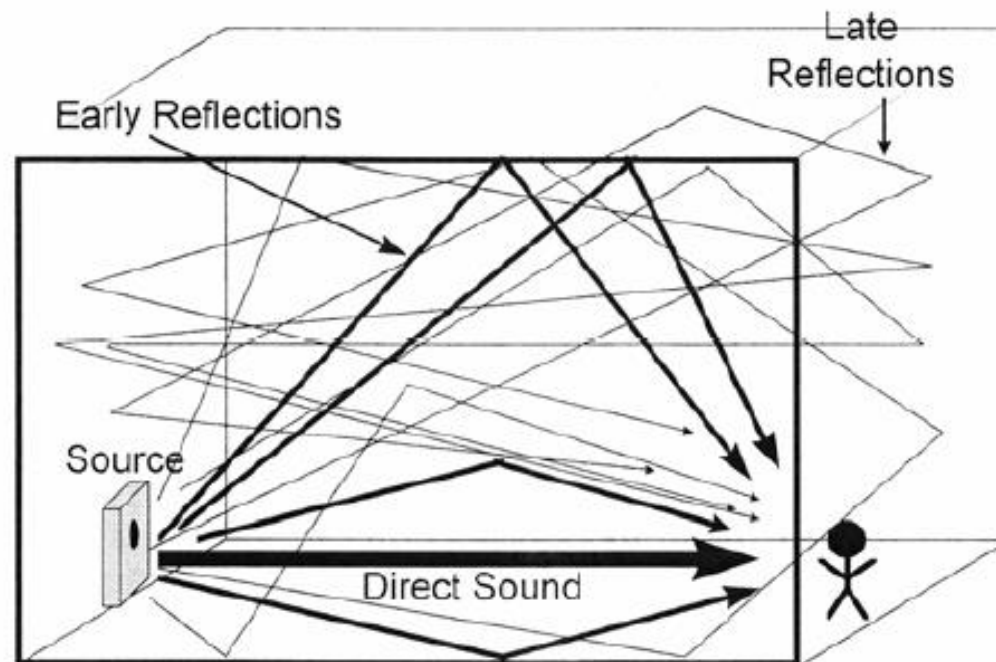


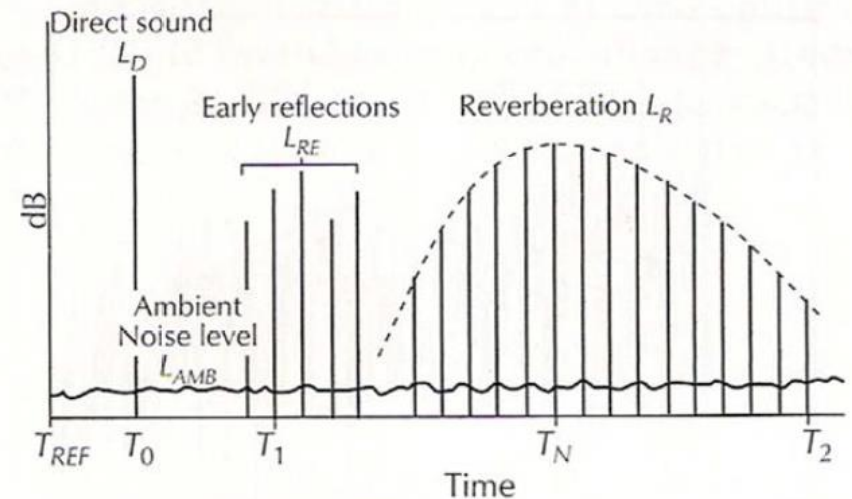
Μεγάλοι κλειστοί χώροι



Σχήμα 3.14: Αναπαράσταση της δημιουργίας αντήχησης σε ένα κλειστό χώρο

Συνιστώσες του ήχου σε «μεγάλους» κλειστούς χώρους

- Απευθείας ήχος (direct sound)
- Πρώτες ανακλάσεις (early reflections)
 $\Delta\tau < 80$ ms
- Αντηχητική συνιστώσα (reverberation)
 - Αντηχητικό πεδίο ή διάχυτο πεδίο
 - Ανακλώμενος ήχος



$T_0 - T_{REF} =$ Signal travel time to observer (D_0)

$T_1 - T_0 =$ Initial Time Delay (ITD) gap

$T_N - T_{REF} =$ Natural room delay

$T_2 - T_1 =$ 3-D measurement limits (variable from T_{REF} to T_2)

$$p_{ολ}^2 = p_{απ}^2 + p_{αν}^2$$

Απευθείας ήχος ή
απευθείας συνιστώσα του
ήχου

ανακλώμενος/διάχυτος ήχος ή
αντηχητική/ανακλώμενη/διάχυτη
συνιστώσα του ήχου

Το τέλειο αντηχητικό πεδίο

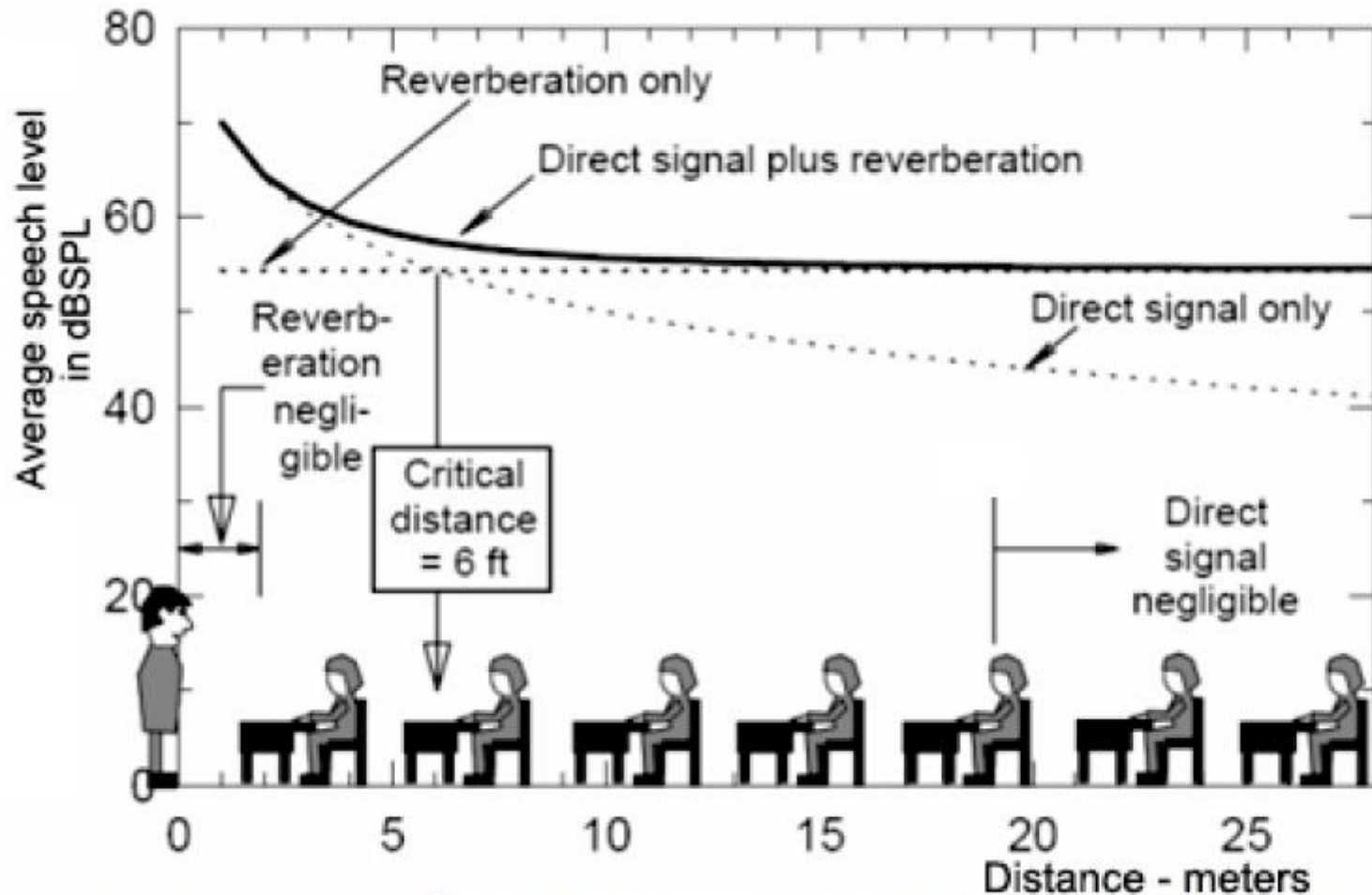
Το πεδίο που δημιουργείται από την υπέρθεση απείρου πλήθους επιπέδων ηχητικών κυμάτων που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια πιθανότητα

- Σταθερή πυκνότητα ενέργειας (στάθμη παντού ίδια)
- Οι εξασθενήσεις είναι τέλεια εκθετικές
- Χρόνος αντήχησης παντού το ίδιο
- Χαρακτήρας της εξασθένησης ανεξαρτητος από τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά του μικροφώνου
- Μετρούμενη στάθμη του ανακλώμενου ήχου ανεξάρτητη από τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά του μικροφώνου
- Ο απευθείας ήχος και ο ανακλώμενος ήχος είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους

Συνθήκες για να έχουμε αντηχητικό πεδίο

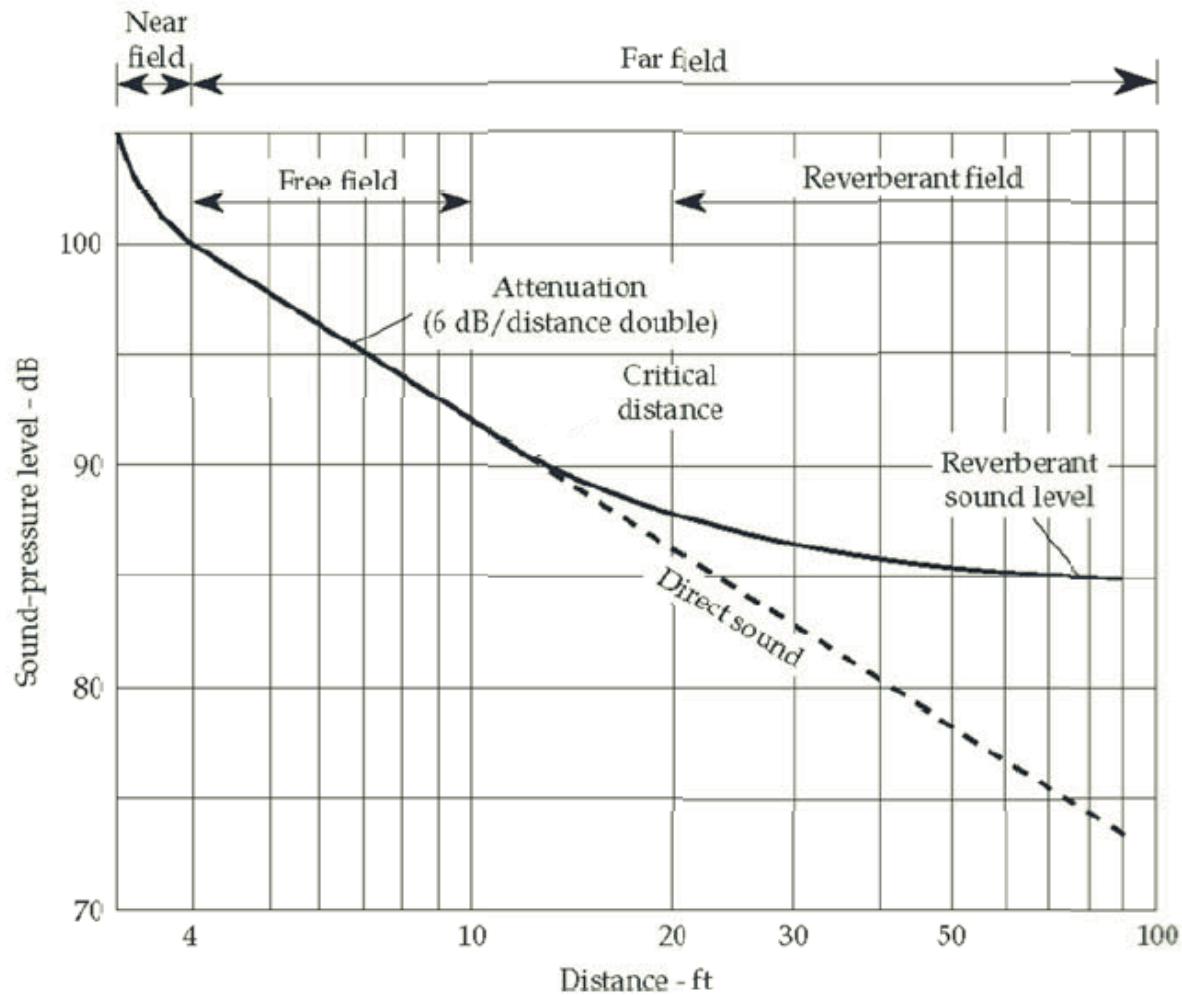
- Ο χώρος έχει ακανόνιστο σχήμα (irregularly shaped)
- Οι διαστάσεις του χώρου είναι σχετικά μεγάλες σε σχέση με το μήκος κύματος που μελετάμε
- Δεν έχουμε κάποια διάσταση του χώρου δυσανάλογα μεγάλη σε σχέση με τις άλλες
- Ο συντελεστής απορρόφησης των τοιχωμάτων είναι σχετικά μικρός ($\alpha < 0.3$) και ομοιόμορφα κατανεμημένος

Κρίσιμη απόσταση



Σχήμα 12. Λόγος απευθείας ήχου / αντηχητικού πεδίου σε αίθουσα διδασκαλίας

Απευθείας + ανακλώμενος ήχος



Ηχητικά παραδείγματα σε αίθουσα με

$$RT_{60} = 1.2 \text{ s}$$

- Δέκτης κοντά στην πηγή ($D=0.21 \text{ m}$):



- Δέκτης σε μέτρια απόσταση από την πηγή ($D=1.1 \text{ m}$):



- Δέκτης σε μακριά από την πηγή ($D=3.4 \text{ m}$):



Αναλογίες μεταξύ επιθυμητών και ανεπιθύμητων συνιστωσών

- Signal to Noise Ratio (SNR) = λόγος σήματος προς θόρυβο
- Direct to Reverberant Ratio (DDR) = λόγος απευθείας ήχου προς ανακλώμενο

Άσκηση 0

Για την οκτάβα των 1000 Hz σε ένα χώρο η κρίσιμη απόσταση μπροστά από ένα ηχείο είναι

$D_c=2$ m. Σε ποια απόσταση θα έχω

- 1) DRR=6 dB
- 2) DRR=-6 dB
- 3) DRR=4 dB

Μεταβολές καταστάσεων

- Κατάσταση 1:
 - Στάθμη L_1 ,
 - ισχύς W_1 ,
 - απόσταση r_1 ,
 - γωνία θ_1
- Κατάσταση 2:
 - Στάθμη L_2 ,
 - ισχύς W_2 ,
 - απόσταση r_2 ,
 - γωνία θ_2

Γενικός τύπος για το ελεύθερο πεδίο (απευθείας ήχος):

$$L_2 - L_1 = 20 \log \frac{r_1}{r_2} + 10 \log \frac{W_2}{W_1} + D(\theta_2) - D(\theta_1)$$

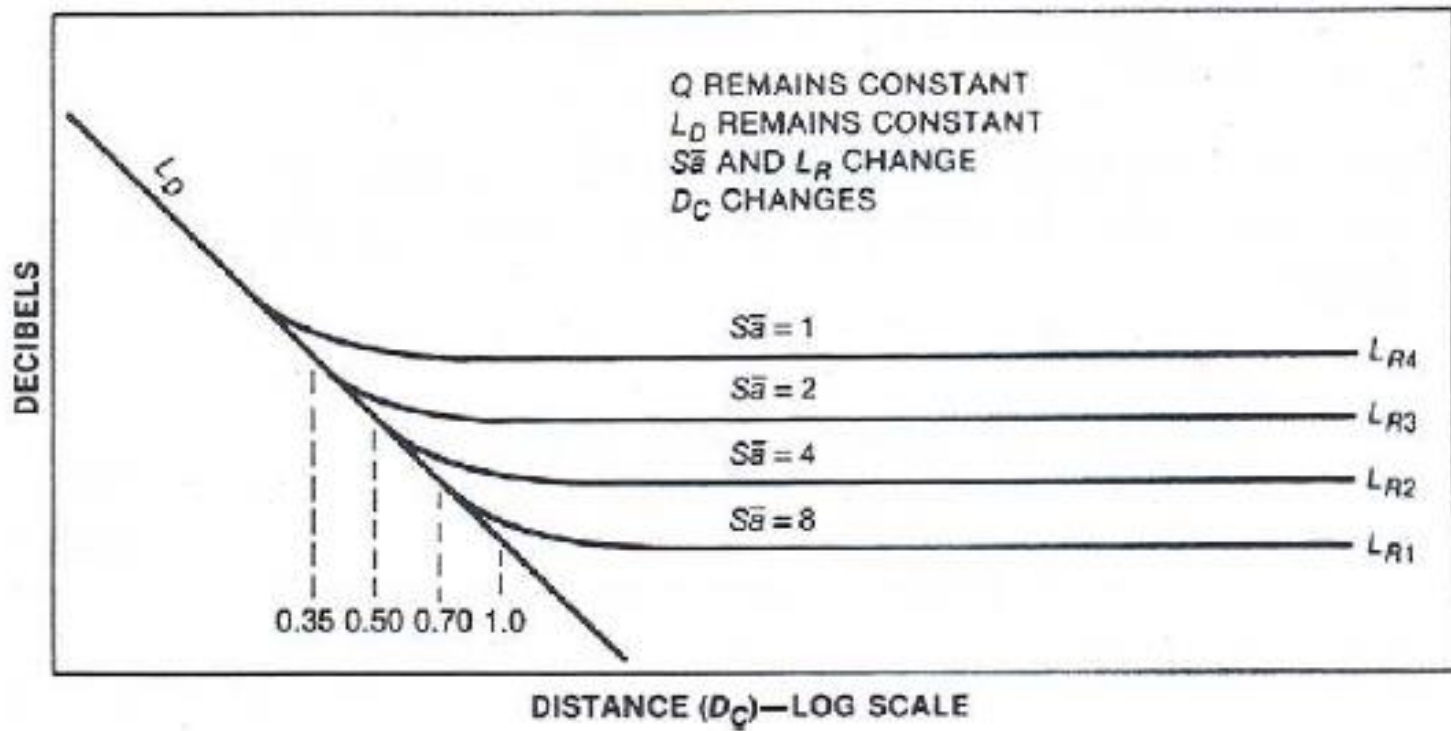
Γενικός τύπος για την αντηχητική συνιστώσα του ήχου (ανακλώμενος):

$$L_2 - L_1 = 10 \log \frac{W_2}{W_1}$$

Τι μπορώ να κάνω για να αυξήσω το λόγο απευθείας ήχου προς ανακλώμενο σε μία συγκεκριμένη θέση στο χώρο?

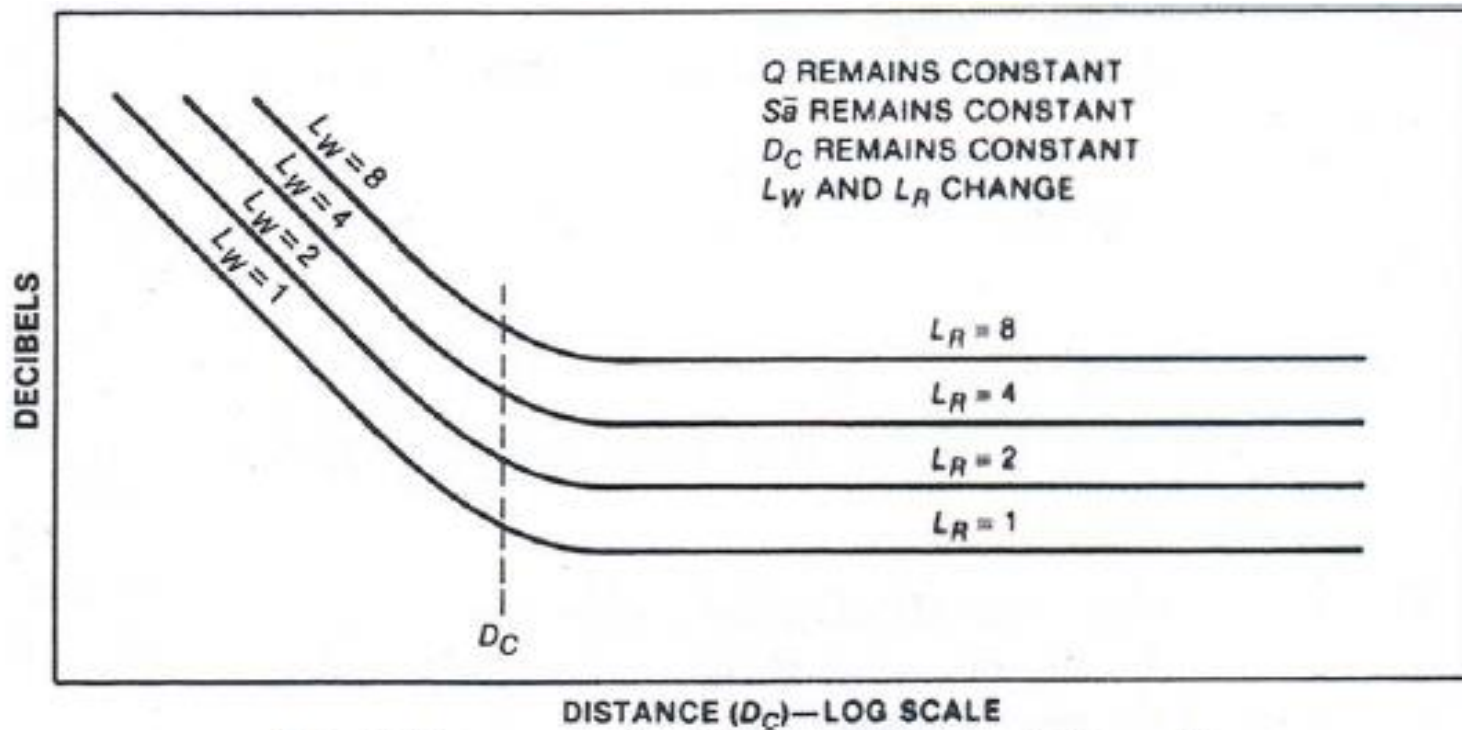
Να βάλω περισσότερη ηχο-απορρόφηση στο χώρο	
Να αυξήσω την ισχύ της πηγής	
Να φέρω την πηγή πιο κοντά στη θέση ακρόασης	
Να αυξήσω την κατευθυντικότητα της πηγής	

Μεταβολή της συνολικής απορρόφησης



Σχήμα 10. Μεταβολή κρίσιμης απόστασης D_C για διαφορετικά R ($S \cdot \bar{a}$) [1]

Μεταβολή της ισχύος

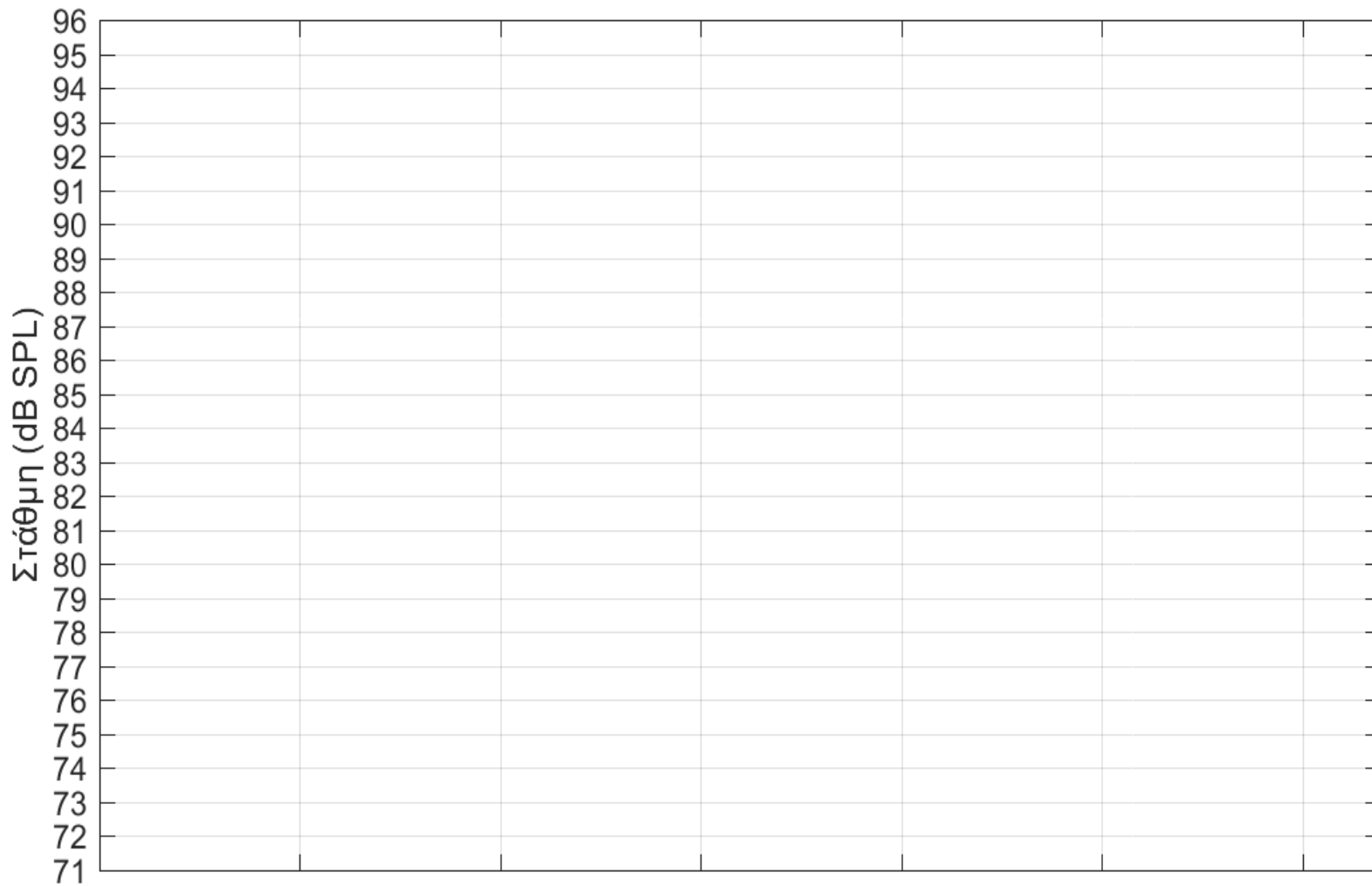


Σχήμα 11. Αύξηση της ηχητικής στάθμης που εκπέμπει η πηγή. (L_W)_{πηγής} [1]

Άσκηση 1

Θέμα 3^ο: Η στάθμη του ανακλώμενου ήχου σε ένα μεγάλο κλειστό χώρο είναι 80 dB SPL. Επίσης, η στάθμη του απευθείας ήχου σε απόσταση 0.4 m από την πηγή είναι 92 dB SPL.

- 1) Χρησιμοποιώντας το παρακάτω διάγραμμα, χαράξτε τις καμπύλες με τη θεωρητική μεταβολή του **απευθείας ήχου**, του **ανακλώμενου ήχου** και του **συνολικού ήχου συναρτήσει** της απόστασης, δίνοντας και τιμές για την απόσταση (σε m) πάνω στο διάγραμμα.
- 2) Με βάση το διάγραμμα που φτιάξατε, υπολογίστε την κρίσιμη απόσταση (D_c) αιτιολογώντας την απάντησή σας.



Απόσταση (λογαριθμική κλίμακα)

Άσκηση 2:

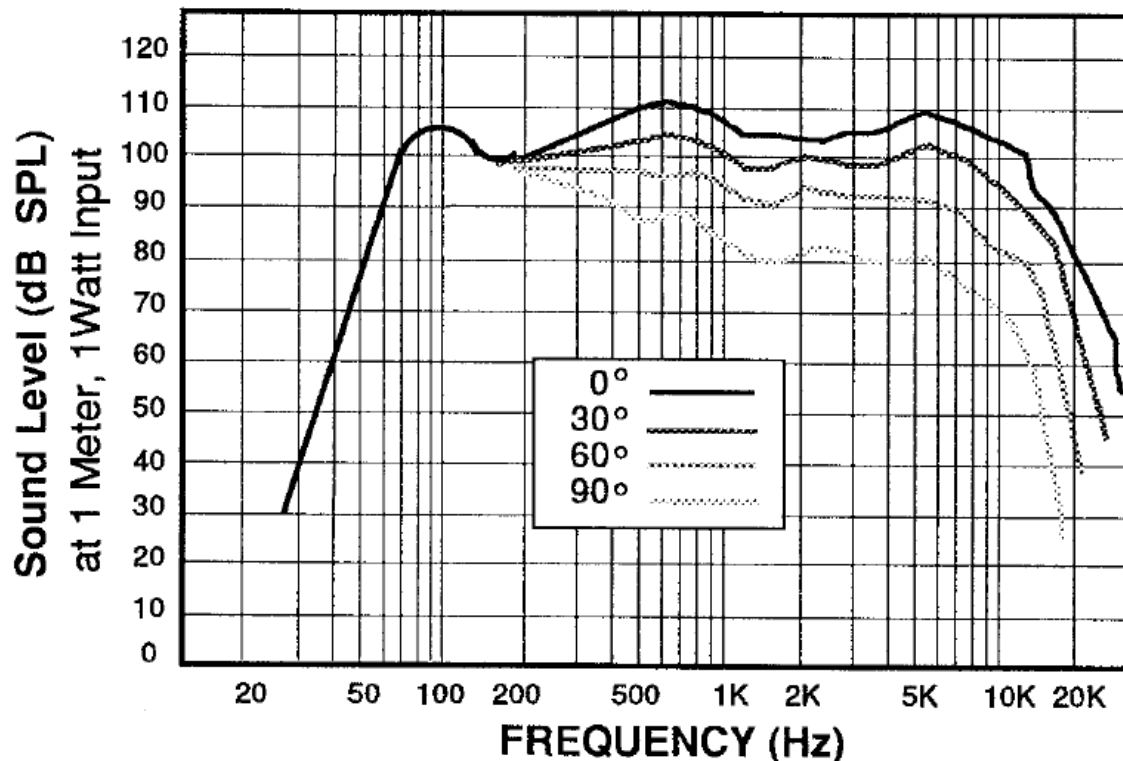
- Μια πηγή έχει ευαισθησία “90 dB SPL at 1 m and 1 Watt RMS” και κατά την τοποθέτησή της σε κλειστό χώρο η κρίσιμη απόσταση έχει μετρηθεί $D_c=4$ m.
- 1) Πόση είναι η στάθμη του αντηχητικού πεδίου αν η πηγή δουλεύει στα 1 Watt RMS?
 - 2) πόση είναι η στάθμη του αντηχητικού πεδίου αν η πηγή δουλεύει στα 100 Watt RMS?
 - 3) Να υπολογιστεί η στάθμη του απευθείας ήχου, του ανακλώμενου ήχου και η συνολική στάθμη στα 6 m από την πηγή όταν δουλεύει στα 100 Watt RMS.

Άσκηση 3:

Για το ηχείο με την παρακάτω απόκριση συχνότητας, μετρήθηκε η κρίσιμη απόσταση πάνω στον άξονα και βρέθηκε ίση με 4 m στα 500 Hz.

1) Να εκτιμηθεί η διαφορά μεταξύ της στάθμης του απευθείας και του ανακλώμενου ήχου στα 4 m απόσταση για γωνία $\theta=90^\circ$ σε σχέση με τον κεντρικό άξονα. (Θεωρείστε συνθήκες τέλει αντηχητικού πεδίου).

2) Να εκτιμηθεί η διαφορά μεταξύ της στάθμης του απευθείας και του ανακλώμενου ήχου στα 10 m απόσταση για γωνία $\theta=90^\circ$



Άσκηση 4:

- Σε ένα χώρο όπου επικρατούν συνθήκες διάχυτου ηχητικού πεδίου, μετρήσαμε την κρίσιμη απόσταση για μία ηχητική πηγή και τη βρήκαμε ίση με $D_{c,1}=4$ m.
- 1) Τι θα συμβεί στην κρίσιμη απόσταση μετρούμενη από το συγκεκριμένο ηχείο αν στον ίδιο χώρο λειτουργήσουνε άλλα 3 πανομοιότυπα ηχεία? Θα μειωθεί, θα αυξηθεί, ή θα παραμείνει σταθερή?
- 2) Αν μεταβληθεί, πόσο εκτιμάτε ότι θα είναι η καινούρια κρίσιμη απόσταση?

Θεωρείστε ότι τα ηχεία συνδέονται σε κοινή ηλεκτρική πηγή και τοποθετούνται μακριά το ένα από το άλλο έτσι ώστε η λειτουργία του ενός να μην επηρεάζει τον απευθείας ήχο του άλλου.

Παράγοντας κατευθυντικότητας ($Q(f)$)

- Είναι ο λόγος της ακουστικής έντασης πάνω σε ένα συγκεκριμένο άξονα και απόσταση από μια ηχητική πηγή, προς την τιμή της ακουστικής έντασης που θα μετρούσαμε πάνω στον ίδιο άξονα και απόσταση αν η ηχητική πηγή ήταν πανκατευθυντική (και δεν άλλαζε η ισχύ της).
- Δείκτης κατευθυντικότητας (directivity index – DI)

$$DI(f) = 10 \log_{10} Q(f)$$

Από φυλλάδιο εργαστηρίου

- Ο παράγοντας κατευθυντικότητας, Q , είναι αδιάστατο μέγεθος, ορίζεται πάντα για ένα σημείο και δίνεται από το λόγο της έντασης σε αυτό το συγκεκριμένο σημείο συγκεκριμένης απόστασης και διεύθυνσης από την πηγή (I_d) προς τη μέση τιμή της έντασης από όλες τις διευθύνσεις (I_0).

$$Q = \frac{I_d}{I_0} \quad (12)$$

Εξ' ορισμού η μέση τιμή του Q προς όλες τις διευθύνσεις γύρω από την πηγή είναι ίση με τη μονάδα, 1.

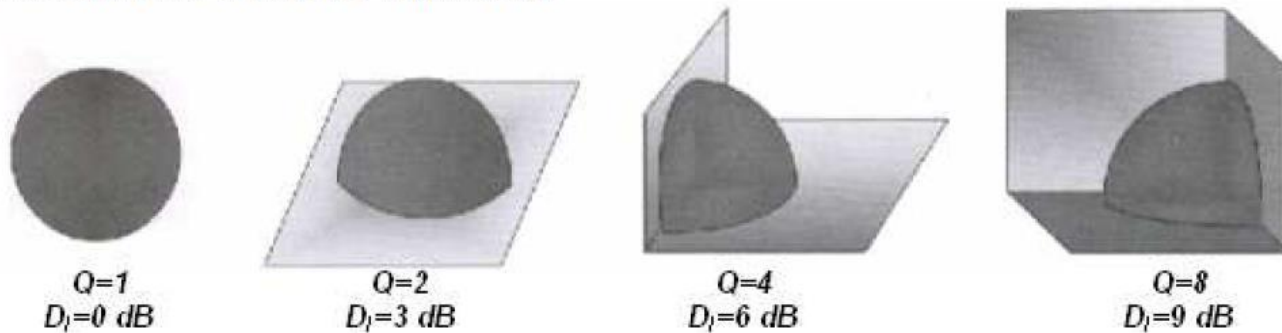
- Ο δείκτης κατευθυντικότητας, D_I , ορίζεται από τον παράγοντα κατευθυντικότητας Q ως:

$$D_I = 10 \cdot \log Q \quad (13) \Leftrightarrow D_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I_d}{I_0}\right), \text{ σε } dB.$$

Μία ισότροπη πηγή, δηλαδή μια πηγή που εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω της, σε ελεύθερο πεδίο (δηλαδή σε χώρο μακριά από ανακλαστικές επιφάνειες) έχει σταθερό παράγοντα κατευθυντικότητας, $Q = 1$, παντού.

Παράγοντας κατευθυντικότητας για διαφορετικούς τρόπους τοποθέτησης ηχείου

Παρακάτω φαίνονται οι διάφορες περιπτώσεις:

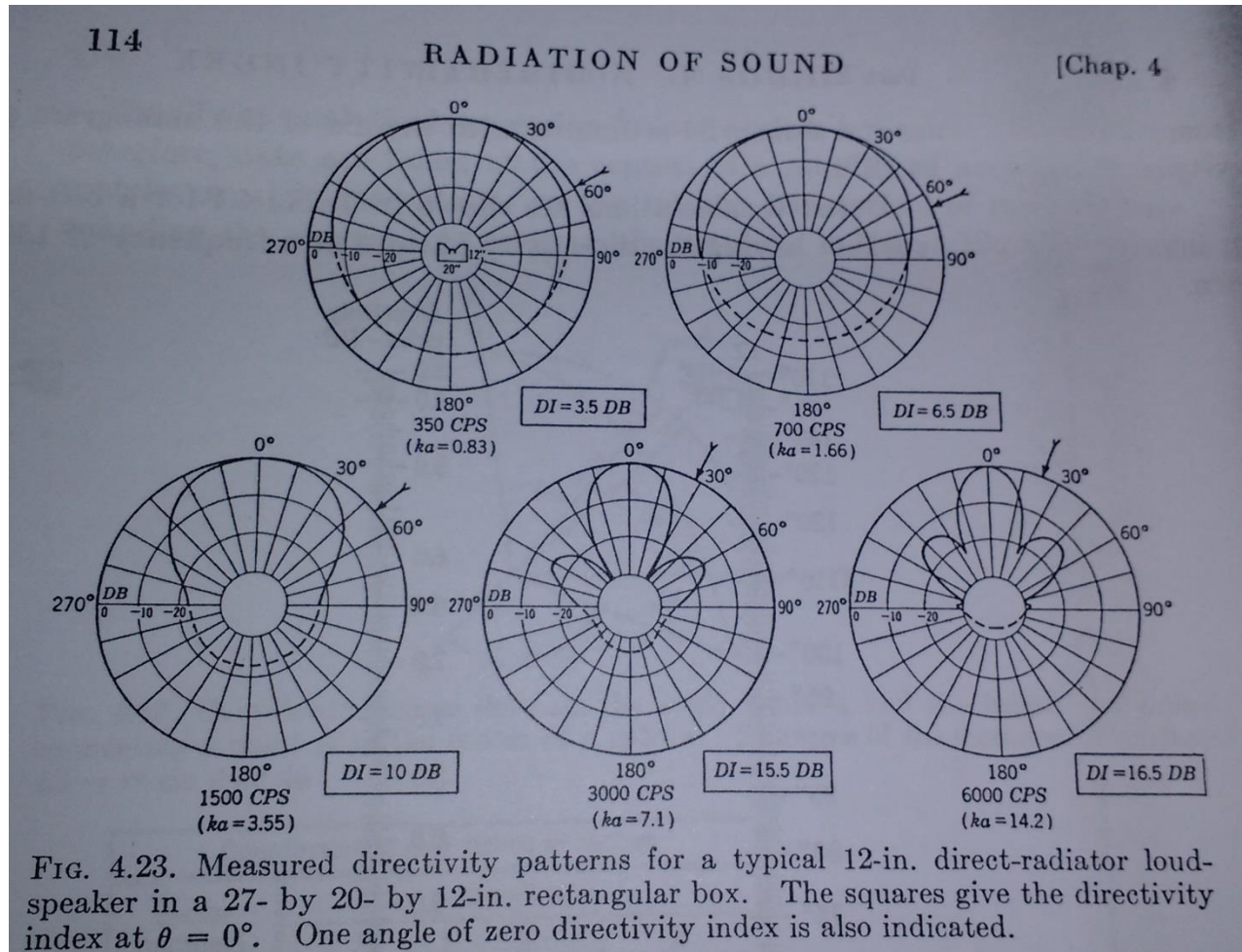


Σχήμα 5. Παράγοντας κατευθυντικότητας πηγής, Q , σύμφωνα με την τοποθέτηση [5]

Θέση πηγής	Παράγοντας κατευθυντικότητας	Δείκτης Κατευθυντικότητας (dB)	
Ελεύθερο πεδίο	1	0	$L = L_p$
Σε επίπεδη επιφάνεια	2	3	$L = L_p + 3$ dB
Στη γωνία 2 επιφανειών	4	6	$L = L_p + 6$ dB
Στη γωνία 3 επιφανειών	8	9	$L = L_p + 9$ dB

Πίνακας 1. Παράγοντας, Q , & δείκτης, D_i , κατευθυντικότητας πηγής ανάλογα με τη θέση της [2]

Κατευθυντικότητα ηχείου



DI με τη συχνότητα

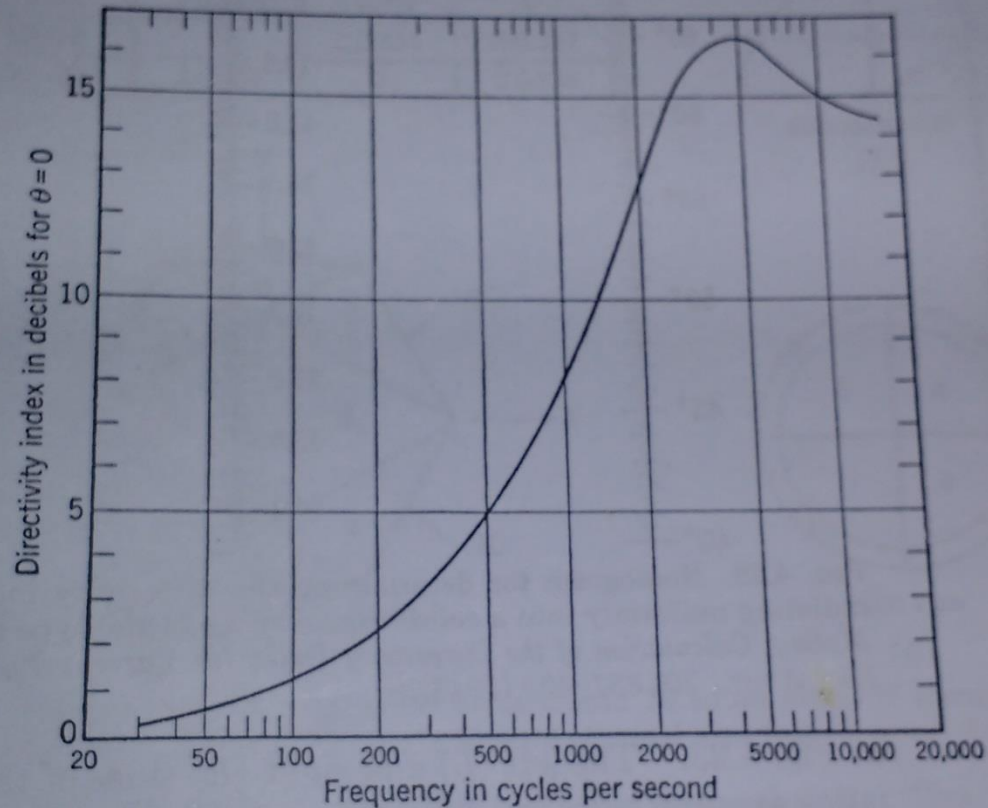


FIG. 4.24. Directivity indexes for 0° axes of the directivity patterns of Fig. 4.23 computed as though the source were symmetrical about the 0° axis. The data apply to a typical 12-in. direct-radiator loudspeaker mounted in a 27- by 20- by 12-in. rectangular box.

Θεωρητικός υπολογισμός του Lap, Lan και του Dc

Θεωρητικός υπολογισμός του L_p , L_{av} και του D_c

Είναι σημαντικό να μπορούμε να υπολογίσουμε τη στάθμη έντασης L_p μέσα σε ένα μεγάλο χώρο. Υπενθυμίζεται ότι για συνθήκες ελεύθερου πεδίου (free field) ισχύει ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου στη μεταβολή της στάθμης L_D και η εξίσωση που υπολογίζει τη στάθμη του ελεύθερου πεδίου:

$$L_D = L_W + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (7.12)$$

Η εξίσωση που περιγράφει τη στάθμη ηχητικής πίεσης του αντηχητικού πεδίου μέσα σε ένα μεγάλο χώρο είναι:

$$L_R = L_W + 10 \log \frac{4}{S\bar{a}} \quad (7.13)$$

Άσκηση Κ1:

- Δωμάτιο με διαστάσεις 5 x 10 x 3.5 m περιλαμβάνει ισοτροπική ηχητική πηγή ισχύος 10 μW στην συχνότητα των 1000 Hz, τοποθετημένη στο κέντρο της ακμής του τοίχου των 5 m. Αν οι συντελεστές απορρόφησης για τη συχνότητα των 1000 Hz είναι $\alpha_{\text{πατώματος}}=0.1$, $\alpha_{\text{τοιχων}}=0,02$ και $\alpha_{\text{οροφής}}=0,26$
- 1) Να βρεθεί η στάθμη του ανακλώμενου ήχου, 2) του απευθείας ήχου και 3) η συνολική ηχητική στάθμη στο κέντρο του δωματίου, δηλαδή στο σημείο (2.5, 5, 1.75).

Άσκηση Κ2:

Για μια πηγή που έχει υπολογιστεί ότι πετυχαίνει $D_c=4$ m μέσα σε ένα κλειστό χώρο, πόσο θα γίνει το D_c αν

1) το ηχείο αντικατασταθεί με άλλο ηχείο που έχει τετραπλάσιο συντελεστή κατευθυντικότητας Q

2) ο κλειστός χώρος χτιστεί με τα ίδια υλικά αλλά με κλίμακα 2:1 ?

3) ο ίδιος χώρος χτιστεί με το διπλάσιο μέσο συντελεστή απορρόφησης?

(υποθέτουμε ότι ο μέσος συντελεστής απορρόφησης είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερος του 0.1)

Εργασία 6 (μέρος Α)

- Σε γλώσσα προγραμματισμού της προτίμησής σας, κατασκευάστε μια συνάρτηση η οποία να δέχεται ως είσοδο:
 - την ισχύ της πηγής ενδιαφέροντος W_{π} ,
 - την συνολική εγκατεστημένη ισχύ $W_{ολ}$,
 - το συντελεστή κατευθυντικότητας της πηγής Q ,
 - Το συνολικό εμβαδό του δωματίου S ,
 - Το μέσο συντελεστή απορρόφησης $\bar{\alpha}$
 - τη μέγιστη απόσταση μελέτης r_{MAX} (σε m)
- Και να επιστρέφει ως έξοδο,
 - το διάγραμμα με τις καμπύλες του απευθείας, του ανακλώμενου και του συνολικού ήχου για 100 σημεία πάνω στον άξονα του ηχείου από $r=1$ m έως r_{MAX} .
 - την τιμή της κρίσιμης απόστασης D_c .

Θα γίνεται η παραδοχή ότι η στάθμη του απευθείας ήχου εξαρτάται μόνο από το W_{π} .