

ΗΛΕΚΤΡΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 4

ΜΕΤΡΗΣΗ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κάθε κλειστός χώρος παρουσιάζει ειδικά ακουστικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι καθοριστικά για την καταλληλότητα του ή μη για συγκεκριμένες χρήσεις (π.χ. συναυλίες, ομιλίες). Τα χαρακτηριστικά αυτά προσδιορίζουν σε μεγάλο βαθμό την μορφή, τις παραμέτρους και την απόδοση μιας ηχητικής εγκατάστασης που πιθανό θα τοποθετηθεί στον χώρο αυτό και θα πρέπει να υπολογίζονται πριν την κατασκευή ενός τέτοιου χώρου, αφού μετέπειτα διορθώσεις είναι εξαιρετικά δαπανηρές, ενώ προβλέψεις των ακουστικών παραμέτρων του χώρου είναι δυνατό να επιτευχθούν με χρήση απλών σχέσεων, κάτι που θα είναι και το αρχικό αντικείμενο αυτής της Άσκησης. Περισσότερο λεπτομερή συμπεράσματα όμως επιτυγχάνονται με επιτόπου μετρήσεις των ακουστικών παραμέτρων του χώρου. Η μεθοδολογία και ανάλυση τέτοιων μετρήσεων θα αποτελέσει το δεύτερο τμήμα της Άσκησης. Τέλος, τα αποτελέσματα των προβλέψεων και των μετρήσεων θα πρέπει να συγκριθούν μεταξύ τους και τυχόν αποκλίσεις θα πρέπει να επισημανθούν. Η σύγκριση αυτή μεταξύ προβλέψεων και μετρήσεων αποτελεί και το τρίτο τμήμα της Άσκησης.

Για την υλοποίηση της Άσκησης αυτής θα χρησιμοποιηθεί ο χώρος του εργαστηρίου του οποίου και θα μετρηθούν οι διαστάσεις και θα προσδιοριστούν οι παράμετροι των ανακλαστικών επιφανειών. Από τα δεδομένα αυτά, με τη χρήση των βασικών θεωρητικών σχέσεων, αρχικά θα υπολογιστούν διάφορες ακουστικές παράμετροι (π.χ. Χρόνος Αντήχησης, Λόγος Κατευθείαν προς Ανακλώμενου Ήχου, Καταληπτότητα Ομιλίας, κλπ.), για διαφορετικές θέσεις πηγής/δέκτη. Ταυτόχρονα, και για τις ίδιες θέσεις πηγής/δέκτη θα γίνουν και μετρήσεις της κρουστικής απόκρισης. Από τις μετρήσεις αυτές και με την χρήση κατάλληλων αλγορίθμων του συστήματος, θα υπολογιστούν όλες οι παραπάνω ακουστικές παράμετροι, καθώς και επιπλέον, ειδικότερα χαρακτηριστικά (π.χ. Χρόνος Αντήχησης κατά περιοχή συχνότητας, Δείκτης Καταληπτότητας κατά RASTI, Λόγος Αρχικής προς Καθυστερημένης Αντήχησης, κλπ.). Έτσι, θα είναι δυνατή η πλήρης ανάλυση της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου και θα γίνει εύκολη και η κατ' ευθείαν σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης και της μέτρησης.

2. ΘΕΩΡΙΑ

2.1. Πρόβλεψη ακουστικών παραμέτρων κλειστών χώρων

Όπως είναι γνωστό (Σημειώσεις Η/Α), διάφορες ακουστικές παράμετροι των κλειστών χώρων μπορούν να υπολογιστούν από απλές σχέσεις, δεδομένου ότι ορισμένα στοιχεία για τον χώρο (π.χ. διαστάσεις, εμβαδόν και ανακλαστικότητα επιφανειών, στάθμη ήχου πηγής, κλπ.) είναι γνωστά. Τέτοιες σχέσεις είναι οι ακόλουθες:

2.1.1. Χρόνος Αντήχησης (RT_{60})

Κατά Sabine, ο Χρόνος Αντήχησης ενός κλειστού χώρου υπολογίζεται από την σχέση:

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{A} \quad (1)$$

Όπου, $V(m^3)$ είναι ο όγκος του χώρου, $A(m^3)$ είναι η συνολική απορρόφηση όλων των επιφανειών του χώρου. Η απορρόφηση μιας επιφάνειας είναι ίση με το γινόμενο του εμβαδού της S επί το συντελεστή απορρόφησης α του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η επιφάνεια. Αν για παράδειγμα σε ένα κλειστό χώρο το πλήθος των επιφανειών που είναι καλυμμένες από διαφορετικά υλικά είναι n , τότε η συνολική απορρόφηση υπολογίζεται ως:

$$A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n \quad (2)$$

Το συνολικό άθροισμα των επιφανειών του συγκεκριμένου χώρου υπολογίζεται σύμφωνα με:

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n \quad (3)$$

Για τον συγκεκριμένο χώρο, ενδεικτικές τιμές του συντελεστή α δίνονται από τον Πίνακα στο Παράρτημα.

2.1.2. Ηχοστάθμη σε κάποια απόσταση (L_p)

Κατά Hopkins-Stryker, η συνολική ηχοστάθμη (λόγω κατευθείαν και ανακλώμενου ήχου) που παράγεται από κάποια πηγή σε κλειστό χώρο, δίνεται από την σχέση:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 0.5 \text{ (dB)} \quad (4)$$

όπου, $R = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}$, $L_w(\text{dB})$ είναι η στάθμη ισχύος της πηγής, Q ο λόγος κατευθυντικότητας της και $r(m)$ η απόσταση πηγής / δέκτη.

2.1.3. Στάθμη Λόγου Κατευθείαν προς Ανακλώμενου Ήχου ($L_{d/r}$)

Ο λόγος αυτός δίνεται από τη σχέση:

$$L_{d/r} = 10 \log \left(\frac{Q}{16\pi r^2} \right) \text{ (dB)} \quad (5)$$

2.1.4. % Μείωση Καταληπτότητας Φωνημάτων (% AL_{CONS})

Κατά Reutz, η % μείωση της καταληπτότητας των φωνηέντων της ομιλίας που θα φθάσει στον δέκτη, δίνεται από την σχέση:

$$\%AL_{CONS} = \frac{200r^2 RT_{60}^2}{VQ} \quad (6)$$

2.2. Μέτρηση Ακουστικών Παραμέτρων Κλειστών Χώρων

2.2.1. Γενικά

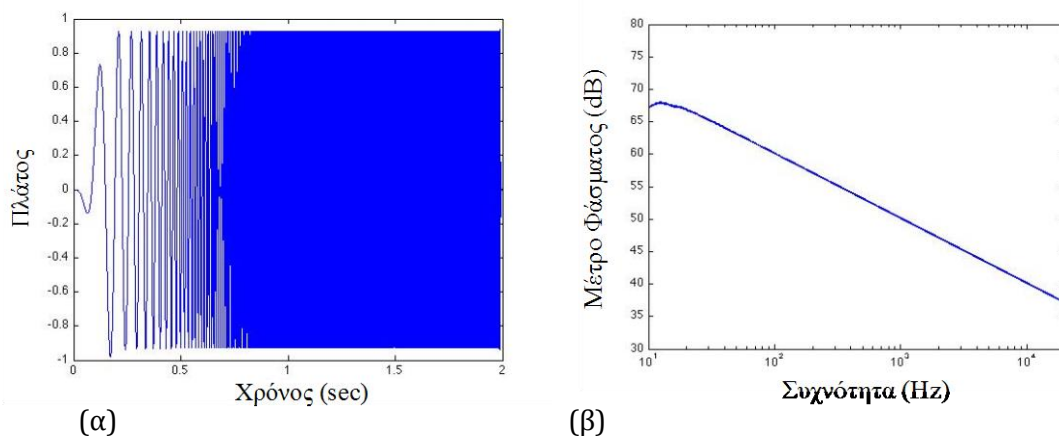
Ο ακριβέστερος προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών γίνεται από μία μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου, για τις συγκεκριμένες θέσεις πηγής/δέκτη και ιδανικά για παντοκατευθυντική πηγή και δέκτη. Μία τέτοια μέτρηση θα πρέπει να επιτρέπει την μέτρηση ακόμη και των ασθενέστερων, καθυστερημένων ανακλάσεων και γι' αυτό η μέτρηση θα πρέπει να είναι μεγάλη σε χρονική διάρκεια, π.χ. 65535 δείγματα.

2.2.2. Απόκριση ακουστικής χώρων.

2.2.2.1. Σήματα διέγερσης για ακουστικές μετρήσεις απόκρισης

Στις μετρήσεις ακουστικής απόκρισης είναι απαραίτητη η μέτρηση της συνάρτησης $h(t)$, της κρουστικής δηλαδή απόκρισης του χώρου και είναι αναγκαία και η χρήση διέγερσης που επιτρέπει και τη φασική καταγραφή των σημάτων εισόδου/εξόδου, κάτι που συνήθως δεν είναι εύκολα δυνατό με τη χρήση σημάτων ημίτονου ή λευκού θορύβου. Για το λόγο αυτό (όπως και κατά την ΑΣΚΗΣΗ 3) και για επίτευξη μέτρησης με ικανοποιητικό Λόγο Σήματος προς Θόρυβο (δες ΑΣΚΗΣΗ 1) χωρίς υπεροδήγηση των ηχείων με απότομα παλμικά σήματα διέγερσης που δημιουργεί μη-γραμμική συμπεριφορά, είναι επιθυμητή η χρήση σημάτων διέγερσης με σταθερό

πλάτος που όμως να επιτρέπουν τον υπολογισμό της κρουστικής απόκρισης. Τα σήματα που έχουν επικρατήσει σε τέτοιες μετρήσεις είναι τύπου «Ημιτονοειδούς Σάρωσης» (Sinewave Sweep ή Swept Sine) που εμφανίζει επίπεδο φάσμα και από την απόκριση του οποίου είναι δυνατό να εξαχθεί η κρουστική απόκριση μετά από αποσυνέλιξη (όπως περιγράφεται παρακάτω και αναφέρθηκε και στην ΑΣΚΗΣΗ 3). Όπως είναι γνωστό, το σήμα σάρωσης ημιτόνου ορίζεται από ένα ημίτονο σταθερού πλάτους, διάρκειας μερικών δευτερολέπτων και αυξανόμενης συχνότητας με την πάροδο του χρόνου. Είναι σχετικά εύκολο να εξαχθεί η κρουστική απόκριση του χώρου από την απόκριση που παράγει ένα τέτοιο σήμα, με την αντίστροφη διαδικασία της συνέλιξης που ονομάζεται αποσυνέλιξη (deconvolution). Δηλαδή το σήμα που καταγράφεται μετά τη διέγερση του χώρου υφίσταται συνέλιξη με το αντίστροφο σήμα διέγερσης (που έχει προϋπολογιστεί) ώστε να προκύψει η κρουστική απόκριση του χώρου. Το αντίστροφο σήμα διέγερσης είναι αυτό που σε συνέλιξη με το κανονικό παράγει μία ιδανική κρουστική απόκριση $\delta(t)$ ή σε διακριτό χρόνο $\delta(nT)$. Οι υπολογισμοί αυτοί παράγονται αυτόματα από κατάλληλα αρχεία που υπάρχουν στο λογισμικό μέτρησης. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο για μετρήσεις σήμα τέτοιου είδους είναι το σήμα λογαριθμικής σάρωσης ημιτόνου (ή log sweep), το οποίο παράγεται από μία τεχνική που σχετίζει λογαριθμικά τη αύξησης της συχνότητας με το χρόνο. Επίσης, το σήμα λογαριθμικής σάρωσης ημιτόνου έχει μέτρο φάσματος που, υπερτονίζει τις χαμηλές συχνότητες και προχωράει προς τις ψηλές με μία κλίση μείωσης 3 dB ανά οκτάβα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την αύξηση του SNR της μέτρησης ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες που ο θόρυβος βάθους έχει συγκεντρωμένη περισσότερη ενέργεια Στο Σχήμα 1 φαίνεται η κυματομορφή (πεδίο του χρόνου) και το φάσμα ενός τέτοιου σήματος λογαριθμικής σάρωσης ημιτόνου.



Σχήμα 1: (α) σήμα σάρωσης ημιτόνου στο πεδίο του χρόνου διάρκειας 2 δευτερολέπτων (β) Μέτρο φάσματος του ίδιου σήματος

Πλέον, τέτοιες μετρήσεις υλοποιούνται με χρήση ειδικού λογισμικού (π.χ. mlssa, DIRAC, winmls, sample champion, Fuzz measure, κλπ.) που αξιοποιεί υπολογιστές και την διασύνδεση τους με κατάλληλες κάρτες ήχου. Σημειώτέο ότι τα ελεύθερα λογισμικά Audacity με το άρθρωμα (plug-in) Aurora (<http://sourceforge.net/projects/audacity/>). και REW (www.roomeqwizard.com) επιτρέπουν τη διεξαγωγή τέτοιων μετρήσεων.

2.2.3. Μέτρηση ακουστικών παραμέτρων

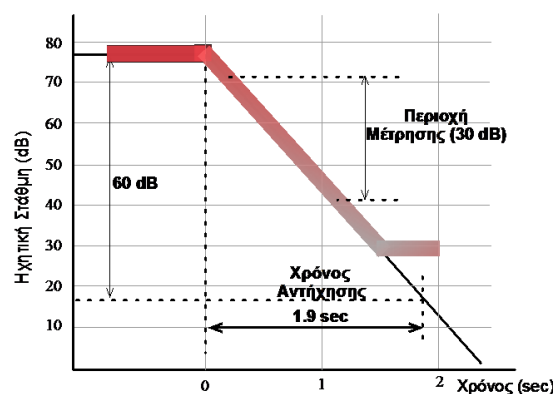
2.2.3.1. Χρόνος Αντήχησης

Μετά από τη διακοπή της εκπομπής της ακουστικής πηγής σε κάποιο χώρο υπάρχει ένας πεπερασμένος χρόνος ελάττωσης της ηχητικής ενέργειας. Η καθυστερημένη αυτή ηχητική ενέργεια ονομάζεται αντήχηση και εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του συγκεκριμένου χώρου και την απορρόφηση της ενέργειας από τις γεωμετρικές επιφάνειες και μετριέται συνήθως από τον χρόνο αντήχησης RT (sec). Συνήθως, ο χρόνος αντήχησης ορίζεται ως το

χρονικό διάστημα κατά το οποίο η στάθμη της ακουστικής πίεσης μειώνεται ιδανικά κατά 60 dB (βλ. Σχήμα 2) μετά από την διακοπή του σήματος διέγερσης. Ωστόσο σε πρακτικές υλοποιήσεις, η μέτρηση περιορίζεται σε μικρότερο διάστημα, για ελάττωση (μετά τον μηδενισμό της πηγής) από -5 dB σε -35 dB από την αρχική τιμή και ο χρόνος τυπικά ανάγεται στην μείωση των 60 dB πολλαπλασιάζοντάς τον επί 2.

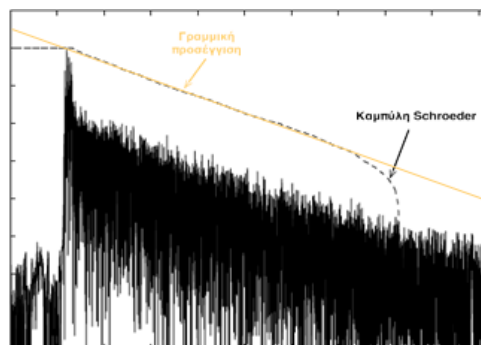
Πέρα από τις αναλυτικές εκφράσεις (π.χ., Sabine, Norris και Eyring) υπολογισμού του χρόνου αντήχησης είναι εφικτός ο προσδιορισμός του με βάση την κρουστική απόκριση του χώρου, όπως απέδειξε ο M.R. Schroeder με τις σχετικές ερευνητικές εργασίες του που δημοσιεύτηκαν το 1965 και 1979. Ο υπολογισμός αυτός, βασίζεται στην καμπύλη μείωσης της ηχητικής ενέργειας (η οποία αναφέρεται ως καμπύλη Schroeder) και προκύπτει από την κρουστική απόκριση με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$d(t) = 10 \log \left(\int_t^{t_N} h^2(\tau) d\tau \right) \quad (7)$$



Σχήμα 2: Τυπικός προσδιορισμός χρόνου αντήχησης

όπου ο δείκτης t_N αναφέρεται στην πεπερασμένη χρονική διάρκεια της κρουστικής απόκρισης $h(t)$. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Σχήμα 3, οι τιμές της καμπύλης Schroeder φθίνουν μονοτονικά και μπορούν να προσεγγιστούν γραμμικά (συνεχόμενη πορτοκαλί γραμμή) με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων (π.χ., μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων). Ο χρόνος αντήχησης τυπικά προκύπτει ως συνάρτηση της κλίσης της παραπάνω προσεγγιστικής γραμμής και για διαστήματα που επισημάνθηκαν παραπάνω (π.χ., -5 σε -35 dB ή -5 σε -25 dB).



Σχήμα 3: Καμπύλη Schroeder και η γραμμική προσέγγισή της, βάσει της κρουστικής απόκρισης χώρου.

2.2.3.2. Χρόνος πρώιμης απόσβεσης (Early Decay Time, EDT)

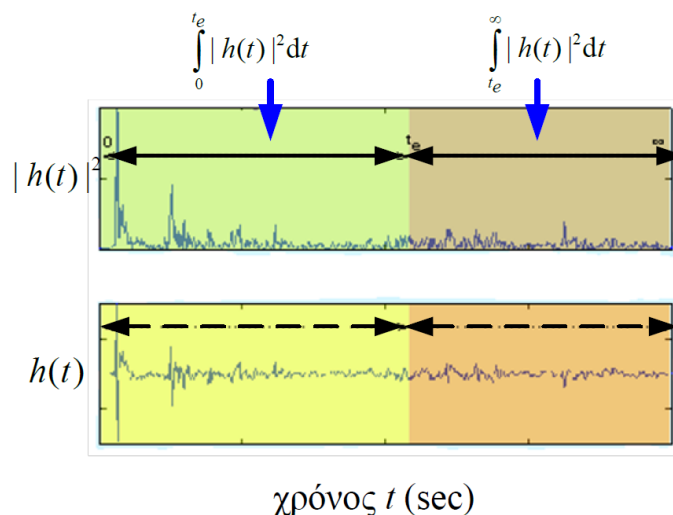
Ο **χρόνος πρώιμης απόσβεσης (EDT)** αντιστοιχεί στο ρυθμό μείωσης της ηχητικής ενέργειας των πρώιμων ανακλάσεων όπως καταφθάνουν στον ακροατή μετά την παύση της ηχητικής

πηγής. Πρακτικά, ο υπολογισμός της παραμέτρου EDT αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε να μειωθεί η αρχική ηχητική ενέργεια κατά 10 dB πολλαπλασιασμένο επί 6, για την εν δυνάμει σύγκριση με το χρόνο αντήχησης RT. Συνεπώς, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο προσδιορισμός της παραμέτρου EDT λαμβάνει υπόψη την πρώιμη απόκριση. Όπως και για την περίπτωση του χρόνου αντήχησης, είναι επιβεβλημένος ο υπολογισμός του EDT ανά ζώνες συχνότητας (π.χ., ζώνες 1 οκτάβας). Γενικά, υψηλή τιμή του EDT σχετίζεται με την αυξημένη παρουσία αντήχησης και αντίστοιχη μείωση της ακουστικής ευκρίνειας, καθώς και το αντίστροφο. Οι μετρούμενες τιμές του EDT στο σύνολο τους, παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά με τις αντίστοιχες τιμές του χρόνου αντήχησης λόγω των τοπικών διαφοροποιήσεων (π.χ., στάθμη, χρονική εξέλιξη) των πρώιμων ανακλάσεων. Τέλος, η σχετικά μικρή περιοχή υπολογισμού (μείωση της ηχητικής ενέργειας κατά 10 dB) καθιστά τον υπολογισμό του EDT ευαίσθητο στον ακριβή προσδιορισμό του απευθείας σήματος.

2.2.3.3. Ευκρίνεια (Clarity)

Μερικές από τις διαδεδομένες ακουστικές παραμέτρους εξάγονται από την ενεργειακή προσέγγιση των διαθέσιμων κρουστικών αποκρίσεων (όπως παρουσιάζεται στην Σχήμα 4) και ο υπολογισμός τους τυπικά βασίζεται στην ακόλουθη γενικευμένη λογαριθμική έκφραση (8)

$$C_{t_e} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{t_e} |h(t)|^2 dt}{\int_{t_e}^{\infty} |h(t)|^2 dt} \right) (dB) \quad (8)$$



Σχήμα 4 : Ενεργειακή προσέγγιση κρουστικής απόκρισης για την εξαγωγή ακουστικών παραμέτρων.

Με βάση την παραπάνω σχέση και τη χρήση του χρονικού ορίου t_e , επιτυγχάνουμε το ενεργειακό διαχωρισμό της κρουστικής απόκρισης σε πρώιμα και με σχετική καθυστέρηση τμήματα. Το πρώιμο ενεργειακό τμήμα, περιλαμβάνει το απευθείας σήμα και τις πρώιμες ανακλάσεις, ενώ το με σχετική καθυστέρηση τμήμα, αναφέρεται στο πεδίο αντήχησης. Στον παρονομαστή της εξίσωσης 9, το πάνω χρονικό όριο για την πράξη της ολοκλήρωσης πρακτικά προσδιορίζεται από τη σχετική χρονική διάρκεια της κρουστικής απόκρισης, ενώ ανάλογα με την επιλογή του χρονικού ορίου t_e (συνήθως εκφραζόμενο σε ms), ο ενεργειακός λόγος της εξίσωσης 9, αντιστοιχεί σε διαφορετικές πτυχές της κρουστικής απόκρισης.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η ευκρίνεια (clarity) ορίζεται ως ο λογαριθμικός λόγος της ενέργειας της κρουστικής απόκρισης πριν το χρονικό όριο t_e (αριθμητής), προς την ενέργεια μετά το χρονικό όριο t_e (παρονομαστής). Χαρακτηριστικές τιμές του χρονικού ορίου t_e , είναι 50 ή 80 ms, οπότε και η εξίσωση διαμορφώνεται αντίστοιχα ως:

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{50ms} |h(t)|^2 dt}{\int_{50ms}^{\infty} |h(t)|^2 dt} \right) (dB) \quad (9\alpha)$$

$$C_{80} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{80} |h(t)|^2 dt}{\int_{80}^{\infty} |h(t)|^2 dt} \right) (dB) \quad (9\beta)$$

Η παράμετρος C_{50} συνήθως χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ευκρίνειας κατά την τυπική αναπαραγωγή σημάτων ομιλίας, ενώ η παράμετρος C_{80} σε σήματα μουσικής. Μεγάλες τιμές της ευκρίνειας υποδεικνύουν μεγαλύτερη ενέργεια του πρώιμου ηχητικού πεδίου, ενώ αντίθετα μικρές τιμές υποδεικνύουν την παρουσία ενός έντονου αντηχητικού πεδίου. Η παράμετρος αυτή μας δίνει μια ικανοποιητική ένδειξη της ακουστικής ποιότητας του χώρου. Γενικά, ο δείκτης αυτός θα πρέπει να έχει όσο το δυνατό υψηλότερη τιμή.

2.2.3.4. Διακριτότητα (Definition)

Σε αντιστοιχία με την ευκρίνεια η **διακριτότητα** (definition) ορίζεται ως ο λογάριθμος του λόγου της ενέργειας της κρουστικής απόκρισης πριν το χρονικό όριο t_s , προς την συνολική ενέργεια, με τις χαρακτηριστικές τιμές του χρονικού ορίου t_s , να ορίζονται όπως παραπάνω. Συνεπώς, η αναλυτική έκφραση για τον προσδιορισμό της διακριτότητας για τις δύο χρονικές περιπτώσεις ορίζεται ως:

$$D_{50} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{50ms} |h(t)|^2 dt}{\int_0^{\infty} |h(t)|^2 dt} \right) (dB) \quad (10\alpha)$$

$$D_{80} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{80ms} |h(t)|^2 dt}{\int_0^{\infty} |h(t)|^2 dt} \right) (dB) \quad (10\beta)$$

Η παράμετρος D_{50} συνήθως χρησιμοποιείται για σήματα ομιλίας ενώ η D_{80} για σήματα μουσικής.

2.2.3.5. Χρονικό κέντρο απόκρισης

Το **χρονικό κέντρο** T_s , το οποίο χαρακτηριστικά αναφέρεται ως κέντρο βαρύτητας της ενέργειας της κρουστικής απόκρισης, δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (11)$$

με τις τιμές της συγκεκριμένης παραμέτρου να είναι εκφρασμένες συνήθως σε ms. Στην πράξη, το άνω όριο της χρονικής ολοκλήρωσης προσδιορίζεται από την συνολική διάρκεια της κρουστικής απόκρισης $h(t)$. Μικρή τιμή της παραμέτρου T_s υπονοεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ηχητικής ενέργειας καταφθάνει νωρίς στον ακουστικό δέκτη, ενώ αντίθετα μεγαλύτερη τιμή υποδεικνύει ότι η ενέργεια καταφθάνει με καθυστέρηση μετά το απευθείας σήμα.

2.2.3.6. Ακουστική απολαβή (Sound Strength)

Η παράμετρος της ακουστικής απολαβής (sound strength) G ορίζεται ως ο λογαριθμικός λόγος ανάμεσα στη συνολική ενέργεια της κρουστικής απόκρισης και της ενέργειας του απευθείας ήχου σε απόσταση 10m από την ηχητική πηγή. Με βάση την προηγούμενη σημειογραφία η ακουστική απολαβή προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} |h(t)|^2 dt}{\int_0^{t_{dir}} |h_{10m}(t)|^2 dt} \quad (12)$$

όπου το άνω όριο t_{dir} της χρονική ολοκλήρωσης καθορίζεται από τη διάρκεια του απευθείας σήματος. Κατά τη διάρκεια ακουστικών μετρήσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφορετική

απόσταση από 10m, γεγονός το οποίο επιβάλλει την εισαγωγή κατάλληλου διορθωτικού όρου στην εξίσωση (12), η οποία συνήθως πραγματοποιείται αυτόματα από το λογισμικό μετρήσεων που έχει επιλεχθεί. Η ακουστική απολαβή περιγράφει την επίδραση του χώρου ακρόασης στην προσλαμβανόμενη ηχητική στάθμη, ενώ η διαφοροποίησή της συναρτήσει της απόστασης παρέχει μια ένδειξη για το πόσο διάχυτο είναι το ηχητικό πεδίο στο συγκεκριμένο χώρο.

2.2.3.7. Δείκτης Μετάδοσης Ομιλίας (Speech transmission Index, STI)

Ο συνήθης τρόπος για την μέτρηση της καταληπτότητας ομιλίας σε κλειστούς χώρους ακρόασης είναι μέσω του δείκτη μετάδοσης ομιλίας STI (Speech Transmission Index). Ο προσδιορισμός του δείκτη STI βασίζεται στην ιδέα ότι τα σήματα ομιλίας μπορούν να θεωρηθούν ως διαμορφωμένα κατά πλάτος σήματα για τα οποία ο βαθμός της διαμόρφωσης καθορίζει την χρήσιμη πληροφορία (ομιλία). Στην περίπτωση που η μετάδοση προσθέτει θόρυβο ή αντήχηση στο σήμα ομιλίας, ο βαθμός διαμόρφωσης του σήματος μειώνεται με άμεσο αποτέλεσμα την μείωση της καταληπτότητας.

Η υπολογιστικά απλούστερη μέθοδος για τον προσδιορισμό του δείκτη STI αναφέρεται ως RASTI (Rapid Speech Transmission Index). Παρόλο που η αρχική μέθοδος υπολογισμού των δεικτών STI/RASTI βασίζεται στη χρήση κατάλληλα διαμορφωμένων σημάτων θορύβου σε συγκεκριμένες συχνότητες, είναι εφικτός ο υπολογισμός των παραπάνω παραμέτρων από τη διαθέσιμη κρουστική απόκριση μέσω της συνάρτησης μεταφοράς διαμόρφωσης (Modulation Transfer Function, MTF). Η συνάρτηση MTF ορίζεται ως ο μετασχηματισμός Fourier του τετραγώνου της κρουστικής απόκρισης $h(t)$ προς τη συνολική ενέργεια της κρουστικής, όπως φαίνεται στην ακόλουθη έκφραση:

$$MTF = \frac{F\{h^2(t)\}}{\int_0^\infty |h(t)|^2 dt} \quad (13)$$

όπου ο τελεστής $F\{\cdot\}$ υποδηλώνει το μετασχηματισμό Fourier. Από τον υπολογισμό της παραμέτρου MTF για συγκεκριμένες συχνότητες διαμόρφωσης (βλ. Πίνακα 1) που αντιστοιχούν σε τυπικές τιμές για την ομιλία, και για κάθε περιοχή συχνοτήτων (βλ. Πίνακα 2), υπολογίζεται η παράμετρος STI, η οποία για πλήρη καταληπτότητα θα πρέπει να είναι ίση με 1. Αντίστοιχα, ο προσδιορισμός της παραμέτρου RASTI πραγματοποιείται μόνο για τα φίλτρα με κεντρικές συχνότητες 500 και 2000 Hz (βλ. Πίνακα 3) καθώς και ένα μικρότερο αριθμό συχνοτήτων διαμορφώσεων, διαδικασία που είναι υπολογιστικά απλούστερη και με την τιμή 1, όπως και παραπάνω, να υποδηλώνει άριστη καταληπτότητα. Με βάση τις τιμές των παραμέτρων STI/RASTI και με χρήση των ακόλουθων εμπειρικών σχέσεων υπολογίζεται και η τιμή του %ALcons καθώς και το αντίστροφο. Να επισημανθεί ότι οι παράμετροι STI/RASTI αποτελούν το διεθνές πρότυπο IEC 286-16, ενώ ενδεικτικές τιμές σε αντιστοιχία με την καταληπτότητα ομιλίας, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

$$\%ALcons = 170.5405e^{-5.419STI} \quad (14\alpha)$$

$$STI = -0.1845 \ln(\%ALcons) + 0.9482 \quad (14\beta)$$

Πίνακας 1. Συχνότητες διαμόρφωσης για STI/RASTI

Συχνότητες διαμόρφωσης f _i (Hz), i = 1, 2,...,14													
0.63	0.8	1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5

Πίνακας 2. Ζώνες συχνοτήτων οκτάβας

Φίλτρα εύρους ζώνης 1 οκτάβας (Hz)						
125	250	500	1000	2000	4000	8000

Πίνακας 3. Κλίμακα αξιολόγησης με βάση τις τιμές RASTI

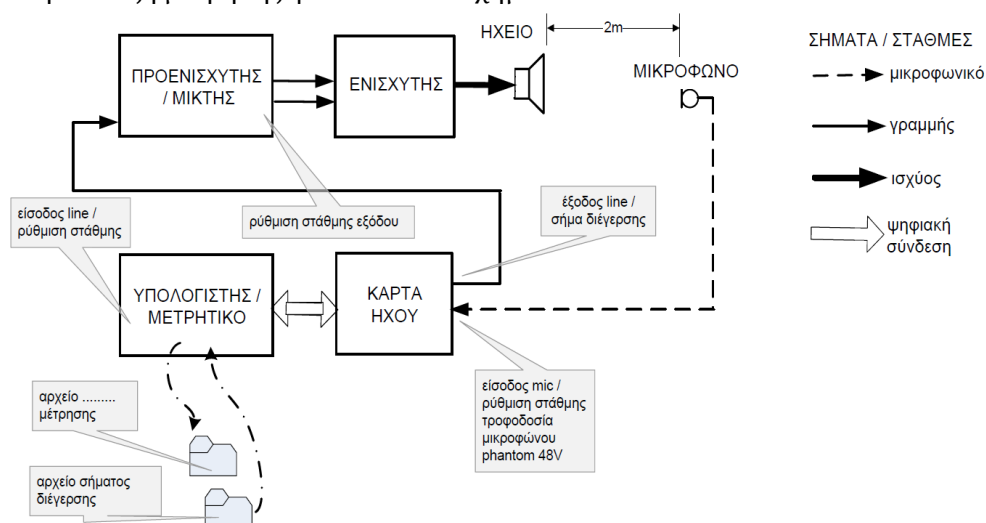
<i>RASTI</i>	<i>ALcons (%)</i>	<i>καταληπτότητα</i>
0 – 0.3	> 15	κακή
0.3 – 0.45	15 -12	ικανοποιητική
0.45 – 0.6	12 – 8	καλή
0.6 – 0.75	8 – 4	πολύ καλή
0.75 – 1	< 4	τέλεια

2.2.3.8. Πρακτικά θέματα μέτρησης κρουστικής απόκρισης χώρου

Στη μέθοδο μέτρησης με σήματα τύπου sweep χρειάζομαστε είτε μια γεννήτρια παραγωγής τέτοιων σημάτων ή ένα Προσωπικό Υπολογιστή (PC), εφοδιασμένο με κάρτα ήχου και κατάλληλο λογισμικό αναπαραγωγής και επεξεργασίας ηχητικών σημάτων. Υπάρχουν εμπορικά μετρητικά συστήματα που αποτελούνται από ειδικού σκοπού κάρτες ήχου μαζί με λογισμικό, ή παρέχουν μόνο λογισμικό που μπορεί να εκμεταλλευτεί το διαθέσιμο υλικό της κάρτας ήχου ενός Προσωπικού Υπολογιστή. Η πηγή διέγερσης θα πρέπει να είναι ένα μεγάφωνο όσο το δυνατό μη κατευθυντικό. Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι ο ελάχιστος εξοπλισμός που απαιτείται για να κάνουμε ακουστικές μετρήσεις περιλαμβάνει απαραίτητα:

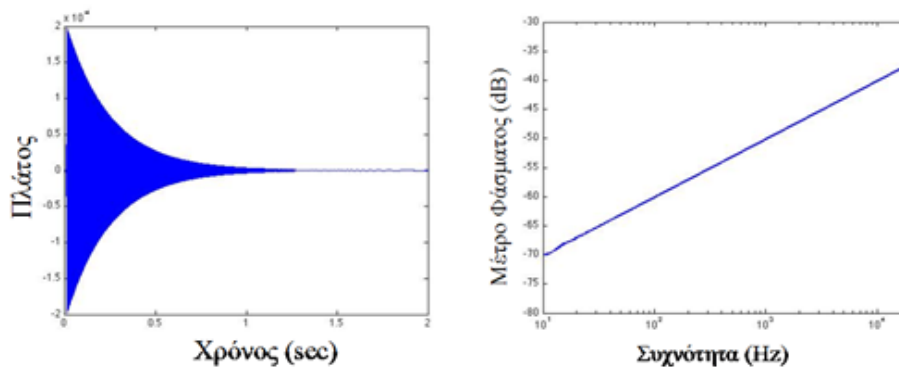
- μία ηχητική πηγή
- ένα μικρόφωνο
- ένα σύστημα ηχητικής καταγραφής
- καλώδια διασυνδέσεων

Και η τυπική διάταξη μέτρησης φαίνεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Μέτρηση απόκρισης με χρήση αρχείου τύπου sweep

Η κρουστική απόκριση στην περίπτωση της μέτρησης με σήματα sweep, εξάγεται μετά την αποσυνέλιξη του σήματος που καταγράφεται μετά τη διέγερση. Αν υποθέσουμε ότι η $H(f)$ είναι η απόκριση φάσματος του αρχικού σήματος διέγερσης (το f εκφράζει τις συχνότητες του φάσματος που μας ενδιαφέρει. Συνήθως τα sweep σχεδιάζονται έτσι ώστε να καλύπτουν τις συχνότητες από 20 έως 20000 Hz και το αντίστροφο sweep θα έχει φάσμα $1/H(f)$. Άρα η διαδικασία για να πάρουμε την κρουστική απόκριση μπορεί να γίνει ως εξής: (α) εφαρμόζουμε Γρήγορο Μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) στο αρχικό σήμα και προκύπτει το φάσμα του που εκφράζεται από την $H(f)$, (β) υπολογίζουμε το αντίστροφο φάσμα $1/H(f)$, και με αντίστροφο FFT (Inverse FFT, IFFT) υπολογίζεται το αντίστροφο σήμα διέγερσης (γ) κάνουμε τη μέτρηση, δηλαδή διεγείρουμε το χώρο και ηχογραφούμε το σήμα που φθάνει στη θέση του μικροφώνου (δ) εφαρμόζουμε την πράξη της συνέλιξης μεταξύ του ηχογραφημένου σήματος και του αντίστροφου σήματος διέγερσης. Το αποτέλεσμα θα είναι η κρουστική απόκριση του χώρου στη θέση που βάλαμε το μικρόφωνο. Στο Σχήμα 6 φαίνεται το σήμα αντιστροφής του log sweep στο πεδίο του χρόνου (α) και στο πεδίο της συχνότητας (β).



Σχήμα 6: Σήμα αντιστροφής λογαριθμικής σάρωσης ημιτόνου: (α) πεδίο του χρόνου, (β) πεδίο της συχνότητας

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΤΕΑ

3.1 Υπολογισμός και πρόβλεψη ακουστικών παραμέτρων

- Θα πρέπει να μετρηθούν οι διαστάσεις της συγκεκριμένης εργαστηριακής αίθουσας, να οριστούν οι θέσεις πηγής-ομιλητή (τυπική) και δέκτη- ακροατηρίου, καθώς και να προσδιοριστούν οι επιφάνειες και τα υλικά της αίθουσας.
- Σύμφωνα με την κάτοψη της εργαστηριακής αίθουσας (που θα σχεδιάσετε αφού μετρήσετε τις διαστάσεις της) και με τη χρήση των πινάκων του Παραρτήματος, θα πρέπει να υπολογιστούν όλες οι Ακουστικές Παράμετροι της αίθουσας, όπως ορίζονται στην 2.1, για δύο θέσεις ακρόασης A (κοντινή) και B (μακρινή). Θεωρήστε ότι η πηγή παράγει ομοιογενή (χρονικά και συχνотικά) ήχο στάθμης 85 dB SPL/1m, έχοντας μέση κατευθυντικότητα $Q = 5$.

3.2 Μέτρηση ακουστικών παραμέτρων

Με την χρήση του προγράμματος REW (ή Audacity και του πακέτου Aurora), να μετρηθεί η κρουστική απόκριση $h(n)$ του χώρου για τις δύο θέσεις A και B. Η στάθμη του σήματος διέγερσης θα πρέπει να είναι 85 dB SPL /1m (γενικά επιλέγουμε στάθμη σήματος διέγερσης τουλάχιστον κατά 30 dB δυνατότερη από τη στάθμη του θορύβου)

3.3 Επεξεργασία μετρήσεων και παραδοτέα

- Να σχεδιαστεί η κάτοψη της εργαστηριακής αίθουσας με απεικόνιση των διαστάσεων και των σημείων της πηγής και των θέσεων A και B.
- Να καθοριστούν οι προβλέψεις των τιμών RT_{60} (εξίσωση 1) για τον χώρο, καθώς και οι τιμές των παραμέτρων 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4 για τις θέσεις A και B του ακροατηρίου.
- Με την χρήση του προγράμματος REW (ή Audacity και του πακέτου Aurora), να αναλυθεί η κρουστική απόκριση $h(n)$ του χώρου που πραγματοποιήθηκε για τις θέσεις A και B, θέτοντας την πηγή στην θέση O (Σχήμα 7). Η στάθμη του σήματος διέγερσης ήταν

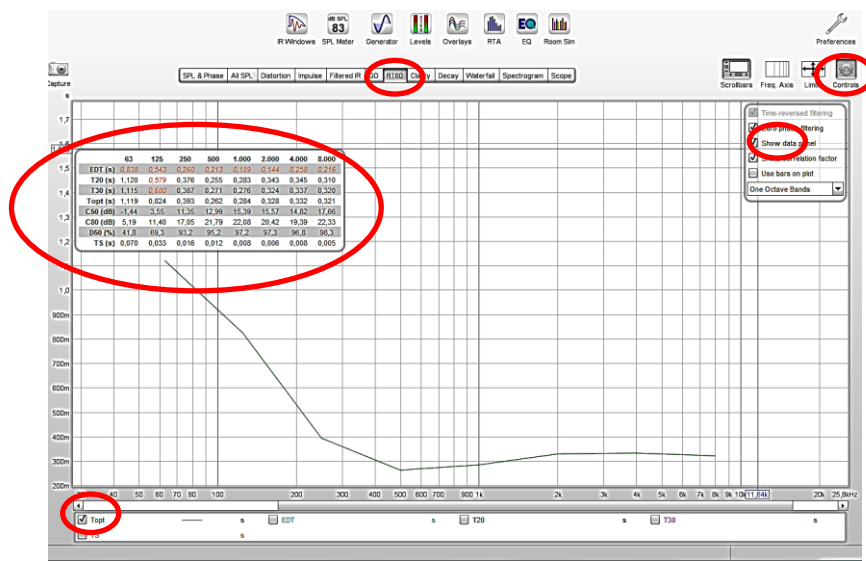
85 dB SPL /1m. Με τη βοήθεια του λογισμικού θα πρέπει να αποτυπωθούν σε **Πίνακα Α** που θα συμπεριλάβετε στην αναφορά σας, **ανά οκταβική ζώνη**, οι παρακάτω παράμετροι:

- | | |
|-----|-------------------------|
| A1. | T _{opt} (RT60) |
| A2. | EDT |
| A3. | T30 |
| A4. | C50 (Clarity) |
| A5. | D50 (Definition) |
| A6. | TS (Centre time) |

Ο πίνακας αυτός, παρουσιάζεται από τη σελίδα RT60 του λογισμικού REW, στα αριστερά μετά από την επιλογή **Controls** και έπειτα **Show data panel** (δηλαδή, τσεκάροντας το πεδίο Show data panel στον πάνω δεξιά πίνακα που εμφανίζεται όταν ενεργοποιηθεί το εικονίδιο Controls της σελίδας αυτής, Σχήμα 8).

Σημείωση: οι παράμετροι αυτοί επίσης καταγράφονται και εμφανίζονται από τη σελίδα Filtered IR του λογισμικού REW. Τσεκάροντας το πεδίο Show data panel στο πάνω δεξιά πίνακα, και επιλέγοντας την επιθυμητή οκταβική ζώνη, η τιμή των παραμέτρων εμφανίζεται στον πίνακα αριστερά.

δ) Επιπλέον, από την ίδια σελίδα του λογισμικού REW, θα πρέπει να εξαχεται και υπό μορφή σχήματος την απεικόνιση των παραμέτρων αυτών, κυρίως του Χρόνου Αντήρησης RT_{60} (T_{opt}) ως προς τη συχνότητα (Σχήμα 7).



Σχήμα 7: Ενδεικτική απεικόνιση ακουστικών παραμέτρων σε πίνακα και γραφήματος Χρόνου

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας τιμών συντελεστών ακουστικής απορρόφησης (α), για διάφορα υλικά και για διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων.

Πίνακας 1 : Κατάλογος συντελεστών απορρόφησης διαφόρων υλικών

ΥΛΙΚΑ	* 125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz *

1) Ασβεστοκονίαμα πεταχτό 15χιλ.	* 0.080	0.150	0.310	0.500	0.610	0.710
2) Ασβεστοκονίαμα πεταχτό 25χιλ.	* 0.190	0.220	0.480	0.590	0.730	0.690
3) Γυψοσβάς κούφιος	* 0.020	0.020	0.020	0.020	0.030	0.050
4) Γυψοσβάς σε τοίχο	* 0.010	0.010	0.020	0.020	0.020	0.040
5) Σοβάς ή γύψος λείος σε πλακάκι ή τσιβίλο	* 0.013	0.015	0.020	0.030	0.040	0.050
6) Σοβάς ή γύψος λείος σε μπαγδατοπήχη	* 0.140	0.100	0.060	0.050	0.040	0.030
7) Αμιαντοσιμέντο (4 χιλ. με 50χιλ. διάκενο)	* 0.430	0.150	0.100	0.050	0.040	0.020
8) Γηροσάνιδο	* 0.290	0.100	0.050	0.040	0.070	0.009
9) Τσιμέντο βαμμένο	* 0.010	0.010	0.010	0.020	0.020	0.020
10) Τσιμέντο άβαφο αδρό	* 0.020	0.030	0.030	0.030	0.040	0.070
11) Τσιμεντόλιθος άγριος	* 0.360	0.440	0.310	0.290	0.390	0.250
12) Τσιμεντόλιθος βαιμμένος	* 0.100	0.050	0.060	0.070	0.090	0.080
13) Τοίχος ακάλυπτος άβαφος	* 0.020	0.030	0.030	0.040	0.050	0.070
14) Τοίχος βαιμμένος καλωμένος	* 0.010	0.010	0.010	0.010	0.020	0.020
15) Τοίχος με τσιβίλα και 30χιλ. διάκενο	* 0.160	0.130	0.150	0.110	0.130	0.140
16) Μάρμαρο επένδυση	* 0.010	0.010	0.010	0.010	0.020	0.020
17) Νοβοπάν 10χιλ. αδρό σε διάκενο 50χιλ.	* 0.130	0.240	0.140	0.140	0.160	0.200
18) Νοβοπάν 20χιλ. σε μπρετόν	* 0.060	0.150	0.440	0.900	0.660	0.540

συνεχίζεται....

ΥΛΙΚΑ	* 125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz

19) Νοβοπάν 8χιλ. σε διάκενο 20χιλ. με υαλοβάμβακα	* 0.460	0.240	0.040	0.010	0.010	0.001
20) Γυαλί συνηθισμένου παραθύρου	* 0.350	0.250	0.180	0.120	0.070	0.040
21) Γυαλί 6χιλ. με μεγάλα φύλλα	* 0.180	0.060	0.040	0.030	0.020	0.020
22) Διπλό παράθυρο	* 0.100	0.040	0.030	0.020	0.020	0.020
23) Γυαλί με τοίχο (Virtolite)	* 0.010	0.010	0.010	0.010	0.020	0.020
24) Κουρτίνα βαμβακερή διπλω- μένη στα 7/8 της επιφάνειά της	* 0.030	0.120	0.150	0.270	0.370	0.420
25) Κουρτίνα βαμβακερή διπλω- μένη στα 3/4 της επιφάνειας της	* 0.040	0.230	0.400	0.570	0.530	0.400
26) Κουρτίνα βαμβακερή διπλω- μένη στο 1/2 της επιφάνειας της	* 0.070	0.370	0.490	0.810	0.650	0.540
27) Βελούδινη κουρτίνα διπλωμένη στο 1/2 της επιφάνειας της	* 0.070	0.310	0.490	0.750	0.700	0.600
28) Βαριά βελούδινη κουρτίνα διπλωμένη στο 1/2 της επιφ.	* 0.140	0.350	0.550	0.720	0.700	0.650
29) Ξύλινη πόρτα	* 0.140	-----	0.060	-----	0.010	-----
30) Μωσαϊκό	* 0.030	0.030	0.030	0.030	0.050	0.050
31) Ξύλινο δάπεδο	* 0.100	0.100	0.100	0.090	0.080	0.080
32) Παρκέ σε δάπεδο	* 0.020	0.030	0.040	0.050	0.050	0.100
33) Παρκέ σε ψευδοδάπεδο	* 0.200	0.150	0.100	0.100	0.050	0.001
34) Φελλός σε παρκέ	* 0.040	0.030	0.050	0.110	0.070	0.020
35) Πλαστικό δάπεδο	* 0.010	-----	0.010	-----	0.050	-----
36) Βάθρο	* 0.150	-----	0.100	-----	0.100	-----
37) Σιπνή θεάτρου	* 0.200	-----	0.250	-----	0.250	-----
38) Μοκέτα λεπτή σε δάπεδο	* 0.050	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500
39) Μοκέτα παχιά σε δάπεδο	* 0.070	0.250	0.500	0.550	0.600	0.650
40) Ακροατήριο καθισμένο σε ξύλινες καρέκλες (2ατ./τ.μ)	* 0.240	0.400	0.780	0.980	0.960	0.870
41) Ακροατήριο καθισμένο σε ξύλινες καρέκλες (1ατ./τ.μ)	* 0.160	0.240	0.560	0.690	0.810	0.780
42) Ακροατήριο καθισμένο σε μέτρια επενδυμένες καρέκλες (0.85m*0.63m)	* 0.720	0.820	0.910	0.930	0.940	0.870
43) Ακροατήριο καθισμένο σε μέτρια επενδυμένες καρέκλες (0.90m*0.95m)	* 0.550	0.860	0.830	0.870	0.900	0.870
44) Κενές μέτρια επενδυμένες καρέκλες (0.90m*0.95m)	* 0.440	0.560	0.670	0.740	0.830	0.870
45) Περιοχή καταλειμμένη από κοινό ορχήστρα ή χορωδία	* 0.600	0.740	0.880	0.960	0.930	0.850
46) Άδειες ταπετουμενες θέ- σεις	* 0.490	0.660	0.800	0.880	0.820	0.700
47) Αφρολέξ(50 χιλ. σε τοίχο)	* 0.120	0.200	0.450	0.650	0.700	0.750