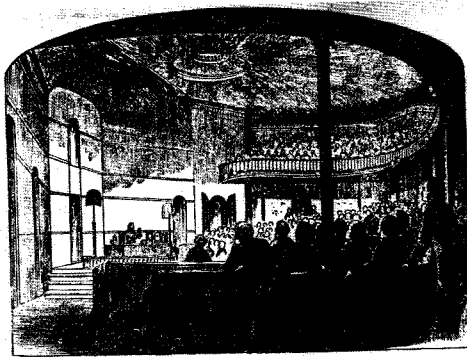


# Αρχιτεκτονική Ακουστική

Πρέπει να επιλέγουμε μία θέση στην οποία η φωνή να μειώνεται μαλακά και να μην επιστρέφει με ανακλάσεις δίδοντας συγκεχυμένο μήνυμα στο αυτί ...»  
Marcus Vitruvius Pollio "De Architectura"

## 7.1 ΣΥΝΤΟΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ

Η αρχιτεκτονική ακουστική στην αρχαία Ελλάδα, ήταν ιδιαίτερα ανεπτυγμένη, έχει να επιδείξει εξαιρετικά δείγματα, (πχ το θέατρο της Επιδαύρου). Το σχήμα των θεάτρων ήταν τέτοιο, ώστε οι ακροατές να βρίσκονται όσο το δυνατό πιο κοντά στην σκηνή. Κατά τον Jordan οι θεατρικές μάσκες των ηθοποιών, εκτός των άλλων, βοηθούσαν την ενίσχυση της φωνής των. Παρ όλα αυτά, δεν υπάρχουν γραπτά κείμενα που να σχετίζονται με την κατασκευή των θεάτρων. Ο Ρωμαίος αρχιτέκτων Marcus Vitruvius Polio (25 πΧ), στο έργο του "De Architectura: Ch. VIII De locis consonatibus ad theatra eligendis", δίδει τους πρώτους κανόνες που απαιτούν την καλή ακουστική των θεάτρων (Morgan 1914).



Εικόνα 7.1.1 Ο χώρος διαλέξεων του Smithsonian Institution όπου ο Henry έκανε την πρώτη βελτίωση της ακουστικής της (Shakland 1977).

Η μετάβαση από τα ανοικτά θέατρα στους κλειστούς χώρους, έγινε κατά την περίοδο της αναγέννησης (Olympico theatre in Vicenza). Η ακουστική συμπεριφορά των αιθουσών, φαίνεται ότι δεν λαμβανόταν υπόψη στον σχεδιασμό των αιθουσών μέχρι τον 19<sup>ο</sup> αιώνα. Η πρώτη βελτίωση της ακουστικής συμπεριφοράς κλειστού χώρου έγινε το 1850, από τον Joseph Henry, στον χώρο διαλέξεων του Smithsonian Institution, Wasington (Shakland 1977).

Ο Henry, ήταν ο πρώτος που επεσήμανε την κακή ακουστική των κλειστών χώρων, λόγω του φαινομένου της ηχούς, και του εστιασμού των ήχων, σε συγκεκριμένα σημεία των δημοσίων χώρων. Με παρατηρήσεις που έκανε, κτυπώντας τα χέρια του στην αίθουσα διαλέξεων του Smithsonian building, βρήκε ότι καθυστέρηση μικρότερη των 53 ms των ανακλώμενων ήχων, σε σχέση με τους απ ευθείας διαδιδόμενους, δεν προκαλεί ηχώ. Η παρατήρηση αυτή οδήγησε τον Haas στην διατύπωση του φαινομένου Haas (Haas effect). Ο Henry, με προσθήκη ξύλινων ανακλαστικών επιφανειών, βελτίωσε την ακουστική της παραπάνω αίθουσας. Στο σχήμα 7.1.1 φαίνεται η ανακλαστική επιφάνεια πίσω από τον ομιλητή, και οι πλευρικές επιφάνειες που χρησιμοποίησε για την ενίσχυση του ήχου, στον χώρο διαλέξεων του Smithsonian Institution.

Αυτός που έφερε την επανάσταση στην ακουστική των κλειστών χώρων, ήταν ο Wallace Sabine, καθηγητής στο Harvard University. Ο Sabine κατάλαβε την σημασία της αντήχησης στην ακουστική ποιότητα των χώρων, και τη επίδραση της απορρόφησης των υλικών, στην αντήχηση των χώρων (1915).

Η ακουστική των μεγάλων χώρων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την μηχανική, διότι αυτή σχετίζεται τόσο με την ποιότητα του ήχου που φθάνει στη θέση του δέκτη, όταν αυτός βρίσκεται σε ένα κλειστό μεγάλο χώρο, όσο και με την παρατηρούμενη στάθμη, η οποία λόγω των διαδοχικών ανακλάσεων, είναι μεγαλύτερη από αυτήν που θα παρατηρούσε αν η πηγή βρισκόταν σε ανοικτό χώρο.

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται οι αντικειμενικές ποσότητες με τις οποίες μετράμε την ακουστική ποιότητα των κλειστών χώρων, ο τρόπος μέτρησης των, καθώς και οι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να βελτιώσουμε, ή να σχεδιάσουμε ένα χώρο με καλή ακουστική.

## 7.2 ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΩΡΩΝ

Ένας κλειστός χώρος λέμε ότι έχει καλή ακουστική, όταν πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

Ο ήχος φθάνει σε όλα τα σημεία του χώρου χωρίς αισθητή μείωση, και κυρίως έχει την ίδια κατανομή παντού.

Δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της επικάλυψης (βλ κεφαλαίο 15), ή τουλάχιστον αυτό πρέπει να είναι περιορισμένο.

Ο ρυθμός μείωσης του ήχου είναι ο βέλτιστος. Αυτό έχει σαν συνέπεια, την καθαρότητα της συνομιλίας, και τη βελτίωση της μουσικής. Μετρήσεις των Beranek,



Σχήμα 7.3

Hidaka και Masuda έδειξαν ότι στις καλύτερες αίθουσες μουσικής η τιμή του  $RT$  για τις μέσες συχνότητες ήταν μεταξύ 1.3 και 1.6 sec. Για τον  $EDT$  η καλύτερη τιμή είναι 1.7 sec.

Δεν υπάρχουν δυσάρεστες καταστάσεις όπως:

Ηχώ,

Ηχητικές σκιές,

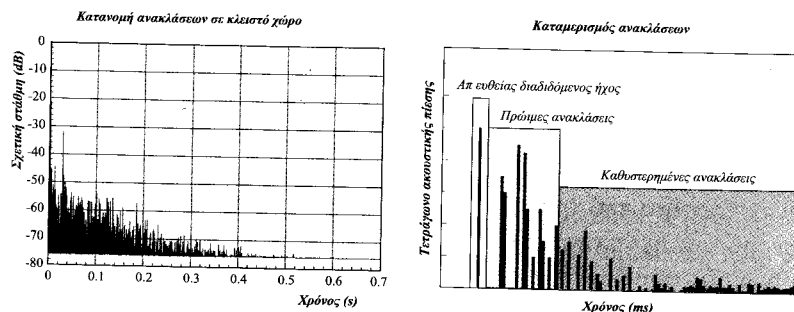
Ηχητικές παραμορφώσεις,

Ηχητικές συγκεντρώσεις,

Ο χώρος να διαθέτει επαρκή ηχομόνωση. Κατά τον Beranek η τιμή των κριτηρίων  $NCB$  (βλ κεφ 14) του εισερχόμενου θορύβου, πρέπει να είναι μικρότερη από 18 dB.

### 7.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΛΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6, όταν η πηγή βρίσκεται σε ένα κλειστό χώρο οι διαδοχικές ανακλάσεις από τα τοιχώματα του χώρου, φθάνουν στον ακροατή με διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις. Η κατανομή των ανακλάσεων παίζει σπουδαίο ρόλο στην ακουστική του χώρου, διότι ορισμένες από αυτές βελτιώνουν την ακουστική, ενώ άλλες (κυρίως οι χρονικά καθυστερημένες), την χειροτερεύουν. Η μέτρηση των παραμέτρων που περιγράφουν την ακουστική των κλειστών χώρων, ανάγεται στην μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου. Η κρουστική αποκρίση, (βλ κεφ 17) είναι η απόκριση του χώρου, που μετρείται με ένα μικρόφωνο, όταν ο χώρος διεγείρεται από ένα κρουστικό ακουστικό παλμό, δηλαδή έναν ήχο πολύ υψηλής στάθμης, και πολύ μικρής διάρκειας. Το σχήμα 7.3.1 αριστερά δείχνει την καταγραφή μιας τέτοιας κρουστικής απόκρισης, μέσω καταλλήλου λογισμικού, στην οποία φαίνονται οι ανακλάσεις με την μορφή των κάθετων γραμμών, τοποθετημένων στον άξονα των χρόνων. Στο ίδιο σχήμα δεξιά φαίνεται μια απλοποιημένη μορφή της, με διάρκεια 1000 ms, όπου διακρίνονται, η απ ευθείας διαδιδόμενη ηχητική ενέργεια, οι πρώτες (πρώιμες) ανακλάσεις, και οι καθυστερημένες.



Σχήμα 7.3.1 Κατανομή ανακλάσεων σε κλειστό χώρο (echogram).

Για την περιγραφή της καλής ακουστικής ενός χώρου, έχουν προταθεί διάφορες ποσότητες, που έχουν την γενική ονομασία δείκτες ακουστικής ποιότητας, και περιγράφονται παρακάτω:

### 7.3.1 Ηχώ

Αν από μία πηγή που βρίσκεται σε ένα κλειστό χώρο εκπνευθεί ένας ήχος, ο ήχος αυτός γίνεται αμέσως ακουστός από κάποιον που βρίσκεται στον ίδιο χώρο. Αμέσως μετά ακουστεί το ανακλώμενο ηχητικό σήμα, σαν ξεχωριστό ηχητικό γεγονός, το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ηχώ**.

Η ηχώ είναι τελείως διαφορετικό φαινόμενο από την αντήχηση, κατά την οποία η ανάκλαση δεν μπορεί να διακριθεί από τον απ' ευθείας διαδιδόμενο ήχο σαν ξεχωριστό γεγονός. Η ηχώ, σε αντίθεση με την αντήχηση, που πολλές φορές είναι επιθυμητή, είναι συνήθως ανεπιθύμητη, διότι καταστρέφει την καλή ακουστική των χώρων, μια και η επικοινωνία γίνεται δύσκολη, ή αλλοιώνεται ο ρυθμός της μουσικής. Η εμφάνιση της ηχούς, δεν εξαρτάται μόνο από τη χρονική καθυστέρηση των ανακλώμενων ηχητικών ακτίνων, σε σχέση με τους απ' ευθείας διαδιδόμενους, αλλά και άλλους παράγοντες, όπως η κατεύθυνση πρόσπτωσης σε σχέση με την ανακλώμενη, η στάθμη της ανακλώμενης ηχητικής ακτίνας κ.λπ.

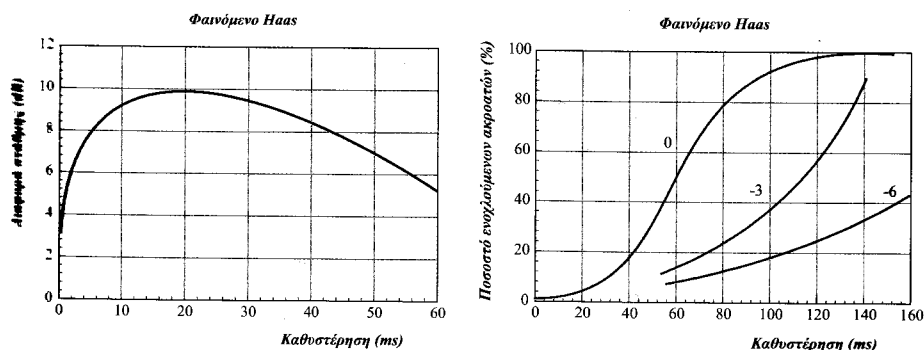
Το φαινόμενο της ηχούς παρουσιάζεται, όταν η ανάκλαση σε σχέση με την απ' ευθείας προερχόμενη από την πηγή ήχο, καθυστερεί τουλάχιστον κατά 17 ms. Αν λάβουμε υπόψη μας ότι σε συνθήκες συνθήκες η ταχύτητα του ήχου είναι 340 m/sec, σημαίνει ότι για υπάρξει το φαινόμενο αυτό σε ένα κλειστό χώρο, πρέπει μία διάσταση του χώρου να είναι τουλάχιστον 17 μέτρα.

### Φαινόμενο Haas

Το φαινόμενο της ηχούς, μπορεί να παρατηρηθεί και για μικρότερες καθυστερήσεις των διαφόρων ηχητικών ακτίνων, σε σχέση με αυτούς που εκπέμπονται από την πηγή. Στην περίπτωση αυτή, οι καθυστερημένοι ήχοι θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερη στάθμη από τον αρχικό, γεγονός το οποίο μπορεί να συμβεί όταν ο δευτερογενής ήχος δεν προέρχεται από ανάκλαση αλλά από αναπαραγωγή, μέσω μιας μεγαφωνικής εγκατάστασης.

Πειράματα του Haas που έγιναν το 1950 έδειξαν ότι αν η ανάκλαση (ή ο αναπαραγόμενος ήχος), καθυστερεί από 5 έως 35 ms, για να είναι διακριτή ως ηχώ, θα πρέπει να έχει στάθμη γύρω στα 10 dB μεγαλύτερη από τον ήχο που τη δημιουργεί, ενώ όταν η καθυστέρηση είναι μεγαλύτερη των 100 ms το φαινόμενο υπάρχει ανεξάρτητα από την στάθμη του καθυστερημένου ήχου. Αν η στάθμη της καθυστερημένης ηχητικής ενέργειας, δεν είναι τόσο μεγάλη, απλώς ενισχύει τον αρχικό ήχο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **φαινόμενο Haas** (Haas effect). Το σχήμα 7.3.2 αριστερά δείχνει το φαινόμενο του Haas, δηλαδή την στάθμη πλάτους από αυτήν του εκπεμπόμενου ήχου που θα πρέπει να έχει η ανακλώμενη, έ

ώστε να αναγνωρισθεί ως ηχώ. Το σχήμα 7.3.2 δεξιά δείχνει το ποσοστό των ενοχλούμενων ακροατών, από την καθυστέρηση της ομιλίας λόγω του φαινομένου της ηχούς, με παράμετρο τη στάθμη της ηχούς σε σχέση με τον απ' ευθείας διαδιδόμενο ήχο. Ο ρυθμός ομιλίας είναι 5.3 συλλαβές /sec. Η ηχώ πάντως δεν προκαλεί αλλοίωση στο φάσμα του ήχου. Μαθηματικά, η ηχώ μπορεί να μελετηθεί με τις συναρτήσεις συσχέτισης και το Cepstrum (βλέπε κεφάλαιο 16).



Σχήμα 7.3.2 Φαινόμενο Haas.

### Πολλαπλή ηχώ (flutter echo)

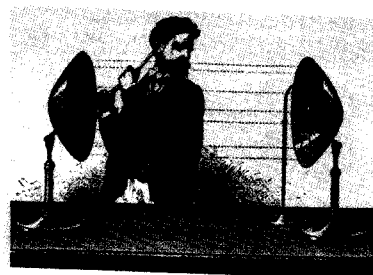
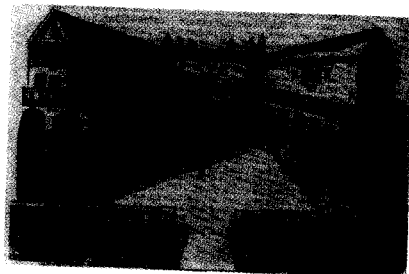
Όταν στο χώρο υπάρχουν παράλληλες επιφάνειες (όπως δάπεδο -οροφή), με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης, τότε ήχοι μικρής διάρκειας (παλμοί) όπως χειροκροτήματα, βηματισμοί στο δάπεδο, προκαλούν επαναλαμβανόμενη ηχώ. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πολλαπλή ηχώ (flutter echo).

Το φαινόμενο της πολλαπλής ηχούς, έχει παρατηρηθεί από πολύ νωρίς, και υπάρχουν πολλά παραδείγματα κτηρίων που παρουσιάζουν το φαινόμενο αυτό. Το σχήμα 7.3.3, δείχνει κατά τον Kircher (1601-1680), δύο διατάξεις με τις οποίες μπορούμε να πετύχουμε πολλαπλή ηχώ.

Μερικά παραδείγματα κατασκευών με πολλαπλή ηχώ είναι «Το αυτί του Διονύσου», η βίλλα Simmoneta στο Μιλάνο, η αίθουσα Honchido που βρίσκεται στο Νικό της Ιαπωνίας κ.α. Ο Kircher στο έργο του 'Phonurgia piuona', περιγράφει την ακουστική της 'villa Simonetta', που βρίσκεται στο Μιλάνο. Κατά τον Kircher αλλά και νεώτερους ακουστικούς (Tronchin 2008), όταν κάποιος στέκεται στο σημείο N, όπως φαίνεται στο σχέδιο που παραθέτει στο βιβλίο του ο Kircher (βλ εικόνα 7.3.4), και φωνάζει, η ηχώ επαναλαμβάνεται 24 -30 φορές. Ο ισχυρισμός αυτός επιβεβαιώθηκε από τον Tronchin. Ένα άλλο παράδειγμα με ανάλογο φαινόμενο, είναι η αποκαλούμενη σπηλιά του Διονύσου που βρίσκεται στην Σικελία.



Εικόνα 7.3.3 Έργο του Athanasius Kircher στο οποίο φαίνεται ο σχηματισμός πολλαπλής ηχούς, από την αλληπάλληλη ανάκλαση του ήχου από επίπεδες επιφάνειες.



Εικόνα 7.3.4 Αριστερά: Σχέδιο του Athanasius Kircher της Villa Simonetta (Kircher 1671), Δεξιά: Πρώμο πείραμα για την μελέτη της ηχητικής συγκέντρωσης από κοίλες επιφάνειες (Stone 1838).

### Ηχητική συγκέντρωση (Sound Focus- dead spot,) Ηχητικές σκιές

Όπως ακριβώς συμβαίνει με το φως, όταν το ηχητικό κύμα πέσει σε μία καμπύλη επιφάνεια, που η καμπυλότητά της είναι μεγάλη, σε σύγκριση με το μήκος κύματος (βλέπε εικόνα 7.3.4), τότε ο ήχος εστιάζεται σε ορισμένα σημεία, με αποτέλεσμα στα σημεία αυτά η στάθμη πίεσης να παίρνει μεγάλες τιμές (sound focus). Το φαινόμενο αυτό, ονομάζεται ακουστική συγκέντρωση (Stone 1838). Σε ορισμένα σημεία που ονομάζονται νεκρά σημεία (dead spot), η στάθμη να παίρνει εξαιρετικά μικρές τιμές, που είναι δυνατόν να μην ακούγεται καθόλου. Κατά τον σχεδιασμό συνεπώς καμπύλων επιφανειών (πχ τρούλοι εκκλησιών), θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο σχηματισμός ηχητικών συγκεντρώσεων.

Ένα άλλο φαινόμενο που επηρεάζει την ακουστική ενός χώρου, είναι το φαινόμενο της ηχητικής σκιάς. Όταν ο ήχος συναντά εμπόδια (πχ κολώνες, τοιχεία),

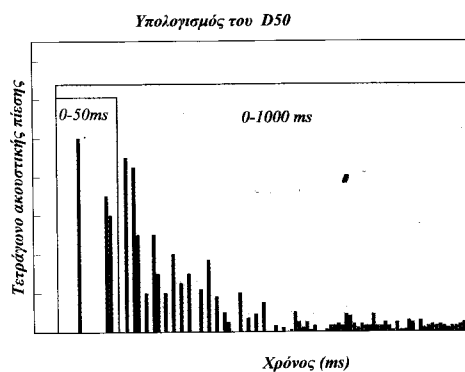
με μέγεθος πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος (όπως για παράδειγμα ήχοι υψηλών συχνοτήτων), τότε όπως ακριβώς το φως, αφήνει πίσω από αυτά την γεωμετρική σκιά του, με συνέπεια οι περιοχές αυτές να έχουν μειωμένη ηχητική στάθμη.

### 7.3.2 Ενεργειακοί δείκτες

Η μέτρηση των δεικτών αυτών, απαιτεί την χρήση μιας κρουστικής απόκρισης, που λαμβάνεται από μια ισότροπη ηχητική πηγή, και ένα ισότροπο μικρόφωνο.

#### Διακριτότητα (Definition)

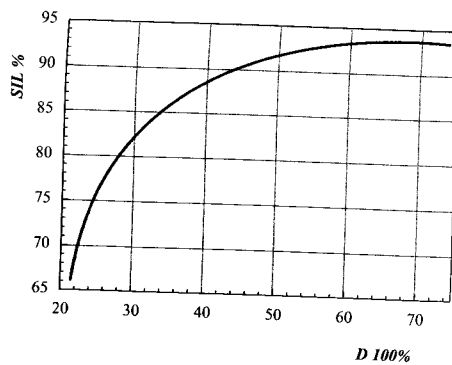
Η σημασία των ανακλάσεων (κυρίως των πρώιμων), στην ακουστική των χώρων ήταν γνωστή από το 1850. Παρότι ακούμε μαζί με τον πρωτογενή ήχο χιλιάδες ανακλάσεις, για την ομιλία μόνο αυτές που φθάνουν με χρονική καθυστέρηση μέχρι 50 ms, (βλέπε σχήμα 7.3.5) είναι χρήσιμες, διότι συμβάλουν με τον πρωτογενή ήχο, και τον ενισχύουν. Μελέτες έδειξαν ότι, οι ανακλάσεις που καθυστερούν από 10 έως 20 ms, μπορεί να είναι μέχρι και 10 dB ισχυρότερες από τον απευθείας ήχο. Η σημασία τους συνεπώς, είναι μεγάλη.



Σχήμα 7.3.5 Κρουστική Απόκριση χώρου διάρκειας 1000 ms. Στο σχήμα φαίνονται τα τμήματα της κρουστικής απόκρισης, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της διακριτότητας.

Η πρώτη προσπάθεια για τον ορισμό ενός αντικειμενικού μετρήσιμου κριτηρίου, που λαμβάνει υπόψη τις ανακλάσεις, έγινε από τον Thiele (1953), που χρησιμοποίησε τον όρο διακριτότητα (Definition, Deutlichkeit). Ο όρος αυτός ορίζεται από τη σχέση:

$$D = \frac{\int_0^{50ms} \{g(t)^2\} dt}{\int_0^{\infty} \{g(t)^2\} dt} 100\% = \frac{E_{0-50}}{E_{0-\infty}} 100\% \quad (7.3.1)$$



Σχήμα 7.3.6 Σχέση μεταξύ definition και αντιληπτότητας της ομιλίας.

Όπου  $g(t)$  η κρουστική απόκριση του χώρου στο σημείο λήψης. Το κάθε ολοκλήρωμα, αντιστοιχεί στην πυκνότητα ενέργειας ( $E$ ), του ήχου που καταφθάνει στο μικρόφωνο. Για τον προσδιορισμό της κρουστικής απόκρισης ενός χώρου, περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στο κεφάλαιο 17. Η χρονική στιγμή  $t=0$  αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή που εκπέμπεται ο κρουστικός ήχος από την πηγή. Η σχέση μεταξύ διακριτότητας, και αντιληπτότητας της ομιλίας μελετήθηκε από τον Bore. Ο Bore χρησιμοποίησε για την μελέτη του, σήματα παλμικού χαρακτήρα, διάρκειας 20 ms, για το εύρος των συχνοτήτων από 340- 3500 Hz. Σύμφωνα με τα πειράματα του Bore, μεταξύ της ποσότητας αυτής (definition), και της % αντιληπτότητας της ομιλίας, υπάρχει άμεση σχέση. Η σχέση αυτή δείχνεται στο διάγραμμα του σχήματος (7.3.6).

Ο Beranek (1965), χρησιμοποίησε την ποσότητα  $D$ , για τον καθορισμό του δείκτη αντήχησης ( $RD$ ), όπου γίνεται διαχωρισμός της απ' ευθείας διαδιδόμενης ηχητικής ενέργειας με τη διάχυτη

$$R_D = 10 \log \left( \frac{1-D}{D} \right) \quad (7.3.2)$$

Ο προσδιορισμός της διακριτότητας ενός χώρου καθώς, και των υπολοίπων ποσοτήτων που αναφέρονται παρακάτω περιγράφονται στους κανονισμούς ISO 3382.

### Ευκρίνεια (Clarity)

Ο Reichardt το 1972, για να χαρακτηρίσει την «διαφάνεια» (Transparency) της μουσικής, πρότεινε τον όρο ευκρίνεια, ή Clarity Index ή Klarheitmass που ορίζεται ως εξής:

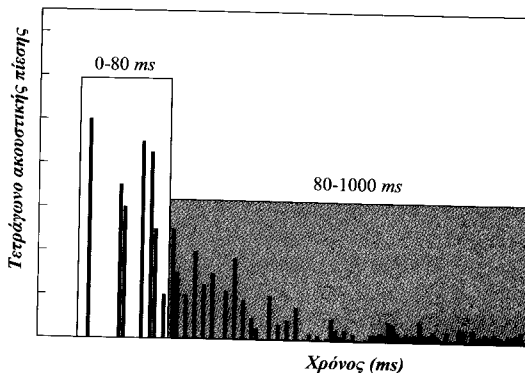
$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} \{g(t)^2\} dt}{\int_{80ms}^{\infty} \{g(t)^2\} dt} = 10 \log \frac{E_{0-80}}{E_{80-\infty}} \quad (7.3.3)$$

Όπου  $g(t)$  η κρουστική απόκριση του χώρου, και  $E_{0-80}$ ,  $E_{80-\infty}$  η ενέργεια που φθάνει στα πρώτα 80 ms και μετά τα 80 ms αντίστοιχα (βλ σχήμα 7.3.7). Με άλλα λόγια η ευκρίνεια είναι ανάλογη με τον λογάριθμο του λόγου του ήχου, που φθάνει τα πρώτα 80 ms, προς αυτόν που φθάνει μετά τα 80 ms. Όσο μεγαλύτερος ο χρόνος αυτός, τόσο καλύτερη η αντιληπτότητα της ομιλίας. Όταν ο χρόνος



ακρίθειας είναι 50 ms, τότε συμβολίζεται με  $C_{50}$ . Η βέλτιστη τιμή του δείκτη  $C_{50}$  για αίθουσες απαιτείται καλή αντιληπτότητα της ομιλίας είναι  $C_{50}=+9\text{dB}$ , ενώ η τιμή του  $C_{50}=-3\text{dB}$  θεωρείται για τους ίδιους χώρους πολύ κακή.

Υπολογισμός του  $C_{80}$



Σχήμα 7.3.7 Υπολογισμός ευκρίνειας από την κρουστική απόκριση του χώρου.

Κατω από ιδανικές συνθήκες, όταν ο ήχος φθίνει εκθετικά με τον χρόνο μετά τον μηδενισμό της πηγής (όπως αποδείχτηκε στο κεφάλαιο 6), η ευκρίνεια μπορεί να εκτιμηθεί από την σχέση:

$$C = 10 \log \left[ e^{\frac{1.104}{T}} - 1 \right] \tag{7.3.4}$$

Όπου  $T$  ο χρόνος αντήχησης

**Κριτήριο ηχούς (echo criterion)- Κεντρικός χρόνος**

Προτάθηκε από τους Dietsch και Kraak για τον αντικειμενικό προσδιορισμό της αντιληπτότητας της ομιλίας, και ορίζεται από την σχέση:

$$TS = \frac{\int_0^{\infty} t |g(t)|^n dt}{\int_0^{\infty} |g(t)|^n dt} \tag{7.3.5}$$

Όπου  $n=1$  για μουσική,  $n=2/3$  για ομιλία. Όταν  $n=2$  ο χρόνος αυτός ονομάζεται **κεντρικός χρόνος** (Centre time, Centre of gravity time). Ο εκθέτης  $n$  δίδει αυξημένη βαρύτητα στην παρουσία υψηλών, αλλά καθυστερημένων ανακλάσεων. Όσο μικρότερος ο  $TS$  τόσο καλύτερη η αντιληπτότητα της ομιλίας. Τυπικές τιμές του χρόνου αυτού είναι από 5 ms έως 1 s.

### 7.3.3 Δεικτες σκηνης

#### Οικειότητα (Intimacy)

Η παράμετρος αυτή είναι πολύ σπουδαία, τόσο για χώρους που προορίζονται για ομιλία, όσο και για μουσική. Η τιμή της, εξαρτάται από τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της λήψης του απ ευθείας ήχου, και των πρώτων ανακλάσεων. Ο χρόνος αυτός, δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 20 ms (για όπερα 30 ms). Η ποσότητα αυτή, έχει να κάνει με την απόσταση των ανακλαστικών επιφανειών. Μία καθυστέρηση 20 ms, αντιστοιχεί σε διαφορά δρόμου (ανακλώμενης - απ ευθείας διαδιδόμενης) 7 περίπου μέτρων. Αφίξεις μετά από ανακλάσεις σε πλευρές ενός κλειστού χώρου, έχουν μεγαλύτερη σπουδαιότητα από αυτές της οροφής. Η οικειότητα των χώρων μουσικής, πρέπει να είναι μικρότερη από 25 ms. Κατά τον Beranek, χώροι με χρόνο καθυστέρησης μεγαλύτερο από 45 ms, δεν παρουσιάζουν καμία οικειότητα.

#### Σύνολο (Ensemble)

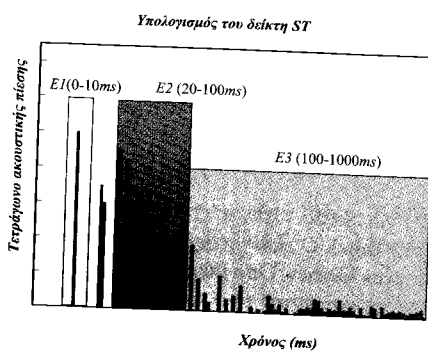
Ο όρος αυτός περιγράφει την δυνατότητα των μουσικών να ακούν τους εαυτούς τους και, να ακούγονται μεταξύ τους ώστε, να παίζουν σαν σύνολο. Το σύνολο καθορίζεται από το σχήμα του χώρου που βρίσκεται η ορχήστρα, τους ανακλαστές που βρίσκονται στην οροφή, ή τις πλευρικές επιφάνειες της σκηνης.

#### Δεικτης ST

Ο δείκτης αυτός, υπολογίζεται από τον λόγο της ενέργειας των πρώιμων ανακλάσεων, και του απ ευθείας διαδιδόμενου ήχου, όταν η κρουστική απόκριση μετριέται στην σκηνη, σε απόσταση ενός μέτρου από την πηγή. Ως πρώιμες ανακλάσεις, θεωρούνται αυτές που καταφθάνουν στον δέκτη τα πρώτα 10 ms, και καθυστερημένες μεταξύ 20 και 100 ms. Διακρίνεται σε πρώιμο ( $ST_{early}$ ), καθυστερημένο ( $ST_{late}$ ), και ολικό ( $ST_{total}$ ), δίδεται δε από τις σχέσεις

$$ST_{early} = \frac{E_2}{E_1} \quad ST_{late} = \frac{E_3}{E_1} \quad ST_{total} = \frac{E_2 + E_3}{E_1} \quad (7.3.6)$$

Οι πυκνότητες ενέργειας  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  που φαίνονται στο σχήμα, αντιστοιχούν στις ενέργειες των 10 πρώτων ms, από 20-100 ms, και από 100- το τέλος της κρουστικής απόκρισης (στο σχήμα θεωρείται ότι η κρουστική απόκριση διαρκεί 1000 ms).



Σχήμα 7.3.8 Υπολογισμός ST από την κρουστική απόκριση.

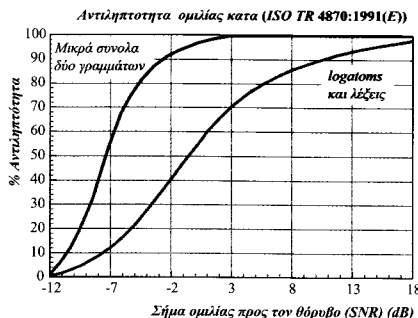
**Ισοστάθμιση και μείξη (Balance and Blend)**

Οι όροι αυτοί σχετίζονται με την διάταξη των οργάνων της ορχήστρας. Εκτός από την ακουστική της αίθουσας, η τιμή των όρων αυτών εξαρτάται και από το είδος της μουσικής.

**7.3.4 Ποιότητα ομιλίας**

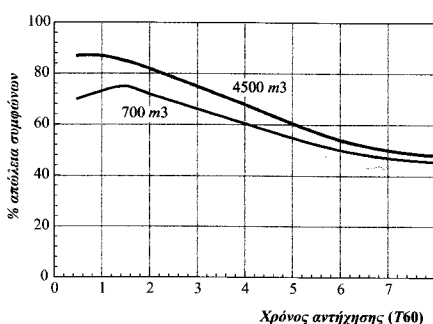
**Αντιληπτότητα των συλλαβών (Syllable Intelligibility)**

Η ποσότητα αυτή εκφράζει την «ποιότητα» της ομιλίας. Σύμφωνα με τους παλαιότερους κανονισμούς ISO/TR 3352 -1974(E), αντιληπτότητα της ομιλίας, ορίζεται ως το ποσοστό (%) του αριθμού των συλλαβών, που γίνονται αντιληπτές από ένα μέσο ακροατή, προς το σύνολο των συλλαβών που εκφωνούνται, κατά την διάρκεια συνήθους συνομιλίας. Η πληροφορία κρίνεται ικανοποιητική, όταν το ποσοστό είναι τουλάχιστον 95%. Η αντιληπτότητα, όπως δείχνει και το σχήμα 7.3.9 εξαρτάται από δύο κυρίως παράγοντες: από το λόγο σήμα / θόρυβο (SNR), και τον χρόνο αντήχησης ( $T_{60}$ ) του χώρου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ως σήμα θεωρείται το σήμα της ομιλίας. Η μέτρηση της αντιληπτότητας γίνεται ως εξής: Στο υπό έλεγχο περιβάλλον, εκπέμπεται μια ακολουθία από συλλαβές χωρίς νόημα (logatoms). Οι ακροατές τοποθετούνται σε διάφορες θέσεις, και τους ζητείται να γράψουν ότι έχουν ακούσει. Το ποσοστό των σωστών συλλαβών που έχουν γίνει αντιληπτές, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντιληπτότητας συλλαβών.



Σχήμα 7.3.9 Σχέση % αντιληπτότητας σε σχέση με τον λόγο SNR.

**Απώλεια συμφώνων (AL) (Articulation Loss)**



Σχήμα 7.3.10 Σχέση Al και T60.

ομιλία, όσο και  
της του απ ευ-  
μεγαλύτερος από  
ανακλαστικών  
της - απ ευθείας  
κλειστού χώρου,  
μουσικής, πρέπει  
μεγαλύτερο από

και, να ακού-  
χρήμα του χώρου  
πλευρικές επι-

ων, και του απ  
απόσταση ενός  
στον δέκτη τα  
early), καθυστε-

(7.3.6)

έργειες των 10  
χρήμα θεωρείται

Η ποσότητα αυτή, μετρά το ποσοστό των συμφώνων που δεν αντιλαμβάνεται ο μέσος ακροατής και προτάθηκε από τον Reutz. Ο Reutz μετέβαλε τον χρόνο αντήχησης, την απόσταση από την πηγή, και τον θόρυβο βάθους, και μετρήσε την απώλεια συμφώνων. Με βάση τα πειράματα του πρότεινε την εμπειρική σχέση:

$$\% AI_{cons} = \frac{200(rT_{60})^2}{V} \quad (7.3.7)$$

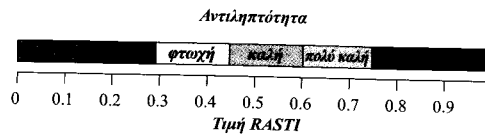
Όπου  $r$  η απόσταση από την πηγή,  $T_{60}$  ο χρόνος αντήχησης, και  $V$  ο όγκος του χώρου.

Η παραπάνω σχέση ισχύει για αποστάσεις από την πηγή μέχρι την κρίσιμη απόσταση  $r_c$ , που δίνεται από την σχέση

$$r_c = 0.21 \sqrt{V/T_{60}} \quad (7.3.8)$$

Μετά από την απόσταση αυτή η απώλεια συμφώνων είναι σταθερή ίση με  $9T_{60}$ .

### Δείκτης STI - RASTI



Σχήμα 7.3.11 Ποιότητα ομιλίας.

Ο δείκτης *STI* (*Speech Transmission Index*), είναι ένας αντικειμενικός δείκτης, που μετρά το ποσοστό των σωστών συλλαβών που αντιλαμβάνεται ο μέσος ακροατής, λαμβάνοντας υπόψη του ταυτόχρονα τον θόρυβο βάθους, και τον χρόνο αντήχησης. Οι τιμές που παίρνει είναι μεταξύ 0 και 1. Ο υπολογισμός του δείκτη *STI* καθώς και του δείκτη *RASTI* (*Rapid Speech Transmission Index*) που αποτελεί μια προσέγγισή του, αναπτύσσεται στο παράρτημα Α. Το σχήμα 7.3.11 χαρακτηρίζει την ποιότητα της ομιλίας ανάλογα με τον δείκτη *STI* ή *RASTI*. Προσέγγιση του δείκτη *STI* είναι και ο δείκτης *STITEL*, που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ποιότητας των τηλεπικοινωνιών και ορίζεται ανάλογα με τον δείκτη *RASTI*.

### 7.3.5 Στάθμες

Η μέτρηση των δεικτών αυτών απαιτεί μια ζωνοδιαβατή κρουστική απόκριση

### Λόγος σήματος προς θόρυβο(SNR)

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο *SNR* (Signal to noise ratio ή Speech to noise ratio, όταν πρόκειται για ομιλία), ορίζεται από τον λογάριθμο της ηχητικής πίεσης του σήματος, προς αυτήν του θορύβου:

$$SNR = 10 \log \frac{P_{sig}^2}{P_{noise}^2} = 10 \log \frac{P_{sig}^2 / P_{ref}^2}{P_{noise}^2 / P_{ref}^2} = 10 \log \frac{P_{sig}^2}{P_{ref}^2} - 10 \log \frac{P_{noise}^2}{P_{ref}^2} = L_{sig} - L_{noise} \quad (7.3.9)$$

Όπου  $p_{sig}$ ,  $p_{noise}$  οι ηχητικές πιέσεις του σήματος, και του θορύβου αντίστοιχα.

Ο λόγος SNR ισούται με την διαφορά της στάθμης του σήματος, μείον την στάθμη του θορύβου βάθους, και είναι δυνατόν να παίρνει θετικές ή αρνητικές τιμές. Ο λόγος SNR, παίζει πολύ σπουδαίο ρόλο στην αντηληπτότητα της ομιλίας. Όταν ο λόγος SNR είναι μεγαλύτερος από 10 dB, η επικοινωνία θεωρείται ικανοποιητική. Οι κανονισμοί ISO 9921-1 κατατάσσουν την αντηληπτότητα της ομιλίας (speech intelligibility) με βάση τον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 7.3.1** Χαρακτηρισμός αντηληπτότητας ομιλίας ανάλογα με τον λόγο SNR

Λόγος σήματος προς θόρυβο (dB)	Αντηληπτότητα ομιλίας
<-6	Ανεπαρκής
-6 έως 3	Μη ικανοποιητική
-3 έως 0	Επαρκής
0 έως 6	Ικανοποιητική
6 έως 12	Καλή
12 έως 18	Πολυ καλή
>18	Εξαιρετική

Λόγος κρουστικής απόκρισης προς θόρυβο

Ορίζεται ακριβώς όπως ο λόγος σήματος προς τον θόρυβο με την διάφορα ότι στον αριθμητή υπάρχει η μέγιστη τιμή της κρουστικής απόκρισης.

$$SIR = 10 \log \frac{p_{peak}^2}{p_{noise}^2} = L_{peak} - L_{noise} \tag{7.3.10}$$

Για να είναι αξιόπιστη η μέτρηση των χρόνων αντήχησης, η τιμή του λόγου αυτού πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 35 dB για τον  $T_{20}$ , και 45 dB για τον  $T_{30}$ . Καλές μετρήσεις χαρακτηρίζονται αυτές που έχουν λόγο SIR από 35 μέχρι 60 dB

Παράγοντας στιβαρότητας πηγής (Strength factor)

Όπως είναι γνωστό (βλ κεφ. 6) η στάθμη σε ένα σημείο ενός κλειστού χώρου, προέρχεται αθροιστικά από τον απ ευθείας διαδιδόμενο ήχο, και το ήχο που προέρχεται από τις διαφορετικές ανακλάσεις στα τοιχώματα του χώρου. Οι ανακλάσεις αυτές ενισχύουν τον ήχο, και η ενίσχυση αυτή εξαρτάται μόνο από την γεωμετρία του χώρου, καθώς και τους συντελεστές απορρόφησης των διαφόρων επιφανειών. Για τον ποσοτικό προσδιορισμό της ενίσχυσης αυτής, χρησιμοποιούμε τον παράγοντα στιβαρότητας (strength factor), που προκύπτει αν από την συνολικά μετρούμενη στάθμη στον χώρο, αφαιρέσουμε την στάθμη που αντιστοιχεί στην απ ευθείας διαδιδόμενη ηχητική ενέργεια. Η στάθμη αυτή προσδιορίζεται, αν μετρήσουμε σε ανηχοικό χώρο την στάθμη που εκπέμπει η πηγή, μετρούμενη σε απόσταση 10 μέτρων από αυτή. Μαθηματικά ορίζεται από την σχέση:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} \{g(t)^2\} dt}{\int_0^{\infty} \{g_A(t)^2\} dt} \tag{7.3.11}$$

Όπου  $g(t)$  η κρουστική απόκριση στον υπό μέτρηση χώρο

Και  $g_i(t)$  η κρουστική απόκριση της πηγής σε ανηχοικό χώρο (με πλήρη απορρόφηση), σε απόσταση 10 μέτρα από την πηγή

Αποδεικνύεται ότι ο παράγοντας στιβαρότητας μπορεί να εκτιμηθεί από την σχέση:

$$G = 10 \log \frac{T_{60}}{V} + 45 \text{dB} \quad (7.3.12)$$

### 7.3.6 Ευρυχωρία (spaciousness)

Οι δείκτες που μετρούν τη Ευρυχωρία (spaciousness), σχετίζονται με την χωρική εντύπωση, και συνήθως χρησιμοποιούνται σε αίθουσες μουσικής, και απαιτούν την ταυτόχρονη μέτρηση δύο κρουστικών αποκρίσεων.

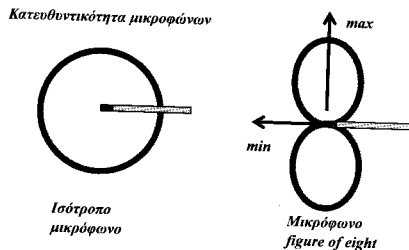
#### Πλευρικές ανακλάσεις (LEF)

Ο δείκτης *LEF* (lateral energy fraction) εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας από τις πλευρικές ανακλάσεις, που φθάνουν στον ακροατή τα πρώτα 80 ms, σε σχέση με την απευθείας ενέργεια που εκπέμπει η πηγή. Ο δείκτης *LEF* προσδιορίζεται από την σχέση

$$LEF = \frac{\int_0^{80 \text{ms}} g_i^2(t) dt}{\int_0^{80 \text{ms}} \{g^2(t)\} dt} \quad (7.3.13)$$

Όπου  $g_i(t)$  και  $g(t)$  οι κρουστικές αποκρίσεις που αντιστοιχούν στις πλευρικές ανακλάσεις και στον συνολικό ήχο αντίστοιχα.

Η μέτρηση του δείκτη αυτού γίνεται με την βοήθεια δύο μικροφώνων, εκ των οποίων το ένα είναι ισότροπο (μετρά την  $g(t)$ ), και το άλλο έχει διάγραμμα ακτινοβολίας σχήματος 8 (figure of eight), όπως φαίνεται στο σχήμα (7.3.13) και που μετρά την  $g_i(t)$ . Το δεύτερο μικρόφωνο τοποθετείται έτσι ώστε η διεύθυνση της ελάχιστης ευαισθησίας, να είναι προς το ισότροπο μικρόφωνο.



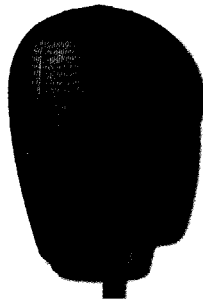
Σχήμα 7.3.13 Κατευθυντικότητα μικροφώνων για την μέτρηση του *LEF*.

#### Δείκτης IACC (Interaural Cross-correlation Coefficient)

Ο δείκτης αυτός μετρά την διαφορά των δύο ήχων που φθάνουν στα αυτιά των ακροατών, και χρησιμοποιείται στην αρχιτεκτονική ακουστική, για τον ποσοτικό προσδιορισμό της αίσθησης της χωρικής κατανομής, και της ποιότητας του ήχου. Αν  $p_R(t)$  και  $p_L(t)$  τα ηχητικά σήματα που φθάνουν στο δεξιό και αριστερό αυτί αντίστοιχα, τότε ο δείκτης *IACC* ορίζεται από την σχέση (Y Ando 1985):

$$IACC(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t)p_R(t+\tau) dt}{\left(\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t)p_R^2(t+\tau) dt\right)^{1/2}} \quad (7.3.14)$$

Όταν οι δύο ήχοι είναι ίδιοι, ο IACC παίρνει την μέγιστη τιμή 1. Αν οι δύο ήχοι δεν έχουν καμία σχέση μεταξύ τους, τους παίρνει την τιμή 0 (βλ κεφ 16). Για καλή ακουστική, η τιμή του IACC πρέπει να είναι μικρότερη του 0.4. Όταν τα όρια της ολοκλήρωσης είναι, 5 ms και 80 ms, ο IACC συμβολίζεται με IACCE, και μετρά την «ευρυχωρία» (spaciousness). Όταν τα όρια της ολοκλήρωσης είναι 80 ms, και 3 s συμβολίζεται με IACCL και μετρά τον βαθμό διάχυσης (diffuseness) του πεδίου αντήχησης. Η μέτρηση του δείκτη αυτού απαιτεί την χρήση ομοιώματος κεφαλής (Dummy Head), στην οποία τοποθετηθεί δύο μικρόφωνα, ένα σε κάθε αυτί.

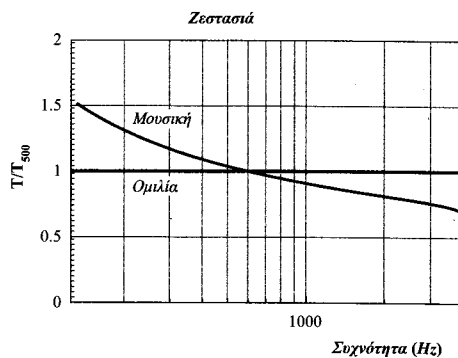


Σχήμα 7.3.14 Ομοίωμα κεφαλής (dummy head) για την μέτρηση του IACC.

### 7.3.7 Χρωματισμός (Coloration)

Όταν η καθυστέρηση των ανακλώμενων ήχων είναι μικρή (της τάξης των 10 ms), η χροιά των ήχων αλλάζει στη συμβολή των φράσεων. Το φαινόμενο αυτό, ονομάζεται χρωματισμός.

### Ζεστασιά (Warmth)



Σχήμα 7.3.15 Σύγκριση σχετικών χρόνων αντήχησης για μουσική και ομιλία.

Η ηχητική ζεστασιά ενός χώρου, εξαρτάται από την τιμή του χρόνου αντήχησης (βλ. παρακάτω), των χαμηλών και μέσων συχνοτήτων. Όταν ο χώρος προορίζεται για μουσική, στις χαμηλές συχνότητες ο χρόνος αντήχησης θα πρέπει να είναι μεγάλος, και στις ψηλότερες μικρός. Το σχήμα 7.3.15, δίδει την τιμή του λόγου του χρόνου αντήχησης για μία δεδομένη συχνότητα, συναρτήσει της συχνότητας, προς τον αντίστοιχο χρόνο, που αντιστοιχεί στα 500Hz, για ένα δεδομένο χώρο ανάλογα με την χρήση του, για μουσική ή ομιλία.

Ο χρωματισμός και η ζεστασιά μπορούν ποσοτικά να εκφραστούν και με τους δείκτες Bass ratio (BR) και Treble ratio (TR), που ορίζονται από τις σχέσεις:

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} \quad TR = \frac{T_{2000} + T_{4000}}{T_{500} + T_{1000}} \quad (7.3.15)$$

Όπου  $T$  ο χρόνος αντήχησης στην αντίστοιχη συχνότητα

### 7.3.8 Αντήχηση

Η αντήχηση μετρείται με τους χρόνους αντήχησης, που αποτελούν από τις σπουδαιότερες παραμέτρους που σχετίζονται με την ακουστική των κλειστών χώρων. Οι βασικότεροι χρόνοι που χρησιμοποιούνται είναι: οι  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ , EDT και περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 6. Οι χρόνοι  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$  δίδουν πληροφορίες για τον ρυθμό μείωσης του διάχυτου ηχητικού πεδίου, ενώ ο EDT περιγράφει με καλύτερο τρόπο την μείωση της αρχικής, (και υψηλότερης στάθμης), ηχητικής ενέργειας, και σχετίζεται περισσότερο με την μείωση της αντιληπτότητας της ομιλίας. Τυπικές τιμές του χρόνου  $T_{10}$  είναι από 5ms έως 10 s, του  $T_{20}$  και  $T_{30}$  από 100ms έως 10 s, και του EDT από 50ms έως 5 s.

### 7.3.9 Συνιστώμενες τιμές δεικτών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο σημαντικότερος δείκτης που μετρά την ακουστική ποιότητα των χώρων, είναι ο χρόνος αντήχησης. Η επιλογή των υλικών σε κάποιο κλειστό χώρο, γίνεται με σκοπό την βελτίωση του χρόνου αντήχησης. Ο χρόνος αντήχησης, επηρεάζει και τους υπόλοιπους δείκτες σε ένα μεγάλο βαθμό. Ωστόσο είναι δυνατόν να βελτιωθούν περαιτέρω και οι υπόλοιποι δείκτες, με σωστό προσανατολισμό των επιφανειών του χώρου.

Ο πίνακας 7.3.2 δίνει τις βέλτιστες τιμές μερικών δεικτών, για δύο κατηγορίες αιθουσών: Χώρους για μουσική, και χώρους για συμφωνικές ορχήστρες. Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται σε κενές αίθουσες, διότι οι μετρήσεις παρουσία ακροατών είναι συνήθως δύσκολο να πραγματοποιηθούν.

Πίνακας 7.3.2 Βέλτιστες τιμές ορισμένων δεικτών

Δείκτης	Μουσική	Συμφωνικές ορχήστρες
Μέγεθος/αριθμός θέσεων	2500 m <sup>3</sup> /300	25000 m <sup>3</sup> /2000
Χρόνος αντήχησης ( $T_{60}$ )	1.5s	2-2.4s
Πρώτος χρόνος αντήχησης (EDT)	1.4s	2.2s
Παράγοντας στιβαρότητας (G)	10dB	3dB
Ευκρίνεια ( $C_{80}$ )	3dB	-1dB
Πλευρικές ανακλάσεις (LEF)	0.15-0.20	0.20-0.25
IACC	0.6	0.7