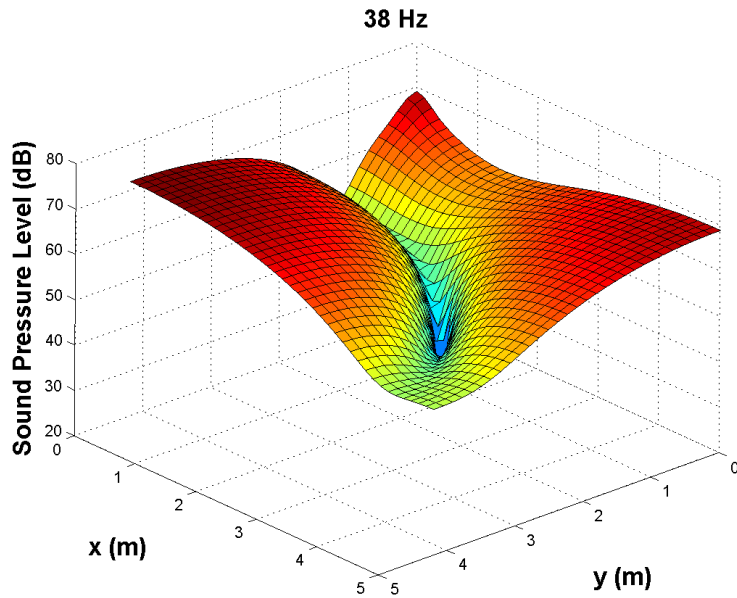




# Από τις ιδιομορφές στο ηχητικό πεδίο

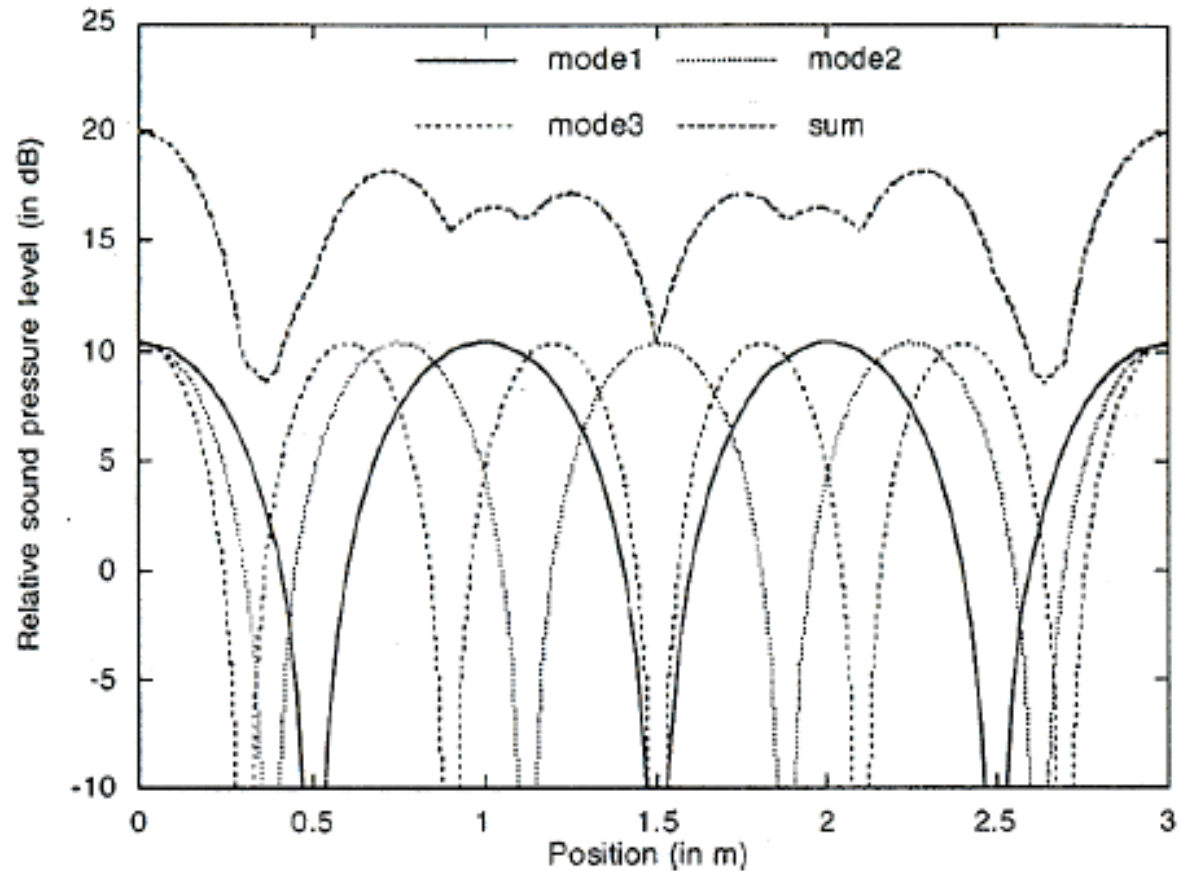
- Όταν η συχνότητα διέγερσης συμπίπτει με μία ιδιοσυχνότητα, τότε οι διακυμάνσεις του ηχητικού πεδίου περιγράφονται με πολύ καλή προσέγγιση από τη συγκεκριμένη ιδιομορφή.
- Όταν η συχνότητα διέγερσης δε συμπίπτει με κάποια ιδιοσυχνότητα, τότε οι διακυμάνσεις του ηχητικού πεδίου περιγράφονται από την υπέρθεση πολλών «γειτονικών» ιδιομορφών.

# Διακύμανση της πίεσης για τυχαίες συχνότητες



$L_x=5, L_y=4.2, L_z=0.2$

# Οι τρόποι ταλάντωσης υπερτίθενται!



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

# Υπολογισμός του ηχητικού πεδίου με τη μέθοδο άθροισης των ιδιομορφών

$$p(\omega, \mathbf{r}_{\text{πηγή}}, \mathbf{r}_{\text{δέκτη}}) = \rho c^2 \frac{q\omega}{V} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\Psi_n(\mathbf{r}_{\text{πηγή}})\Psi_n(\mathbf{r}_{\text{δέκτη}})}{2\omega_n \zeta_n + j(\omega^2 - \omega_n^2)},$$

$$\Psi_n = \Psi_n(x, y, z) = \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right)$$

$\mathbf{r}_{\text{πηγή}}$ : Συντεταγμένες της πηγής (x, y, z)

$\mathbf{r}_{\text{δέκτη}}$ : Συντεταγμένες του δέκτη (x, y, z)

$q$ : ηχητική δύναμη της πηγής

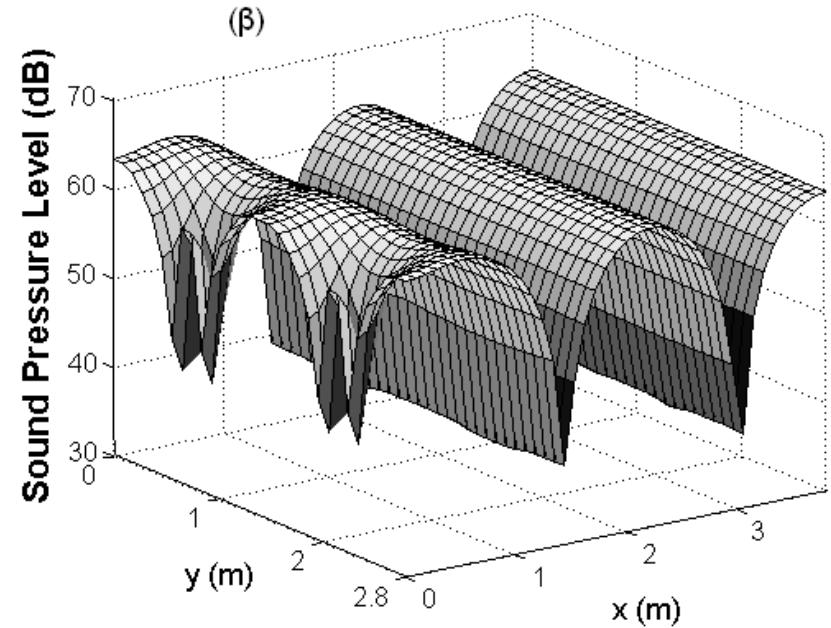
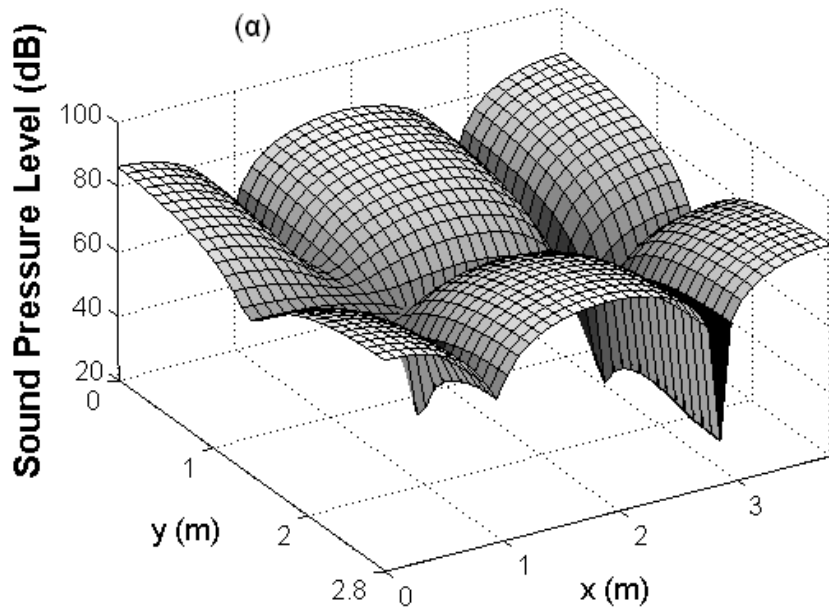
$\omega_n$ : γωνιακή συχνότητα της ιδιομορφής

$\omega$ : η συχνότητα της πηγής

$\zeta_n$ : η απόσβεση του  $n$ -ιστού στάσιμου κύματος

$A_n$ : παράγοντας κλίμακας του  $n$ -ιστού στάσιμου κύματος

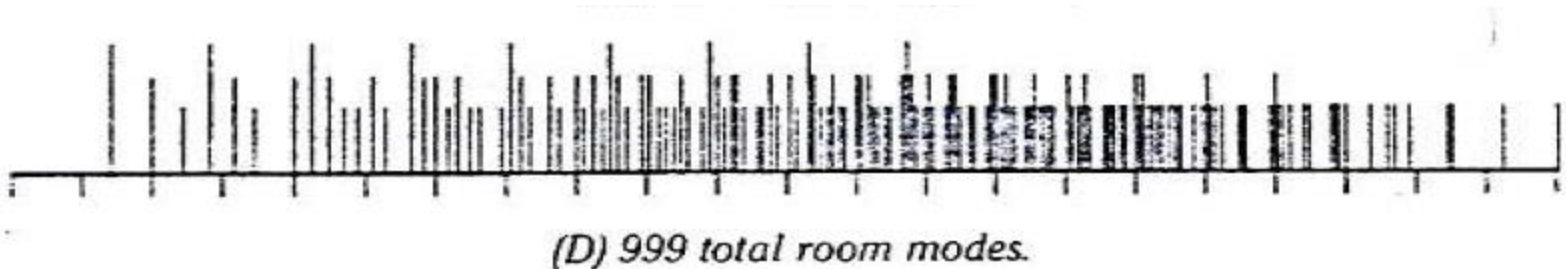
# Μορφοποίηση ηχητικού πεδίου με κατάλληλη τοποθέτηση πηγών



# Εργασία 6 (1/2)

- 1) Φτιάξτε κώδικα στην Python ο οποίος να υπολογίζει όλες τις ιδιοσυχνότητες ενός ορθογώνιου δωματίου μέχρι μια μέγιστη συχνότητα  $f_{max}$ , συναρτήσει των διαστάσεων του δωματίου  $L_x, L_y, L_z$  και της ταχύτητας του ήχου  $c=343$  m/s. Θεωρώντας ότι οι αξονικές ιδιομορφές είναι 3 dB ισχυρότερες από τις εφαπτομενικές και οι τελευταίες 3 dB ισχυρότερες από τις πλάγιες, ο κώδικας να απεικονίζει τις ιδιοσυχνότητες όπως και το παρακάτω διάγραμμα. Κάντε μια εφαρμογή για «κακές» και μία για «καλές» διαστάσεις ορθογωνίου δωματίου λαμβάνοντας ως σταθερό το ύψος  $L_z=3$ m. Στην αναφορά σας παραθέστε τα σχετικά διαγράμματα και εξηγήστε τις ποιοτικές διαφορές ανάμεσα στα δύο δωμάτια.

Για τα διαγράμματα προτείνεται η χρήση της εντολής «stem», ενώ για την ταξινόμηση των συχνοτήτων η χρήση της εντολής «sort».



# Εργασία 6 (2/2)

Σε ένα δισδιάστατο ορθογώνιο δωμάτιο διαστάσεων  $L_x$ ,  $L_y$  τα δύο ηχεία μια στερεοφωνικής εγκατάστασης τοποθετούνται στις θέσεις

- 1)  $(0,0)$  και  $(0,L_y)$
- 2)  $(0, L_y/4)$  και  $(0,3L_y/4)$

Εξηγείστε με βάση υπολογιστικό (Python) ή θεωρητικό (μαθηματικά) τρόπο, ποιες από τις  $-y$  αξονικές ιδιομορφές  $(0, n_y)$  θα διεγείρονται, ποιες όχι, και γιατί.

ΥΓ1. Υποθέτουμε ότι τα δύο ηχεία είναι πανομοιότυπα και τροφοδοτούνται από την ίδια ηλεκτρική πηγή.

ΥΓ2. Υποθέστε ότι η επίδραση δύο ηχείων σε θέσεις  $\mathbf{r}_1 = (x_1, y_1, z_1)$  και  $\mathbf{r}_2 = (x_2, y_2, z_2)$  στη  $n$ -ιοστή ιδιομορφή δίνεται από το άθροισμα

$$\Psi_n(x_1, y_1, z_1) + \Psi_n(x_2, y_2, z_2)$$