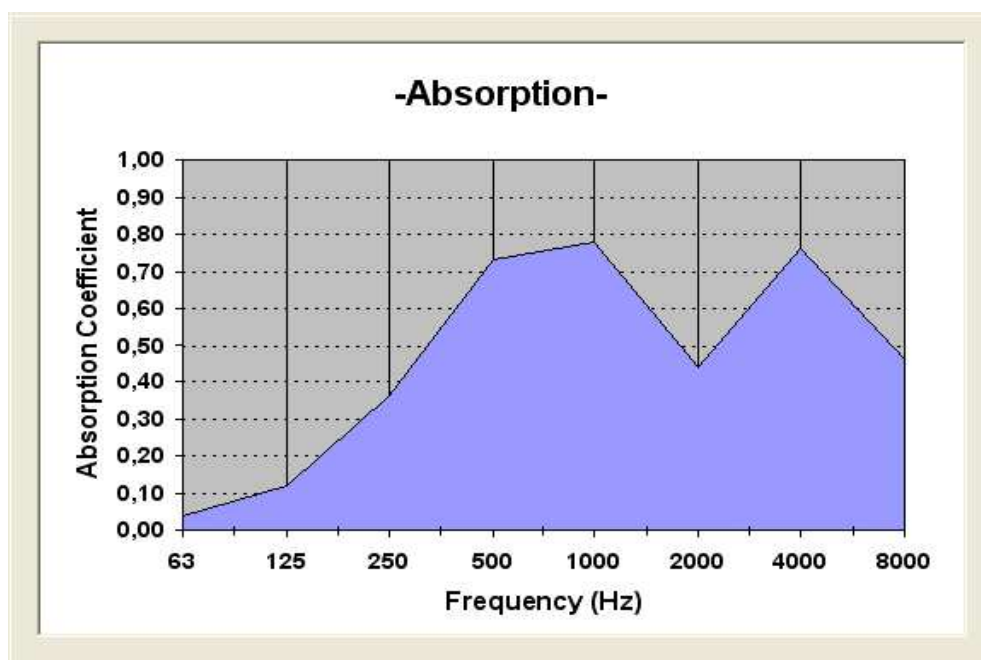


**Α.Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ  
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ  
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ : “Μελέτη της Τεχνολογίας Ηχοαπορρόφησης και Ανάπτυξη  
Λογισμικού Πρόβλεψης του Συντελεστή Απορρόφησης Σύνθετων  
Ηχοαπορροφητικών Διατάξεων”**



**Επιβλέπων Καθηγητής : Σηφάκης Μηνάς**

**Σπουδαστής : Κάσινος Γιώργος**

## Σύνοψη

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η θεωρητική μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς απλών και σύνθετων απορροφητών και η ανάπτυξη λογισμικού υπολογισμού του συντελεστή απορρόφησης.

Αναπτύχθηκε εφαρμογή σε γραφικό περιβάλλον (γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic) για τον υπολογισμό της εμπίδησης και του συντελεστή απορρόφησης σύνθετων ηχοαπορροφητικών διατάξεων. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας και τη βαθμονόμηση του λογισμικού πραγματοποιήθηκε εφαρμογή σε ηχοαπορροφητικές διατάξεις που κυκλοφορούν στο εμπόριο και σύγκριση των προβλέψεων με τα αντίστοιχα πιστοποιητικά εργαστηριακών μετρήσεων. Παρατηρήθηκε πολύ ικανοποιητική συμφωνία στο πλείστο των περιπτώσεων.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Σηφάκη Μηνά για την πέραν του καθήκοντος βοήθεια, και τους Ευάγγελο Παπαευαγγελίου και Φοίβο Περάκη για την φιλοξενία – συγκατοίκηση κατά τη διάρκεια των τελευταίων (πολλών) μηνών.

## Περιεχόμενα

1. Σκοπός της πτυχιακής εργασίας
2. Απορρόφηση ήχου – διάχυση
  - 2.1. Ανάκλαση – διάδοση
  - 2.2. Διάχυση του ήχου
  - 2.3. Εμπέδηση
  - 2.4 Συντελεστής Απορρόφησης
    - 2.4.1 Μέτρηση συντελεστή απορρόφησης
3. Υλικά ηχοαπορρόφησης
  - 3.1 Εισαγωγή - Πώς απορροφάται ο ήχος
  - 3.2 Πορώδη Υλικά
    - 3.2.1 Λεπτό στρώμα πορώδους υλικού μπροστά από συμπαγή τοίχο
    - 3.2.2 Μοντέλα για την Εμπέδηση ενός πορώδους υλικού
    - 3.2.3 Φυσικά χαρακτηριστικά ενός πορώδους υλικού
      - 3.2.3.1 Porosity
      - 3.2.3.2 Αντίσταση Ροής (Flow Resistivity)
      - 3.2.3.3 Tortuosity
  - 3.3 Απορροφητικά τύπου μεμβράνης
    - 3.3.1 Χαρακτηριστικά που καθορίζουν την απορροφητική ικανότητα μιας Μεμβράνης
      - 3.3.1.1. Πυκνότητα
      - 3.3.1.2. Σταθερά του Young
      - 3.3.1.3 Λόγος του Poisson
      - 3.3.1.4 Παράγοντας Απώλειας(Loss Factor)
  - 3.4 Συντονιστές – Διάτρητες επιφάνειες
    - 3.4.1 Χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την απορρόφηση μιας Διάτρητης Επιφάνειας
      - 3.4.1.1 Πυκνότητα
      - 3.4.1.2 Ενεργό μήκος μίας οπής

- 3.4.1.3 Λόγος του Mach
- 3.4.1.4 Ακουστική Αντίσταση

- 4. Σύνθετοι Απορροφητές
  - 4.1 Υπολογισμός εμπέδησης και απορρόφησης πολλαπλών στρωμάτων υλικώνΕφαρμογή: Τοίχος – Αέρας – Πορώδες – Διάτρητη Επιφάνεια
- 5. Περιγραφή προγράμματος
  - 5.1 Μενού
  - 5.2 Absorbing Materials
  - 5.3 Add Material – Remove Material
  - 5.4 Properties
  - 5.5 Calculate - Reset
- 6. Σύγκριση Αποτελεσμάτων
  - 6.1 Διάτρητη Επιφάνεια
  - 6.2 Απορροφητής Μεμβράνης
  - 6.3 Πορώδες Υλικό
  - 6.4 Συμπεράσματα
- 7. Παραρτήματα
  - 7.1 Παράρτημα Α: Σχέσεις Υπολογισμού
  - 7.2 Παράρτημα Β: Κώδικας Visual Basic
- 8. Βιβλιογραφία

## Συμβολισμοί

$A$  = εμβαδό επιφάνειας / διατομής  
 $\alpha$  = συντελεστής απορρόφησης  
 $\alpha_{\max}$  = Μέγιστη τιμή του συντελεστή απορρόφησης  
 $B$  = μέτρο ακαμψίας μεμβράνης( Bending Stiffness)  
 $b$  = πλάτος σχισμής σε μία διάτρητη επιφάνεια  
 $c$  = ταχύτητα του ήχου  
 $c_0$  = Ταχύτητα του ήχου στον αέρα (343 m/s)  
 $d$  = παράγοντας διάχυσης – διάμετρος οπής διάτρητης πλάκας  
 $E$  = σταθερά του Young  
 $f$  = Συχνότητα  
 $f_0$  = Συχνότητα συντονισμού  
 $g$  = παράγοντας γεωμετρικής ανάκλασης  
 $h$  = Porosity πορώδους υλικού  
 $j = \sqrt{-1}$   
 $k$  = κυματάριθμος( $\omega/c$ )  
 $k_f$  = Σύνθετος συντελεστής Διάδοσης πορώδους υλικού  
 $l$  = μήκος σωλήνα, μήκος λαιμού Helmholtz, μήκος οπής μιας διάτρητης πλάκας  
 $M$  = συντελεστής(λόγος) του Mach  
 $m$  = μάζα υλικού  
 $P$  = ποσοστό διάτρησης σε μία επιφάνεια  
 $R_f$  = αντίσταση ροής  
 $r$  = συντελεστής ανάκλασης  
 $Swr$  = ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη πίεση του ήχου  
 $T$  = Tortuosity πορώδους υλικού  
 $V$  = όγκος  
 $V_v$  = Όγκος του κενού χώρου μέσα σε ένα πορώδες υλικό  
 $V_t$  = Συνολικός όγκος ενός πορώδους υλικού  
 $W_r$  = ανακλώμενη από μια επιφάνεια Ηχητική Ενέργεια  
 $W_i$  = προσπίπτουσα σε μία επιφάνεια ηχητική ενέργεια  
 $W_t$  = η διαδιδόμενη σε δύο μέσα ηχητική ενέργεια  
 $W_a$  = η Ηχητική ενέργεια που απορροφάται από ένα υλικό  
 $w_0$  = το πάχος ενός στρώματος αέρα – απόσταση υλικού από τοίχο  
 $Z_m$  = μηχανική εμπέδηση  
 $Z$  = ειδική ακουστική εμπέδηση  
 $Z_d$  = ακουστική εμπέδηση  
 $Z_0$  = Εμπέδηση του αέρα  
 $Z'$  = Εμπέδηση λεπτού στρώματος πορώδους υλικού  
 $Z_{tot}$  = Εμπέδηση στην επιφάνεια ενός σύνθετου απορροφητή  
 $Z_f$  = Εμπέδηση ενός πορώδους υλικού  
 $Z_s$  = Εμπέδηση Μεμβράνης  
 $Z_p$  = Εμπέδηση Διάτρητης πλάκας  
 $Z_1$  = Εμπέδηση επιφάνειας που τοποθετείται πάνω σε μία άλλη επιφάνεια για να δημιουργηθεί ένας σύνθετος απορροφητής.

$Z_2$  = Εμπέδηση Επιφάνειας πάνω στην οποία τοποθετείται υλικό για να δημιουργηθεί σύνθετος απορροφητής.

$\eta$  = Παράγοντας απώλειας

$\Lambda$  = μήκος ιξώδους (Allard – Johnson)

$\Lambda'$  = θερμικό μήκος (Allard – Johnson)

$\nu$  = λόγος του Poisson

$\rho$  = Πυκνότητα

$\rho_0$  = Πυκνότητα του αέρα ( $1,21 \text{ kg/m}^3$ )

$\tau$  = συντελεστής διάδοσης

$\omega$  = Κυκλική συχνότητα

## Κεφάλαιο 1

### Εισαγωγή – Περιγραφή της πτυχιακής

Η έννοια της ηχοαπορρόφησης και του συντελεστή απορρόφησης αναφέρεται στην ιδιότητα που έχουν τα υλικά να απορροφούν ένας μέρος της ηχητικής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνειά τους. Παρότι όλα τα υλικά έχουν κάποιο βαθμό ηχοαπορρόφησης με τον όρο τεχνολογία ηχοαπορρόφησης αναφερόμαστε συνήθως σε διατάξεις ειδικά σχεδιασμένες για την βελτιστοποίηση της ηχοαπορροφητικής τους ικανότητας και ως κλάδος αναπτύχθηκε κυρίως στο δεύτερο μισό του 20<sup>ου</sup> αιώνα.

Δεδομένου ότι η δημιουργία ενός ευχάριστου ακουστικού περιβάλλοντος σε ένα περατωμένο χώρο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη της κατάλληλης ποσότητας (και την ορθή τοποθέτηση) ηχοαπορροφητικών υλικών στο χώρο η τεχνολογία ηχοαπορρόφησης βρίσκει ευρύτατη εφαρμογή στους περισσότερους τομείς της κατασκευής και της βιομηχανίας.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές αναφορές και μελέτες (θεωρητικές και πειραματικές) σχετικά με τους κύριους τύπους ηχοαπορροφητών και τον τρόπο λειτουργίας τους αλλά υπάρχουν πολύ λίγες αναφορές σε ότι αφορά στο συνδυασμό διαφορετικών υλικών και τη δημιουργία σύνθετων απορροφητών και διατάξεων. Υπάρχουν βεβαίως εργαστηριακές μετρήσεις για το συντελεστή απορρόφησης συγκεκριμένων συνθέτων ηχοαπορροφητικών διατάξεων αλλά εκτός του ότι αυτές οι μετρήσεις είναι λίγες, καλύπτουν ένα περιορισμένο εύρος περιπτώσεων σε ότι αφορά το πάχος, την πυκνότητα, την πιθανή διάτρηση του υλικού ή το διάκενο του αέρα.

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας, δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει ο ίδιος τα υλικά που επιθυμεί καθώς να καθορίσει τις τιμές των φυσικών τους χαρακτηριστικών, να πραγματοποιήσει συνδυασμούς υλικών και να μελετήσει την επίδραση τους στην ηχοαπορροφητική ικανότητα της συνολικής διάταξης.

Σημειώνεται ότι αντίστοιχα λογισμικά υπάρχουν ελάχιστα παγκοσμίως (με πιο γνωστό το WINFLAG του Vigran ) και ότι, μέχρι σήμερα, δεν έχει καθιερωθεί η χρήση κανενός εξ' αυτών από την ακουστική κοινότητα.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας και συγκεκριμένα στο κεφάλαιο δυο εισάγονται οι βασικές έννοιες που απαιτούνται για την κατανόηση της ακουστικής συμπεριφοράς των υλικών όπως η ανάκλαση, η εμπέδηση, η διάχυση και η απορρόφηση του ήχου.

Το τρίτο κεφάλαιο χωρίζεται σε τρεις ενότητες που αντιπροσωπεύουν τους τρεις βασικούς τύπους ηχοαπορροφητικών υλικών: πορώδη υλικά, απορροφητές μεμβράνης και διάτρητες πλάκες. Αναλύεται ο μηχανισμός απορρόφησης του κάθε υλικού, παρουσιάζονται σχέσεις για τον υπολογισμό της εμπέδησης, παρατίθενται γραφικές παραστάσεις για το συντελεστή απορρόφησης και πίνακες που περιέχουν στοιχεία για τις ιδιότητες που επηρεάζουν την απορροφητική ικανότητα των υλικών.

Το σημαντικότερο τμήμα του πρώτου μέρους της πτυχιακής εργασίας συγκεντρώνεται στο τέταρτο κεφάλαιο όπου αναλύεται η μέθοδος υπολογισμού της εμπέδησης και κατ' επέκταση της απορρόφησης, στην επιφάνεια ενός σύνθετου απορροφητή αποτελούμενου από πολλαπλά στρώματα απορροφητικών



υλικών. Αναφέρονται οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται και παρατίθεται παράδειγμα συνδυασμού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται η λειτουργία του λογισμικού «ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ 1.1» που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας και επεξηγείται το κάθε στάδιο της διαδικασίας υπολογισμού με σχήματα, παραπομπές σε παραγράφους της εργασίας και διαγράμματα ροής.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των προβλέψεων του λογισμικού «ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ 1.1» με αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων σε πραγματικές κατασκευές. Παρατηρήθηκε ότι στα πορώδη υλικά και στους διάτρητους απορροφητές, ο βαθμός ακριβείας των αποτελεσμάτων του προγράμματος είναι πού ικανοποιητικός ενώ στους απορροφητές μεμβράνης υπάρχει κάποια απόκλιση από τις μετρήσεις.

Η πτυχιακή εργασία ολοκληρώνεται με την ανακεφαλαίωση των βασικών συμπερασμάτων που εξήχθησαν και με προτάσεις για πιθανές βελτιώσεις και μελλοντική συνέχιση της εργασίας αυτής.

Στα παραρτήματα τέλος παρατίθεται συγκεντρωτικά όλοι οι τύποι υπολογισμού καθώς επίσης και το κύριο μέρος του κώδικα προγραμματισμού της εφαρμογής.

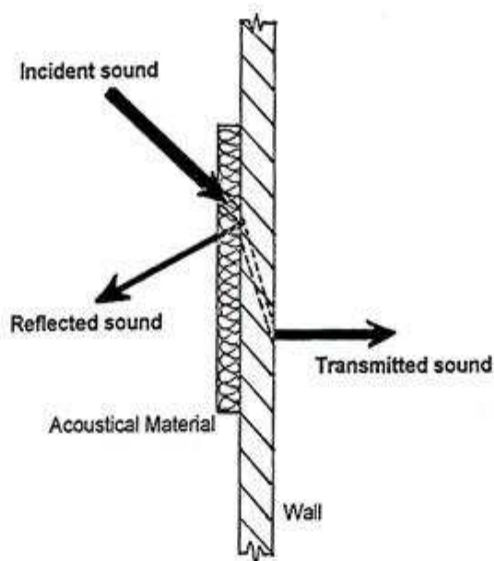
.

## Κεφάλαιο 2

### Θεωρία - Ορισμοί

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η προετοιμασία του αναγνώστη για την κατανόηση της πτυχιακής εργασίας και η εξοικείωση του με στοιχειώδεις όρους της ακουστικής. Συγκεκριμένα, θα αναφερθούμε στην ανάκλαση και διάδοση ενός ηχητικού κύματος, στη διάχυση του ήχου, στον συντελεστή απορρόφησης και τις μεθόδους υπολογισμού του, και την εμπίδηση

### 2.1 Ανάκλαση - Διάδοση



Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μια επιφάνεια διαχωρισμού δύο μέσων, ένα μέρος της ενέργειας που μεταφέρει ανακλάται, ενώ ένα άλλο μέρος απορροφάται ή διαδίδεται μέσω της επιφάνειας προς την άλλη πλευρά. Για την μελέτη της διάδοσης και την ανάκλασης του ήχου ορίζουμε τους παρακάτω συντελεστές[2]:

1. Συντελεστής ανάκλασης  $r$ .

Είναι ο λόγος της ανακλώμενης ( $W_r$ ) ηχητικής ενέργειας από την επιφάνεια προς, την προσπίπτουσα ( $W_i$ ):

$$r = \frac{W_r}{W_i} = \frac{I_r}{I_i} \quad (2.1.1)$$

για κάθετη πρόσπτωση:

$$r = \frac{(z_2 - z_1)^2}{(z_2 + z_1)^2} \quad (2.1.2)$$

για πλάγια πρόσπτωση:

$$r = \frac{(z_2 \cos \theta_i - z_1 \cos \theta_t)^2}{(z_2 \cos \theta_i + z_1 \cos \theta_t)^2} \quad (2.1.3)$$

όπου:

$z_1$  : η ακουστική εμπέδηση του πρώτου μέσου διάδοσης (βλ παράγραφο 2.4)

$z_2$  : η ακουστική εμπέδηση του δεύτερου μέσου διάδοσης

$\theta_i$  : η γωνία που σχηματίζει το προσπίπτον κύμα με την κάθετη επιφάνεια

$\theta_t$  : η γωνία που σχηματίζει το διαδιδόμενο κύμα με την κάθετη επιφάνεια

## 2. Συντελεστής διάδοσης $\tau$ .

Είναι ο λόγος της ενέργειας που διαδίδεται από την επιφάνεια διαχωρισμού των δυο μέσων ( $W_t$ ), προς την προσπίπτουσα ( $W_i$ ):

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} = \frac{I_t}{I_i} \quad (2.1.4)$$

για κάθετη πρόσπτωση:

$$\tau = \frac{(4z_1 z_2)}{(z_2 + z_1)^2} \quad (2.1.5)$$

για πλάγια πρόσπτωση:

$$\tau = \frac{(4z_1 z_2 \cos \theta_i \cos \theta_t)}{(z_2 \cos \theta_i + z_1 \cos \theta_t)^2} \quad (2.1.6)$$

## 3. Συντελεστής

απορρόφησης

$\alpha$ .

Είναι ο λόγος της ενέργειας που απορροφάται από μια επιφάνεια ( $W_a$ ) προς την προσπίπτουσα ( $W_i$ ):

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} = \frac{I_a}{I_i} \quad (2.1.7)$$

Όλα τα οικοδομικά υλικά έχουν αυτές τις ακουστικές ιδιότητες σύμφωνα με τις οποίες απορροφούν, ανακλούν ή επιτρέπουν την μετάδοση ενός ηχητικού κύματος που προσπίπτει στην επιφάνειά τους[13].

Ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης ενός υλικού ορίζεται ως το κλάσμα της ηχητικής ενέργειας που προσπίπτει στο υλικό και η οποία δεν ανακλάται από το υλικό.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι ο συντελεστής απορρόφησης δε συνδέεται με τον συντελεστή ηχομείωσης. Έτσι λ.χ. ένα ανοιχτό παράθυρο θεωρείται τέλειος απορροφητής αλλά αποτελεί ένα πολύ αναποτελεσματικό φράγμα για τον ήχο. Ένας συμπαγής σκληρός τοίχος αντίθετα αποτελεί καλό φράγμα ήχου αλλά ανακλά περίπου το 97% του προσπίτοντος ήχου και κατά συνέπεια είναι ένας πολύ αναποτελεσματικός απορροφητής[13].

## 2.2 Διάχυση του ήχου

Ας υποθέσουμε ότι υπάρχει ένας κλειστός χώρος ο οποίος περικλείει ηχητική ενέργεια αλλά δεν περιέχει πηγή. Σε υψηλές κυρίως συχνότητες, όπου το μήκος κύματος είναι μικρό, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο ήχος αποτελείται από επίπεδα κύματα που έχουν την ίδια ακριβώς πιθανότητα να διαδοθούν προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Αν το μέσο τετράγωνο της πίεσης για κάθε επίπεδο κύμα έχει την ίδια μέση τιμή, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση, τότε ο ήχος ονομάζεται διάχυτος.

Όταν το ηχητικό πεδίο είναι διάχυτο τότε αυτό έχει τις παρακάτω ιδιότητες :

- Ο ρυθμός μείωσης της ηχητικής ενέργειας όταν μηδενιστεί η πηγή είναι ομαλός.
- Ο ρυθμός μείωσης είναι καθαρά εκθετικός ( ή ευθεία γραμμή σε λογαριθμική κλίμακα
- Ο Χρόνος αντήχησης είναι ο ίδιος σε όλες τις θέσεις του χώρου
- Ο ρυθμός μείωσης δεν εξαρτάται από την κατευθυντικότητα του χρησιμοποιούμενου μικροφώνου
- Οι αποκλίσεις από τη κατάσταση ηρεμίας σε διαφορετικές συχνότητες είναι αμελητέες

Είναι εξαιρετικά δύσκολο να δημιουργηθεί ένα πεδίο 100% διάχυτο, ωστόσο μπορούμε να το προσεγγίσουμε με ικανοποιητική ακρίβεια αν στο χώρο τοποθετήσουμε ειδικές επιφάνειες που διαχέουν τον ήχο.[2]

Η διάχυση μπορεί να αποτελέσει εξαιρετική εναλλακτική επιλογή για την απορρόφηση καθώς δεν προκαλεί μεγάλη απώλεια ενέργειας. Μπορεί δηλαδή να χρησιμοποιηθεί για την μείωση των συμφασικών ανακλάσεων που δημιουργούν προβλήματα επιτρέποντας ταυτόχρονα στο χώρο να διατηρήσει τη ζωντάνια του[15]

## 2.3 Συντελεστής Απορρόφησης

Ο συντελεστής απορρόφησης αποτελεί το μέτρο της ικανότητας μιας επιφάνειας ή ενός υλικού να απορροφά τον ήχο.

Για τον προσδιορισμό των ηχητικών παραμέτρων ενός χώρου και κυρίως του χρόνου αντήχησης βασική προϋπόθεση είναι το ηχητικό πεδίο να είναι τελείως διάχυτο. Ο ήχος θεωρείται διάχυτος όταν υποστεί πολλές ανακλάσεις ή όταν πέφτει σε ειδικά διασκευασμένες επιφάνειες. Για τον λόγο αυτό (αν και σπάνια) χρησιμοποιούμε τον παράγοντα γεωμετρικής ανάκλασης ( $g$ ) και τον παράγοντα διάχυσης ( $d$ ).

*Παράγοντας γεωμετρικής ανάκλασης* είναι ο λόγος της γεωμετρικώς ανακλώμενης ενέργειας προς την προσπίπτουσα και *παράγοντας διάχυσης* είναι ο λόγος της

διαχεόμενης προς όλες τις κατευθύνσεις ηχητικής ενέργειας προς την προσπίπτουσα. Ισχύει[2]:

$$g + d = a_r \quad (2.3.1)$$

### 2.3.1 Μέθοδοι προσδιορισμού του συντελεστή απορρόφησης

Ο προσδιορισμός του συντελεστή απορρόφησης γίνεται με τους παρακάτω τρόπους<sup>[2]</sup>:

- Μέθοδος θαλάμου αντήχησης.
- Μέθοδος του σωλήνα σύνθετης αντίστασης.
- Μέθοδος ριπής τόνου.

#### *Μέθοδος θαλάμου αντήχησης.*

Η μέθοδος αυτή μετρά αυτόματα την μέση τιμή. Ο θάλαμος αντήχησης είναι ένα μεγάλο δωμάτιο με εξαιρετικά ανακλαστικά τοιχώματα, οροφή και πάτωμα. Ο χρόνος αντήχησης ενός τέτοιου δωματίου είναι πολύ μεγάλος, και όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο ακριβέστερη είναι η μέτρηση. Ένα πρότυπο δείγμα (π.χ. 1 m<sup>2</sup>) τοποθετείται στο πάτωμα και μετριέται ο χρόνος αντήχησης. Συγκρίνοντας τον χρόνο αυτό, με τον γνωστό χρόνο αντήχησης του δωματίου έχουμε το πλήθος των μονάδων απορρόφησης που το δείγμα προσθέτει στο δωμάτιο. Από αυτό καθορίζεται η απορρόφηση που αποδίδεται σε κάθε τετραγωνικό μέτρο υλικού, δίνοντας το ισοδύναμο του συντελεστή απορρόφησης.

Πολλές φορές οι μετρήσεις με την παραπάνω μέθοδο δίνουν συντελεστή απορρόφησης μεγαλύτερο του 1. Αυτό συμβαίνει γιατί η περίθλαση του ήχου στις ακμές του δείγματος κάνει το δείγμα να εμφανίζεται, από ακουστικής πλευράς, σαν να έχει μεγαλύτερη επιφάνεια από ότι στην πραγματικότητα. Δεν υπάρχει πρότυπη μέθοδος για να γίνουν ρυθμίσεις γι αυτό.

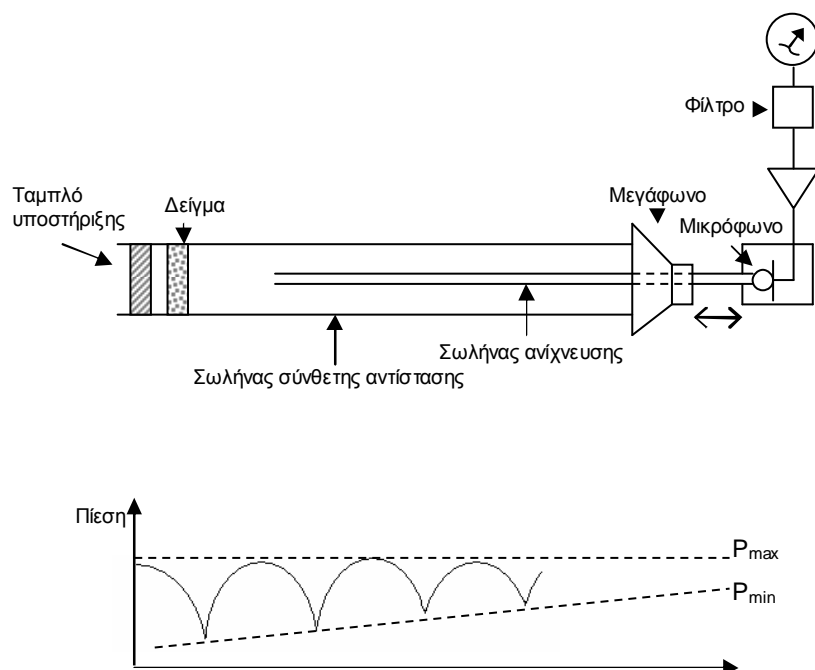
Οι συντελεστές απορρόφησης μεταβάλλονται με την συχνότητα, έτσι δημοσιεύονται συνήθως, για τις εξής συχνότητες: 125, 250, 500, 1000, 2000 και 4000 Hz.

#### *Μέθοδος του σωλήνα σύνθετης αντίστασης.*

Ο σωλήνας Kundt χρησιμοποιείται συνήθως για την μέτρηση του συντελεστή απορρόφησης υλικών και σ' αυτή την περίπτωση λέγεται σωλήνας στάσιμου κύματος ή σωλήνας σύνθετης αντίστασης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για πορώδεις απορροφητές επειδή δεν είναι κατάλληλη για τους απορροφητές που εξαρτώνται από την επιφάνειά τους.

Στο σχήμα 2.3.1 που ακολουθεί φαίνονται η κατασκευή και η λειτουργία του σωλήνα. Έχει κυκλική διατομή και σκληρά τοιχώματα. Το δείγμα πρέπει να ταιριάζει άνετα μέσα στον σωλήνα. Αν το δείγμα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί τοποθετημένο σε στερεή επιφάνεια, τότε τοποθετείται σε επαφή με το βαρύ ταμπλό υποστήριξης. Αν το υλικό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί με κενό χώρο πίσω του, τότε τοποθετείται σε κατάλληλη απόσταση από το ταμπλό υποστήριξης.

Στο άλλο άκρο του σωλήνα υπάρχει ένα μικρό μεγάφωνο με μια τρύπα στον μαγνήτη του από όπου περνάει ένας μακρύς, λεπτός σωλήνας ο οποίος είναι συζευγμένος με ένα μικρόφωνο. Όταν το μεγάφωνο ενεργοποιηθεί η μορφή του στάσιμου κύματος, που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση του εξερχόμενου κύματος με το κύμα που ανακλάται από το δείγμα, δίνει σημαντικές πληροφορίες για την απορροφητικότητα του υλικού.



Σχήμα 2.3.1: Μέθοδος του σωλήνα σύνθετης αντίστασης για την μέτρηση του συντελεστή απορρόφησης υλικών για κάθετη πρόσπτωση.

Η πίεση του ήχου είναι μέγιστη στην επιφάνεια του δείγματος. Καθώς το μικρόφωνο απομακρύνεται από το δείγμα, η πίεση του ήχου πέφτει στο πρώτο ελάχιστο. Όταν το μικρόφωνο απομακρύνεται κι άλλο, ανιχνεύει διαδοχικά μέγιστα και ελάχιστα.

Αν ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη πίεση του ήχου (για το πρώτο ζεύγος μεγίστου - ελαχίστου) είναι  $Swr$ , τότε ο συντελεστής απορρόφησης για κάθετη πρόσπτωση είναι:

$$a_n = 1 - |\Gamma|^2$$

$$\Gamma = \frac{Swr - 1}{Swr + 1} \quad (2.3.2)$$

Η παραπάνω μέθοδος μειονεκτεί στο ότι ο συντελεστής που βρίσκεται με τον τρόπο αυτό ισχύει μόνο για κάθετη πρόσπτωση και σε ένα δωμάτιο ο ήχος προσπίπτει

στις επιφάνειες με όλες τις γωνίες. Οι συντελεστές, για τυχαία πρόσπτωση, σ' αυτή την περίπτωση υπολογίζονται προσεγγιστικά.

Ειδικά όμως για τοπικά αντιδρώντα υλικά (locally reacting βλ. παράγραφο 3.2.1) ο συντελεστής απορρόφησης για τυχαία πρόσπτωση δύναται να υπολογισθεί ακριβώς από τον κάθετο συντελεστή απορρόφησης χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση [3].

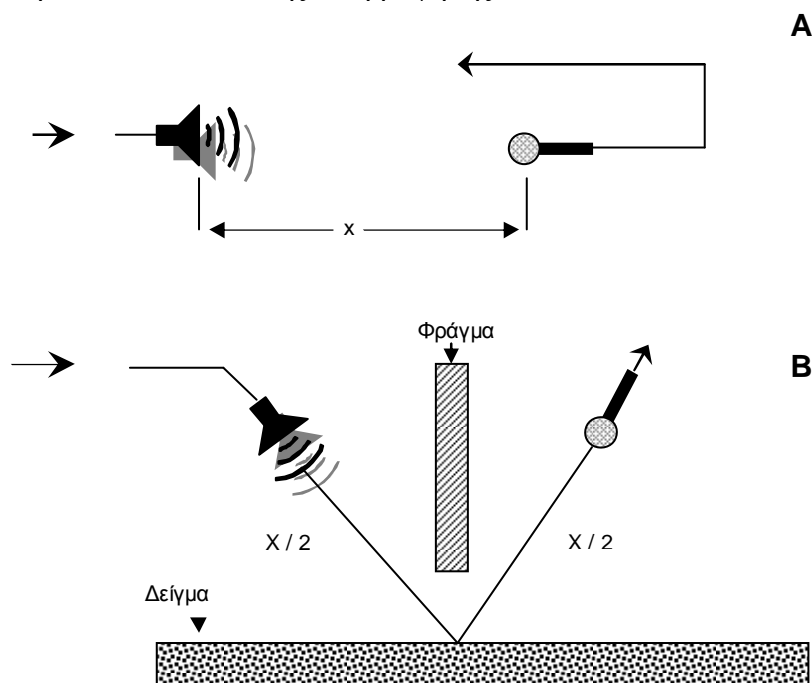
$$a_{diffuse} = 8 \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - a}}{1 + \sqrt{1 - a}} \right]^2 \left[ \frac{2}{1 - \sqrt{1 - a}} - \frac{1 - \sqrt{1 - a}}{2} + 2 \ln \left( \frac{1 - \sqrt{1 - a}}{2} \right) \right] \quad (2.3.3)$$

Όπου α ο κάθετος συντελεστής απορρόφησης

*Μέθοδος ριπής τόνου.*

Η μέθοδος ριπής τόνου χρησιμοποιείται για την μέτρηση του συντελεστή απορρόφησης σε οποιαδήποτε γωνία πρόσπτωσης και γίνεται με την χρήση σύντομων παλμών ήχου. Οι μετρήσεις σ' αυτή την περίπτωση μπορούν να γίνουν σε συνηθισμένα δωμάτια. Για να φτάσουν οι ενοχλητικές ανακλάσεις από τις επιφάνειες στην θέση μέτρησης, χρειάζεται κάποιος χρόνος. Αν ο παλμός είναι πολύ σύντομος, η χρονική πύλη μπορεί ν' ανοίγει μόνο για τον επιθυμητό ηχητικό παλμό, αποκλείοντας τους παλμούς παρεμβολών.

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου μπορεί να δοθεί από το παρακάτω σχήμα 2.3.2. Το μικρόφωνο τοποθετείται σε x απόσταση από την πηγή (διάταξη Α). Στην συνέχεια τοποθετούνται έτσι ώστε η συνολική διαδρομή του παλμού, που ανακλάται από το προς εξέταση υλικό, να είναι ίση με την απόσταση x. Η ένταση του ανακλώμενου παλμού συγκρίνεται με την ένταση του άμεσου παλμού σε απόσταση x ώστε να καθοριστεί ο συντελεστής απορρόφησης.



Σχήμα 2.3.2: Καθορισμός συντελεστών απορρόφησης υλικών με την μέθοδο ριπής τόνου. Το σύστημα πηγής – μικροφώνου ρυθμίζεται σε απόσταση x (Α).

## 2.4 Εμπέδηση

Η άσκηση περιοδικής δύναμης ή πίεσης σε κάποιο σημείο ενός δυναμικού συστήματος προκαλεί μια περιοδική μεταβολή της θέσης και της ταχύτητας των μερών του συστήματος. Ο λόγος του αιτίου (πίεση ή δύναμη) ως προς το αποτέλεσμα (ταχύτητα) ορίζεται ως η εμπίεση του συστήματος.

Οι 3 βασικοί τύποι εμπίεσης που χρησιμοποιούνται ευρέως στην ακουστική παρατίθενται στον πίνακα 2.4.1 παρακάτω:

Τύπος	Ορισμός	Μεγέθη
1.Μηχανική Εμπίεση	$Z_m = F/u = M/T$ $pA/u$	
2.Ειδική Ακουστική Εμπίεση	$Z = p/U$	$MT^{-1}L^{-2}$
3.Ακουστική Εμπίεση	$Z_d = p/v = p/uA$	$MT^{-1}L^{-4}$
Όπου $F$ = χρονικά μεταβαλλόμενη δύναμη		$MLT^{-2}$
$u$ = χρονικά μεταβαλλόμενη ακουστική σωματιδιακή ταχύτητα		$LT^{-1}$
$p$ = χρονικά μεταβαλλόμενη ακουστική πίεση		$MT^{-2}L^{-1}$
$v$ = χρονικά μεταβαλλόμενη ακουστική ταχύτητα του όγκου		$L^3T^{-1}$
$A$ = Επιφάνεια		$L^2$

Πίνακας 2.4.1: Οι τρεις τύποι εμπίεσης που χρησιμοποιούνται στην Ακουστική[4]

### 2.4.1 Μηχανική Εμπίεση

Η μηχανική εμπίεση είναι ο λόγος μιας δύναμης προς την προκαλούμενη ταχύτητα και είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη στην ακουστική για την περιγραφή του μεγέθους της ακτινοβολίας από ένα μέσο διάδοσης σε μία δονούμενη επιφάνεια.

### 2.4.2 Ειδική Ακουστική Εμπίεση

Η ειδική ακουστική εμπίεση είναι ο λόγος της ακουστικής πίεσης προς τη προκαλούμενη σωματιδιακή ταχύτητα. Χρησιμοποιείται για την περιγραφή της διάδοσης του ήχου σε συνεχή μέσα (αέρια - υγρά) και είναι συνεχείς (με τη μαθηματική έννοια) και στα σημεία διεπαφής διαφορετικών μέσων διάδοσης. Από τη γνώση της εμπίεσης των επιμέρους μέσων διάδοσης δύναται να υπολογισθεί το ποσό της ηχητικής ενέργειας που ανακλάται, διαδίδεται η αποσβένεται από/σε ένα απορροφητικό υλικό, ένα σωλήνα η ένα τοίχο ενός δωματίου.

### 2.4.3 Ακουστική εμπίεση

Η ακουστική εμπίεση είναι σημαντική για τη μελέτη ενός ήχου που διαδίδεται μέσα σε κυματαγωγούς όπου θεωρείται ότι το μήκος κύματος του διαδιδόμενου ήχου είναι συγκρίσιμο των διαστάσεων της επιφάνειας του αγωγού μέσα στον οποίο ο ήχος διαδίδεται.

Σε αυτή την περίπτωση, μόνο τα επίπεδα κύματα διαδίδονται και είναι τότε δυνατόν να οριστεί η ταχύτητα του όγκου ως το γινόμενο της επιφάνειας του αγωγού και της σωματιδιακής ταχύτητας.[4]



#### 2.4.4 Ειδική Χαρακτηριστική Ακουστική Εμπέδηση

Ειδική χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση ορίζεται ως ο λόγος της ειδικής ακουστικής εμπέδησης προς την εμπέδηση του αέρα ( $Z_0$ )

$$Z_c = \frac{Z}{Z_0}$$

όπου  $Z$  η Ειδική Ακουστική Εμπέδηση και  $Z_0 = \rho_0 c$

## Κεφάλαιο 3

## Υλικά Ηχοαπορρόφησης

Ηχοαπορροφητικό υλικό είναι κάθε υλικό που χαρακτηρίζεται από, σχετικά, μεγάλη ικανότητα ηχοαπορρόφησης.

Στην αρχιτεκτονική ακουστική ηχοαπορροφητικά υλικά θεωρούνται:

1. Επενδύσεις επιφανειών τοίχου, δαπέδου και οροφής.
2. Άτομα, καθίσματα, κουρτίνες, χαλιά.
3. Ο αέρας του χώρου.

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες ηχοαπορροφητών ο καθένας εκ των οποίων δρα απορροφητικά σε διαφορετικό εύρος συχνοτήτων και στηρίζει την απορροφητική του ικανότητα σε διαφορετικό μηχανισμό.

- Πορώδη (υψηλές – μεσαίες συχνότητες).
- Απορροφητές μεμβράνης (χαμηλές συχνότητες).
- Συνηχητές κοιλότητας (μεσαίες – χαμηλές συχνότητες).

### 3.1 Πως Απορροφάται ο ήχος

Ο ήχος είναι η οργανωμένη υπέρθεση της σωματιδιακής κίνησης με την τυχαία θερμική κίνηση των μορίων. Η σωματιδιακή ταχύτητα στον αέρα είναι τυπικά έξι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή της θερμικής κίνησης.

Όλοι οι απορροφητές διευκολύνουν τη μετατροπή της ενέργειας της σωματιδιακής κίνησης σε θερμότητα. Όλες οι δυνάμεις –εξαιρουμένων αυτών που συμπίεζουν και επιταχύνουν τον αέρα- που προκαλούνται από την σωματιδιακή ταλάντωση παρουσία ενός συμπαγούς υλικού έχουν σαν αποτέλεσμα την απώλεια Ακουστικής Ενέργειας.

Η μετατροπή αυτή σχετίζεται κυρίως με τις αντιστάσεις που οφείλονται σε τριβές μεταξύ της επιφάνειας ενός τοίχου ή του σκληρού σκελετού ενός πορώδους υλικού και του αέρα στο λεπτό οριακό σημείο μεταξύ των δύο μέσων.

Για ένα πορώδες υλικό όπου η ταχύτητα της ακουστικής ροής στο υλικό είναι χαμηλή και η ροή παραμένει σταθερή η αντιστάσεις είναι ανάλογες της ακουστικής σωματιδιακής ταχύτητας.

Στις υψηλές ταχύτητες που παρατηρούνται στο στόμιο ενός συνηχητή (resonator), η ροή διαχωρίζεται, δημιουργείται αναταραχή και η δύναμη της τριβής γίνεται ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας και ως εκ τούτου παρατηρείται μη γραμμική συμπεριφορά.

Στην περίπτωση του απορροφητή μεμβράνης, η ακουστική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα στη ταλαντευόμενη, εύκαμπτη μεμβράνη και εκπέμπεται σαν ήχος από το πίσω μέρος της μεμβράνης ή μεταδίδεται με τη μορφή κινητικής ενέργειας στη κατασκευή που υποστηρίζει τη μεμβράνη.

Οι εσωτερικές στρώσεις ενός σύνθετου απορροφητή (που αποτελείται από πολλές διαφορετικές στρώσεις ηχοαπορροφητικών υλικών) μπορούν να απορροφήσουν μόνο το μέρος της προσπίπτουσας ακουστικής ενέργειας που δεν ανακλάται από την επιφάνεια. Συνεπώς είναι σημαντικό η ένταση των ανακλάσεων των προηγούμενων στρώσεων να περιοριστεί όσο το δυνατόν περισσότερο.

Ουσιαστικά, το μέρος της προσπίπτουσας Ακουστικής ενέργειας που εισέρχεται στον απορροφητή πρέπει να απορροφαστεί προτού επιστρέψει στην επιφάνεια αφού θα έχει αρχικά διασχίσει τον απορροφητή και θα έχει ανακλαστεί από το σκληρό τοίχο.

Αλλιώς ο απορροφητής επιστρέφει ακουστική ενέργεια στο μέσο η οποία είναι επιπρόσθετη στην αρχική ανάκλαση.

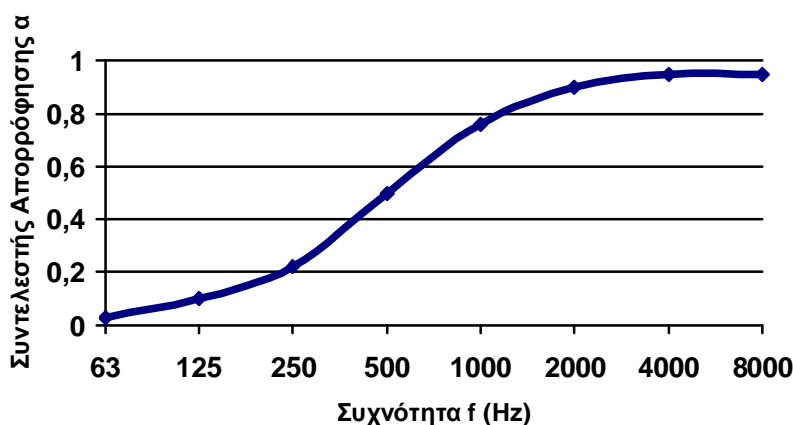
Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται κάποιο συγκεκριμένο πάχος. Η πρόκληση στην κατασκευή ενός απορροφητή είναι να περιοριστεί στο ελάχιστο δυνατό το πάχος του.[1]

### 3.2 Πορώδη Υλικά

Στα Πορώδη υλικά η απορρόφηση του ήχου επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των δυνάμεων τριβής που μετατρέπουν την ηχητική ενέργεια σε θερμότητα.

Όσο πιο μικρή διαφορά έχουν οι εμπεδήσεις του αέρα και του υλικού τόσο μικρότερη η ανάκλαση και συνεπώς μεγαλύτερη η διάδοση. Για να συμβαίνει αυτό η πυκνότητα των απορροφητικών υλικών πρέπει να είναι μικρή και αυτό αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό τους. Στην πράξη η πυκνότητα ενός καλού απορροφητή πρέπει να είναι 2 – 3 φορές μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Επιπροσθέτως το πάχος του Πορώδους υλικού θα πρέπει να είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος του ήχου.

Η απορροφητική ικανότητα στα πορώδη απορροφητικά εξαρτάται από την συχνότητα και αυξάνει με αυτήν. Για υψηλές συχνότητες καταλήγει στην μέγιστη τιμή[2].



Σχήμα 3.2.1: Τυπικός συντελεστής απορρόφησης ενός πορώδους υλικού.

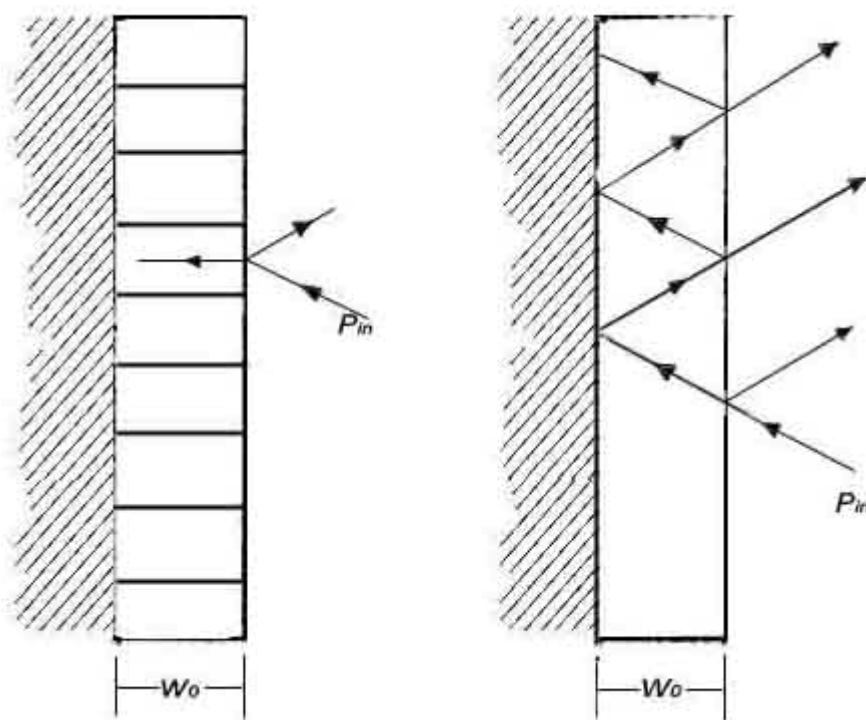
#### 3.2.1 Λεπτό στρώμα Πορώδους υλικού μπροστά από σκληρό τοίχο

Ένας απορροφητής που αποτελείται από ένα λεπτό υλικό με κάποια αντίσταση ροής μπροστά από ένα συμπαγή τοίχο με ένα ενδιάμεσο στρώμα αέρα, είναι ένα σύστημα του οποίου η απορρόφηση είναι εύκολο να προβλεφθεί.

Στο σχήμα 3.2.2 αριστερά μπορούμε να δούμε ένα σύστημα όπου ο αέρας ανάμεσα στον τοίχο και στο λεπτό πορώδες, έχει διαχωριστεί σε διάφορα μέρη ώστε να αποφευχθεί η διάδοση του ήχου παράλληλα με το υλικό. Το συγκεκριμένο σύστημα

ονομάζεται *τοπικά αντιδρών (locally reacting)* επειδή το ηχητικό πεδίο του απορροφητή εξαρτάται αποκλειστικά από την ηχητική πίεση στο εσωτερικό του συγκεκριμένου χωρίσματος. Ο ήχος στο εσωτερικό του απορροφητή μπορεί να διαδοθεί μόνο κάθετα ως προς την επιφάνεια του υλικού.

Στο σύστημα δεξιά του σχήματος 3.2.2 Δεν υπάρχει διαχωρισμός του αέρα στο εσωτερικό. Η ηχητική πίεση στο κάθε σημείο στον αέρα εξαρτάται από την πίεση που ασκείται σε όλα τα σημεία της εκτιθέμενης στον ήχο επιφάνειας του απορροφητή. Το σύστημα αυτό ονομάζεται (μη τοπικά αντιδρών) *non – locally reacting* [1]



Σχήμα 3.2.2: Αριστερά: Τοπικά αντιδρών σύστημα. Δεξιά: Μη τοπικά αντιδρών σύστημα (Η πίεση σε οποιοδήποτε σημείο του εσώκλειστου αέρα επηρεάζεται από τη πίεση που ασκείται σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας)

Ένα λεπτό άκαμπτο στρώμα πορώδους υλικού μπορεί εύκολα να καθοριστεί από μία

μόνο παράμετρο, την αντίσταση ροής του ή την εμπίδηση του  $z' = \frac{Rf}{\rho_0 c_0}$  (3.2.1)

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα και  $c$  η ταχύτητα του ήχου στο υλικό. Ξέροντας ότι η εμπίδηση του αέρα είναι  $z_0 = j \cot(kw_0)$  όπου  $k = 2\pi/\lambda$  και το  $w_0$  είναι το βάθος του στρώματος αέρα μεταξύ του υλικού και του τοίχου, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η εμπίδηση του συστήματος είναι

$$Z_{tot} = z' + jz_0 = \frac{Rf}{\rho_0 c_0} + j \cot(kw_0) \quad (3.2.2)$$

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο συντελεστής απορρόφησης δίνεται από τον τύπο:

$$a_{\max} = \frac{4z'}{(1+z')^2} \quad (3.2.3)$$

Πράγμα που δείχνει ότι η απορρόφηση παίρνει τη μέγιστη τιμή της για  $z'=1$ . Σύμφωνα με την αναφορά [1] ο συντελεστής απορρόφησης δίνεται από το τύπο:

$$a(f) = \left\{ \left[ \left( \frac{Rf}{\rho_0 c_0} \right)^{0.5} + \left( \frac{\rho_0 c_0}{Rf} \right)^{0.5} \right]^2 + \frac{\rho_0 c_0}{Rf} \cot^2 \left( \frac{2\pi f w_0}{c_0} \right) \right\}^{-1} \quad (3.2.4)$$

### 3.2.2 Μοντέλα για την Εμπέδηση ενός Πορώδους υλικού

- Μοντέλο των Delany-Bazley

Το μοντέλο των Delany-Bazley(1970) είναι ένα εμπειρικό μοντέλο το οποίο βασίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό μετρήσεων σε πορώδη υλικά με Porosity σχεδόν ίσο με 100%.

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιεί είναι μόνο η συχνότητα και η αντίσταση Ροής(Flow Resistivity). Οι εξισώσεις για την εμπέδηση  $Z$  και το σύνθετο συντελεστή διάδοσης  $k$  είναι οι εξής:

$$Z_f = \rho_0 c_0 (1 + 0.0571 \cdot E^{-0.751} - j0.087 \cdot E^{-0.732}) \quad (3.2.5.a)$$

$$k = j \frac{\omega}{c_0} (1 + 0.0978 \cdot E^{-0.7} - j0.189 \cdot E^{-0.595}) \quad (3.2.5.b)$$

$$\text{Όπου: } E = \frac{\rho_0 f}{R_f}$$

Το  $\rho_0$  είναι η πυκνότητα του αέρα, το  $c_0$  η ταχύτητα του ήχου στον αέρα, το  $\omega$  είναι η κυκλική συχνότητα και το  $R_f$  είναι η αντίσταση ροής.

Παρόλο που το μοντέλο των Delany και Bazley χρησιμοποιήθηκε ευρέως και σχετικά αποτελεσματικά, αποδείχθηκε ότι δίνει αφύσικα αποτελέσματα για τις χαμηλές συχνότητες. Συγκεκριμένα, το Πραγματικό μέρος της εμπέδησης της επιφάνειας ενός πορώδους τοποθετημένου πάνω σε ένα ανένδοτο τοίχο παίρνει μέχρι και αρνητικές τιμές. Το μοντέλο του Miki αντιπροσωπεύει μια τροποποίηση αυτών των τύπων βασισμένη στα δεδομένα των Delany και Bazley και σε μία ηλεκτρική αναλογία για τις ακουστικές ιδιότητες των πορώδων υλικών.

Οι τύποι του Miki έχουν ως εξής : [1]

$$Z_f = \rho_0 c_0 (1 + 0.070 \cdot E^{-0.632} - j0.107 \cdot E^{-0.632}) \quad (3.2.6.a)$$

$$k_f = j \frac{\omega}{c_0} (1 + 0.109 \cdot E^{-0.618} - j0.160 \cdot E^{-0.618}) \quad (3.2.6.b)$$

$$\text{Όπου: } E = \frac{\rho_0 f}{R_f}$$

- Μοντέλο του Mechel

Το μόντελο του Mechel αποτελεί στην ουσία μια εξέλιξη του μοντέλου των Delany-Bazley. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί μια θεωρητική έκφραση για τη συμπεριφορά του υλικού στις χαμηλές συχνότητες ενώ χρησιμοποιεί καμπύλες και δεδομένα που έχουν προκύψει από πειράματα και μετρήσεις για να προβλέψει τη συμπεριφορά του υλικού σε μεσαίες και υψηλές συχνότητες. Οι εξισώσεις που δίνει ο Mechel για την εμπέδηση  $Z$  και για το συντελεστή διάδοσης  $k$  φαίνονται παρακάτω:

$$Z_f = \rho_0 c_0 (1 + 0.0563 \cdot E^{-0.725} - j0.127 \cdot E^{-0.655}) \quad \text{εάν το } E \geq 0.025 \quad (3.2.7.a)$$

$$Z_f = \rho_0 c_0 (1 + 0.081 \cdot E^{-0.699} - j0.191 \cdot E^{-0.566}) \quad \text{εάν το } E < 0.025$$

$$k_f = \frac{\omega}{c_0} \left( 1 + 0.179 \cdot E^{-0.663} - j \left( 1 + 0.103 \cdot E^{-0.716} \right) \right) \quad \text{εάν το } E \geq 0.025 \quad (3.2.7.b)$$

$$k_f = \frac{\omega}{c_0} \left( 1 + 0.322 \cdot E^{-0.502} - j \left( 1 + 0.136 \cdot E^{-0.641} \right) \right) \quad \text{εάν το } E < 0.025$$

$$\text{Όπου: } E = \frac{\rho_0 f}{R_f}$$

- Μοντέλο του Attenborough

Η δουλειά του Attenborough βασίζεται κυρίως στη δημιουργία ενός μοντέλου για την εμπέδηση της επιφάνειας του εδάφους με σκοπό την πρόβλεψη της διάδοσης του ήχου σε εξωτερικούς χώρους.[12] Ο Rayleigh είχε δημιουργήσει παλιότερα ένα μοντέλο με τέσσερεις παραμέτρους. Το μοντέλο αυτό αφορούσε *locally reacting* (τοπικά επιδρών) άκαμπτο πορώδες μέσο. Για να δημιουργήσει το μοντέλο αυτό θεώρησε ότι την επιφάνεια διατρέχουν όμοιοι κυλινδρικοί πόροι.

Ο Attenborough δημιούργησε μια εξελιγμένη εκδοχή του μοντέλου αυτού. Το μοντέλο του Attenborough επιτρέπει την τυχαία τοποθέτηση των πόρων καθώς και

την απόκλιση του άξονα των πόρων από την ευθεία και του σχήματος από το κυκλικό-κυλινδρικό σχήμα. Οι δύο νέες παράμετροι ,που σκοπό έχουν να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό και ο επιπλέον παράγοντας του σχήματος και της διάταξης των πόρων είναι το  $sf$  (pore shape factor) και το *tortuosity*. [7] Οι παράμετροι αυτές όπως και το Porosity θα αναλυθούν σε επόμενη παράγραφο.

- Μοντέλο των Allard-Johnson

Το μοντέλο αυτό, χρησιμοποιεί δυο νέες παραμέτρους για να χαρακτηρίσει το σχήμα των πόρων στο υλικό. Αυτές οι παράμετροι είναι το *viscous length*  $\Lambda$  (μήκος ιξώδους) και το *thermal length*  $\Lambda'$  (Θερμικό μήκος) .

Το πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού σε σχέση με τα προηγούμενα είναι ότι δίνει τη δυνατότητα σε κάποιον, πραγματοποιώντας μετρήσεις, να προσδιορίσει οποιαδήποτε από αυτές τις παραμέτρους ξεχωριστά, απλώς χρησιμοποιώντας κάποιον υψηλόσυχνο ήχο(περισσότερα από 100 kHz) .

Οι ποσοτικές τιμές των  $\Lambda$  και  $\Lambda'$  αφρώδη υλικά κυμαίνονται από μερικές δεκάδες έως κάποιες εκατοντάδες  $\mu m$ .

Η σχέση που έχουν αυτές οι δύο παράμετροι μεταξύ τους δίνει επίσης και μια ένδειξη σχετικά με το σχήμα του πόρου. Για ένα υλικό του οποίου οι πόροι πλησιάζουν σε σχήμα αυτό του κανονικού σωλήνα, το  $\Lambda$  και το  $\Lambda'$  θα έχουν την ίδια τιμή. Αντίθετα, όταν οι πόροι αλληλοσυνδέονται μέσω στενών σωλήνων προκαλώντας μεγάλη αντίσταση ροής (Flow Resistance) στο υλικό, θα ισχύει  $\Lambda \ll \Lambda'$ . [12]

### 3.2.3 Φυσικά χαρακτηριστικά ενός πορώδους υλικού

#### 3.2.3.1 Porosity

Το Porosity είναι ένα μέτρο του κενού χώρου μέσα σε ένα πορώδες υλικό και μετριέται σαν κλάσμα με τιμές από 0 ως 1 ή σαν ποσοστό από 0 ως 100 %.

Ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του κενού μέσα στο υλικό το οποίο μπορεί να περιέχει αέρα προς τον συνολικό όγκο του υλικού[14]

$$h = \frac{V_v}{V_t} \quad (3.2.8)$$

Όπου  $V_v$  είναι ο Όγκος του κενού μέσα στο υλικό και  $V_t$  ο συνολικός Όγκος του υλικού.

#### 3.2.3.2 Αντίσταση Ροής (Flow Resistivity)

Η πιο σημαντική παράμετρος για τον καθορισμό της ακουστικής συμπεριφοράς λεπτών στρωμάτων κάποιου πορώδους υλικού είναι Flow Resistance  $R_f$  ή Flow resistivity  $R_f/\Delta x$  αν το υλικό έχει μεγαλύτερο πάχος, το  $\Delta x$  αντιπροσωπεύει το Πάχος του υλικού.

Η αντίσταση ροής είναι η αντίσταση ανά μονάδα πάχους του υλικού όταν ένα σταθερό ρεύμα αέρα διέρχεται μέσα από αυτό.

Το Flow Resistance είναι ο λόγος της ασκούμενης πίεσης προς το προκαλούμενο ρυθμό αύξησης της ροής και αποτελείται από μονάδες πίεσης διαιρούμενες με ταχύτητα. Όταν ένα υλικό έχει υψηλή αντίσταση ροής αυτό σημαίνει ότι είναι δύσκολο για τον αέρα να ρεύσει μέσα σε αυτό[1].

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τιμές που παίρνει η αντίσταση ροής για γνωστά υλικά.

Υλικό	Αντίσταση Ροής $R_f$ $10^3 \text{ N s/m}^2$
Fiberglass	58
Rockwool	29
Kaowool	65
WoodFiber	39

### 3.2.3.3 Tortuosity

Το Tortuosity ενός πορώδους υλικού είναι ένα μέτρο του πόσο ακανόνιστη είναι η διαδρομή που κάνει το μέσο (π.χ ο αέρας) μέσα στο υλικό. Σε πολύ ψηλές συχνότητες, είναι υπεύθυνο για τη διαφορά ανάμεσα στην ταχύτητα του ήχου στον αέρα και την ταχύτητα του ήχου μέσα σε ένα πορώδες υλικό. Το tortuosity σχετίζεται με τον παράγοντα του σχηματισμού (formation factor) ο οποίος χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ενός πορώδους, διαποτισμένου με ένα αγωγίμο υγρό.

Το tortuosity ενός συστήματος με σφαίρες από γυαλί τυχαία τοποθετημένες ή μια πάνω στην άλλη, δίδεται από το  $\frac{1}{\sqrt{h}}$ . Αυτό έχει εξακριβωθεί για ένα μεγάλο εύρος τιμών για το Porosity, από 0.33 έως 0.38 και αποτελεί μια ειδική περίπτωση της σχέσης

$$T = h^{-n'} \quad (3.2.9)$$

Όπου το  $n'$  εξαρτάται από το σχήμα των « κόκκων » και για τις σφαίρες παίρνει την τιμή 0,5. μια άλλη έκφραση μπορεί να είναι

$$T = 1 + \frac{1-h}{2h} \quad (3.2.10)$$

Η αντίστοιχη έκφραση για το tortuosity ενός συστήματος με όμοιες παράλληλες ίνες είναι:

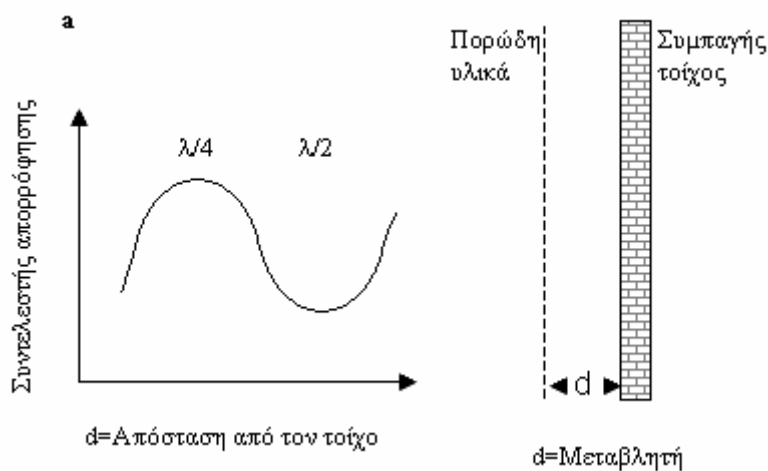


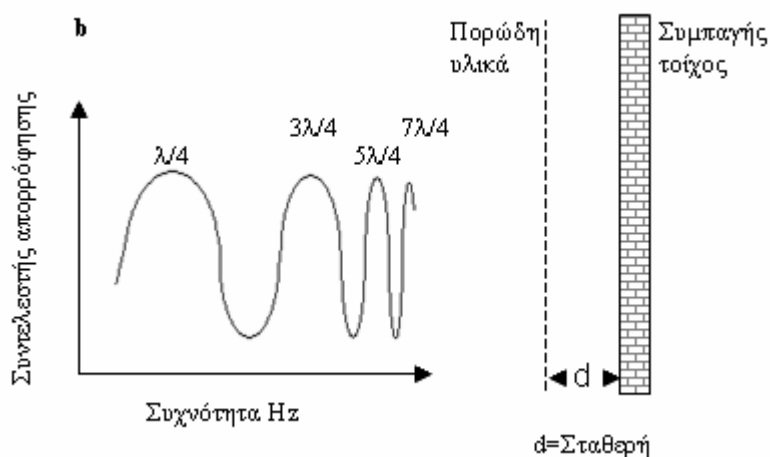
$$T = \frac{1}{h} \quad (3.2.11)$$

Αυτό σημαίνει ότι το tortuosity ενός τυπικού ινώδους υλικού χρησιμοποιούμενου για τον έλεγχο του ήχου είναι λίγο μεγαλύτερο από 1 αν το porosity του υλικού τείνει στο 1. [1]

### 3.2.4 Επίδραση του χώρου πίσω από το απορροφητικό υλικό.

Ένας οικονομικός τρόπος βελτίωσης της απορρόφησης σε μικρές συχνότητες είναι η τοποθέτηση του υλικού σε απόσταση από τον τοίχο. Η μέγιστη απορρόφηση επιτυγχάνεται όταν το υλικό τοποθετείται σε απόσταση ενός τετάρτου μήκους κύματος από τον τοίχο, και ελάχιστη όταν τοποθετείται σε απόσταση μισού μήκους κύματος. Η απορρόφηση του ήχου σε πορώδη υλικά που κρέμονται σε σταθερή απόσταση από τον τοίχο θα εμφανίζει μέγιστα σε αποστάσεις ενός τετάρτου μήκους κύματος και σε περιττά πολλαπλάσια ενός τετάρτου μήκους κύματος καθώς μεταβάλλεται η συχνότητα[2].



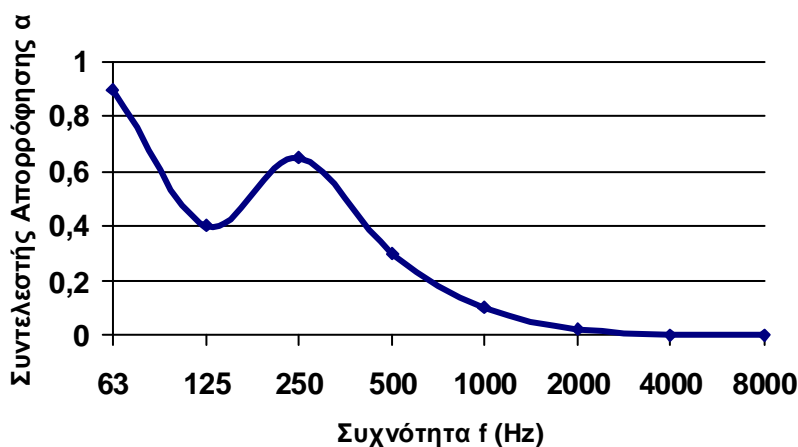


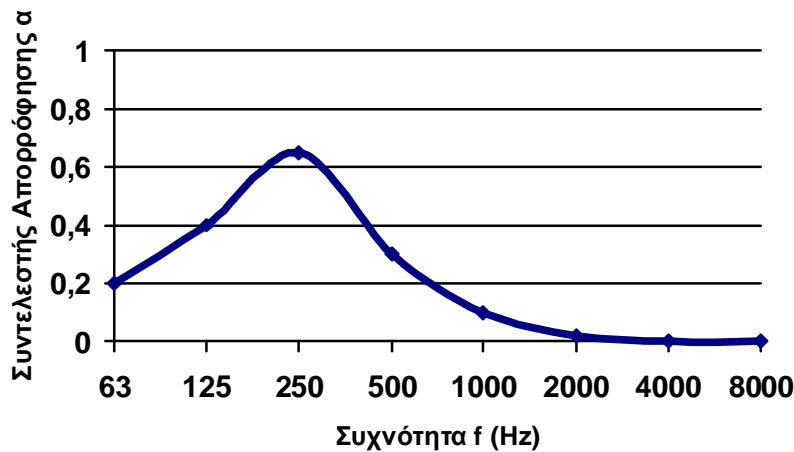
Σχήμα 2.14: (α) Η απορρόφηση του ήχου από πορώδη υλικά μεταβάλλεται με την απόσταση από τον τοίχο και γίνεται μέγιστη σε απόσταση ενός τετάρτου μήκους κύματος από τον τοίχο. (β) Η απορρόφηση του ήχου από πορώδη υλικά που κρέμονται σε σταθερή απόσταση από τον τοίχο θα εμφανίζει μέγιστα σε αποστάσεις ενός τετάρτου μήκους κύματος και σε περιττά πολλαπλάσια ενός τετάρτου μήκους κύματος καθώς μεταβάλλεται η συχνότητα

### 3.3 Απορροφητικά Μεμβράνης

Όπως προαναφέρθηκε, τα υλικά αυτά αποτελούνται από μια λεπτή μεμβράνη που βρίσκεται σε κάποια απόσταση από ένα συμπαγές υλικό. Όταν ο ήχος προσπίπτει στη μεμβράνη τότε τη διεγείρει προς ταλάντωση και η απώλεια της ηχητικής ενέργειας οφείλεται στην εσωτερική τριβή του υλικού. Ο συντελεστής απορρόφησης των υλικών αυτών είναι μεγάλος σε χαμηλές συχνότητες ενώ παρουσιάζει ένα μέγιστο στη συχνοτική περιοχή που συμπίπτει με τη φυσική συχνότητα ταλάντωσης της μεμβράνης [2]

Στην Περίπτωση που η υπό μελέτη μεμβράνη είναι μεμβράνη πεπερασμένων διαστάσεων, η γραφική της παράσταση έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στο σχήμα 1 α, ενώ η καμπύλη απορρόφησης για μία μεμβράνη η οποία θεωρούμε ότι έχει μη περατή επιφάνεια παρουσιάζεται στο σχήμα 1 β.





Σχήμα 3.3.1.α: τυπική καμπύλη απορρόφησης για μία μεμβράνη πεπερασμένων διαστάσεων

Σχήμα 3.3.1.β: τυπική καμπύλη απορρόφησης για μία μη περατωμένη θεωρητικά μεμβράνη

Θεωρώντας τη μεμβράνη απέραντη ουσιαστικά αγνοείς την πρώτη κορυφή  
 Η εξίσωση που περιγράφει την σύνθετη εμπέδηση ενός απορροφητή μεμβράνης  
 άπειρης επιφάνειας είναι η εξής[5]:

$$Z_s = j\omega m \left[ 1 - \left( \frac{f}{f_{cr}} \right)^2 \cdot (1 + j\eta) \sin^4 \theta \right] \quad (3.3.1)$$

Όπου  $f_{cr} = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}}$ , το  $\eta$  είναι ο παράγοντας απώλειας (Loss Factor), το  $m$  η  
 μάζα, το  $\theta$  η γωνία πρόσπτωσης του ήχου και  $\omega$  η κυκλική συχνότητα

Το  $B$  είναι η ακαμψία (Bending Stiffness) του υλικού και δίδεται από τον Τυπο:

$$B = \frac{E}{1-u^2} \cdot I = \frac{E}{1-u^2} \cdot \frac{d^3}{12} \quad (3.3.2)$$

Όπου  $E$  η σταθερά του Young,  $u$  ο λόγος του Poisson και  $d$  το πάχος του υλικού σε μέτρα.[8][9]

### 3.3.1 Χαρακτηριστικά που καθορίζουν την απορροφητική ικανότητα μίας μεμβράνης

#### 3.3.1.1 Πυκνότητα

Η πυκνότητα ενός υλικού ορίζεται ως ο λόγος της Μάζας ( $m$ ) του υλικού προς τον Όγκο ( $V$ ) του υλικού[14]

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.3.3)$$

και μετριέται σε  $\text{kg/m}^3$ .

Πολλές φορές αναφέρεται στη βιβλιογραφία η επιφανειακή πυκνότητα ενός υλικού που είναι το γινόμενο της μάζας του επί το πάχος ( $d$ ).

$$\rho = \frac{m}{d} \quad (3.3.4)$$

στη συγκεκριμένη εφαρμογή η πυκνότητα μετράται σε  $\text{kg/m}^2$ .

Για έναν απορροφητή μεμβράνης, όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ακαμψία της μεμβράνης. Αυτό συνεπάγεται περιορισμένη δυνατότητα ταλάντωσης της μεμβράνης και κατ' επέκταση μικρότερη ηχοαπορροφητική ικανότητα.

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας τιμών που παίρνει η πυκνότητα για γνωστά υλικά:

Υλικό	Πυκνότητα $\rho$ $10^3 \text{ kg/m}^3$	Υλικό	Πυκνότητα $\rho$ $10^3 \text{ kg/m}^3$
Αλουμίνιο	2,7 – 2,9	Νικέλιο	8,9
Ατσάλι	7,7 – 7,9	Πλεξιγκλάς	1,15
Γυαλί	2,4 – 3,9	Πλίνθος	1,8
Λάστιχο	1,0 – 1,3	Πολυαιθυλένιο	0,93
Μαγνήσιο	1,74	Πολυεστέρας	0,016
Μόλυβδος	11,3	Σίδηρος	0,2
Μπρούντζος	8,5	Τιτάνιο	4,5
Νάιλον	0,002	Χαλκός	8,9

Πηγές: [4],[5]

#### 3.3.1.2 Σταθερά του Young

Η σταθερά του Young αποτελεί ένα μέτρο της ακαμψίας ενός υλικού. Μετριέται σε Pascal ( $\text{N/m}$ ) και ορίζεται ως ο λόγος της δύναμης που ασκείται σε ένα υλικό προς τη γεωμετρική μεταβολή που προκαλείται στο υλικό από τη δύναμη αυτή.

Μπορεί να καθοριστεί πειραματικά από μία καμπύλη της δύναμης που ασκείται συναρτήσει της μεταβολής που προκαλεί, η οποία καμπύλη δημιουργείται μετά από έρευνες και πειράματα σε ένα δείγμα του δεδομένου υλικού[14].

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας τιμών που παίρνει η πυκνότητα για γνωστά υλικά:

Υλικό	Σταθερά του Young $E$ $10^9 Pa$	Υλικό	Σταθερά του Young $E$ $10^9 Pa$
Αλουμίνιο	71,6	Νικέλιο	205
Ατσάλι	207	Πλεξιγκλάς	3,7
Γυαλί	67,6	Πλίνθος	16,2
Λάστιχο	0,0008 - 0,004	Πολυαιθυλένιο	0,2
Μαγνήσιο	43	Πολυεστέρας	0,0012 - 0,0035
Μόλυβδος	16,5	Σίδηρος	90
Μπρούντζος	95	Τιτάνιο	106 – 114
Νάιλον	6,6	Χαλκός	125

Πηγές: [4],[5]

### 3.3.1.3 Λόγος του Poisson

Όταν ένα υλικό εκτείνεται σε μία διάσταση, τείνει να γίνεται λεπτότερο στις άλλες δύο διαστάσεις. Ο λόγος του Poisson αποτελεί ένα μέτρο αυτής της τάσης.

Ορίζεται ως ο λόγος της σχετικής συστολικής μεταβολής του υλικού προς τη σχετική διαστολική μεταβολή που προκαλείται στις άλλες διαστάσεις. Ο λόγος του Poisson για ένα στέρεο υλικό δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να πάρει τιμή μικρότερη του -1 ενώ δεν μπορεί ποτέ να υπερβεί το 0.5.[14]

Υλικό	Λόγος του Poisson $\nu$	Υλικό	Λόγος του Poisson $\nu$
Αλουμίνιο	0,34	Μπρούντζος	0,33
Ατσάλι	0,29	Νικέλιο	0,3
Γυαλί	0,21 – 0,27	Σίδηρος	0,21 – 0,30
Λάστιχο	0,5	Τιτάνιο	0,34
Μαγνήσιο	0,29	Χαλκός	0,33 – 0,36
Μόλυβδος	0,43		

Πηγές:[4],[5]

### 3.3.1.4 Παράγοντας Απώλειας (Loss Factor)

Ο Παράγοντας απώλειας είναι ένα μέτρο της απόσβεσης της ταλάντωσης της μεμβράνης.

Η Απόσβεση που προκαλεί μία δύναμη ανάλογη της ταχύτητας της μάζας ονομάζεται *Viscous Damping* (Απόσβεση Ιξώδους).

Για ένα σύστημα Απόσβεσης, η γενική εξίσωση της κίνησης γίνεται:

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t$$

Με τις αρχικές συνθήκες:

$$\begin{cases} x(0) = x_0 \\ \dot{x}(0) = v_0 \end{cases}$$

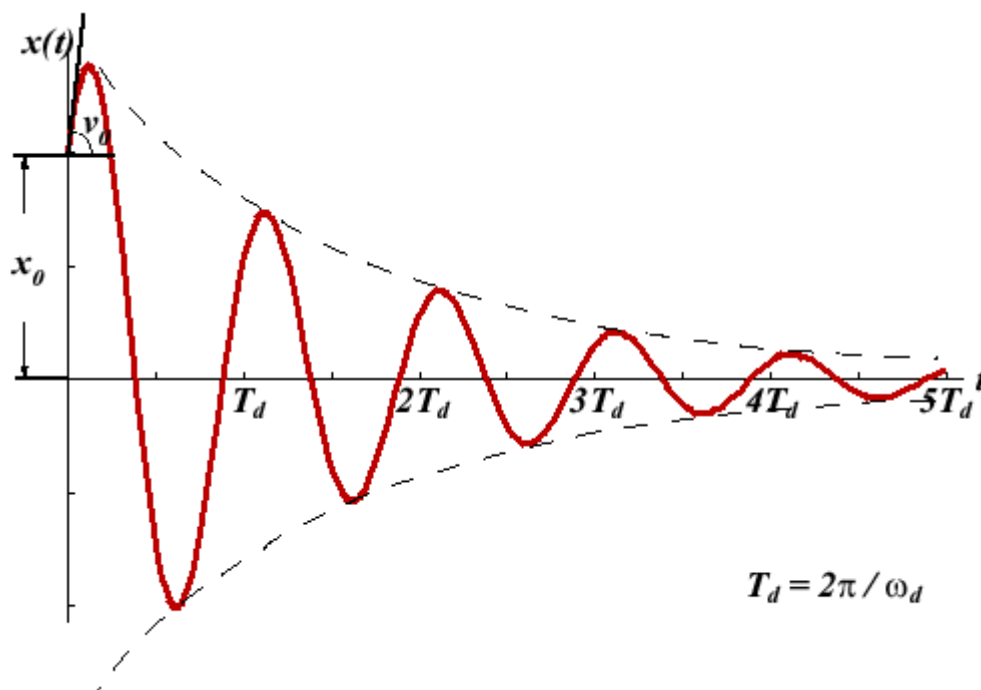
Θεωρώντας τη μάζα, την ακαμψία και την απόσβεση ιξώδους σταθερές η εξίσωση αυτή μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική εξίσωση η οποία για το συγκεκριμένο σύστημα είναι:

$$ms^2 + cs + k = 0$$

Υπάρχουν τρεις τρόποι να χαρακτηριστεί ένα σύστημα:

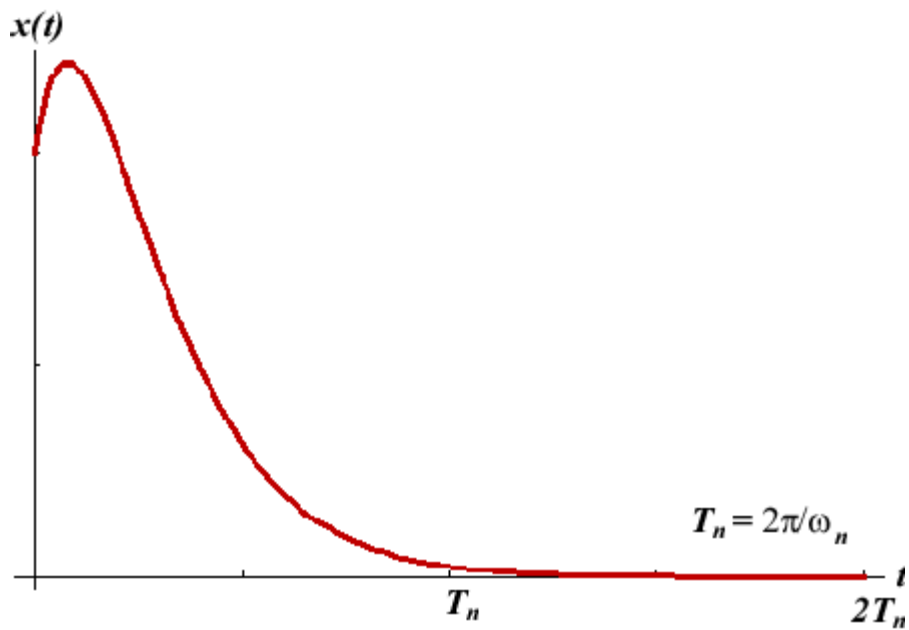
Όταν ισχύει  $c^2 - 4mk < 0$ , το σύστημα έχει μικρή απόσβεση και χαρακτηρίζεται underdamped (με υποαπόσβεση ή υποκρίσιμη απόσβεση)

Η γραφική απεικόνιση ενός συστήματος με υποαπόσβεση είναι η εξής: [10]



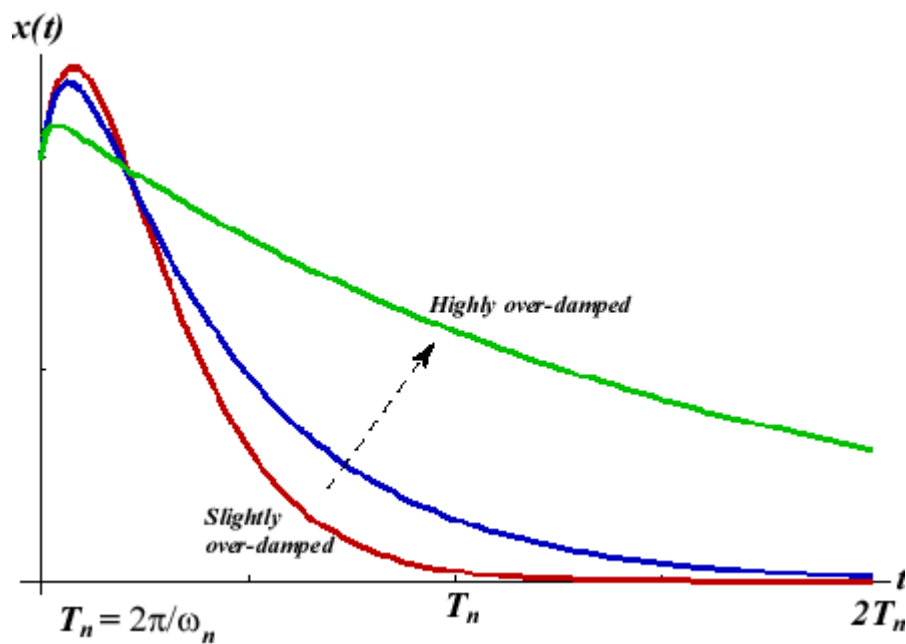
Όταν ισχύει  $c^2 - 4mk = 0$ , το σύστημα χαρακτηρίζεται critical-damped (με κρίσιμη απόσβεση)

Η γραφική απεικόνιση ενός συστήματος με κρίσιμη απόσβεση είναι η εξής: [14]



Όταν ισχύει  $c_v^2 - 4mk > 0$ , το σύστημα χαρακτηρίζεται overdamped (με υπεραπόσβεση)

Η γραφική απεικόνιση ενός συστήματος με υπεραπόσβεση είναι η εξής: [10]



Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τυπικές τιμές που παίρνει ο παράγοντας απώλειας για διάφορα υλικά.

Υλικό	Παράγοντας Απώλειας $\eta$	Υλικό	Παράγοντας Απώλειας $\eta$
Αλουμίνιο	$10^{-4}$	Μόλυβδος	$0,5-2 \cdot 10^{-3}$
Άμμος, στεγνή	$0,6 - 0,12$	Μπρούτζος	$<10^{-3}$
Ασβέστης	$5 \cdot 10^{-3}$	Νικέλιο	$10^{-4}$
Ατσάλι	$10^{-5} - 10^{-4}$	Ξύλο Βελανιδιάς	$0,8-1 \cdot 10^{-2}$
Γυαλί	$0,6-2 \cdot 10^{-3}$	Πλίνθος	$1-2 \cdot 10^{-2}$
Γυψοσανίδα	$0,6-3 \cdot 10^{-2}$	Σίδηρος	$1-6 \cdot 10^{-5}$
Κόντρα Πλακέ	$1-1,3 \cdot 10^{-2}$	Τσιμέντο	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Μαγνήσιο	$10^{-4}$	Φελλός	$0,13 - 0,17$

Πηγές: [1] [5]

### 3.4 Διάτρητες Επιφάνειες

Οι διάτρητες επιφάνειες χρησιμοποιούνται συχνά για την απορρόφηση του ήχου τόσο σε κλειστούς όσο και σε ανοιχτούς χώρους.

Μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα υλικά ενώ οι διατρήσεις μπορεί να είναι κυκλικές, να έχουν τη μορφή σχισμών, να είναι συμμετρική ή τυχαία. Κάθε οπή δρα σαν το λαιμό ενός συντονιστή Helmholtz. Η συχνότητα συντονισμού ενός συνηχητή Helmholtz δίνεται από τη γενική σχέση:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{Vl}} \quad (3.4.1)$$

Όπου  $A$ , το εμβαδόν της οπής

$l$ , το μήκος του σωλήνα

$V$ , ο όγκος της κοιλότητας

Όταν θέλουμε να έχουμε μέγιστο απορρόφησης σε διαφορετικές συχνότητες, χρησιμοποιούμε δύο ή περισσότερα ήδη διατρήσεων στην ίδια ή σε διαφορετικές επιφάνειες. Η τοποθέτηση ενός πορώδους υλικού κάτω από τη διάτρητη επιφάνεια πλαταίνει την καμπύλη συντονισμού. Το ποσοστό διάτρησης στις διάτρητες επιφάνειες δεν πρέπει να ξεπερνά το 20 % διότι σε αυτή τη περίπτωση η επιφάνεια γίνεται διαφανής ως προς τον ήχο[2].

Για τις κυκλικές οπές η παραπάνω σχέση για τη συχνότητα συντονισμού τροποποιείται ως εξής:



$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{w_0(1+\delta)}} \quad (3.4.2)$$

Όπου  $P$ , το ποσοστό διάτρησης το οποίο ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού των οπών προς το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας,  
 $w_0$ , η απόσταση της επιφάνειας από το τοίχο,  
 $l$ , το μήκος του σωλήνα (πάχος του υλικού)  
 $\delta = 0,8d$   
 $d$  = η διάμετρος της μίας οπής

Για οπές μορφής σχισμών, η συχνότητα συντονισμού δίνεται από τη σχέση :

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{w_0(1+Kb)}} \quad (3.4.3)$$

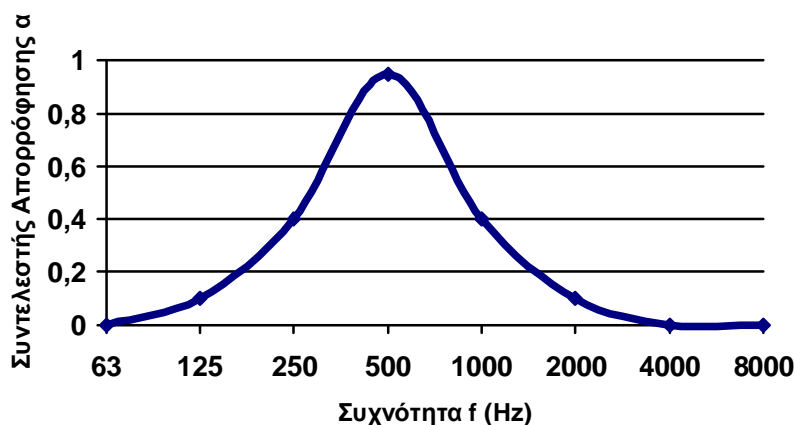
Στην περίπτωση σχισμών πεπερασμένου μήκους το  $K$  δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{1}{\pi} + \frac{2}{\pi} \ln \frac{2a}{b} \quad (3.4.4)$$

Ενώ στη περίπτωση σχισμών απείρου μήκους η σχέση για το  $K$  είναι:

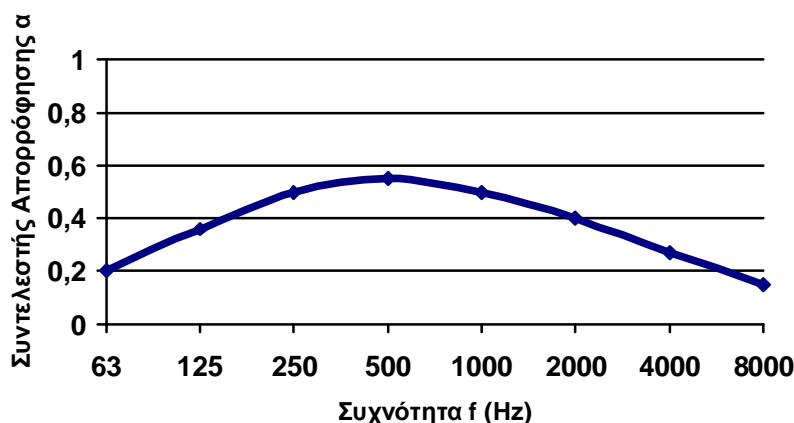
$$K = \frac{2}{\pi} \ln \left( \cos ec \frac{\pi}{2} P \right) \quad (3.4.5)$$

Όπου  $a$  είναι το μήκος της σχισμής και  $b$  είναι το πλάτος της σχισμής.  
 Το  $B$  είναι το ποσοστό διάτρησης της επιφάνειας[2].



Σχήμα 3.4.1: Τυπικός συντελεστής απορρόφησης μίας διάτρητης επιφάνειας

Στην περίπτωση που πίσω από τη διάτρητη επιφάνεια τοποθετηθεί ένα πορώδες υλικό, το πλάτος της καμπύλης μεγαλώνει ενώ το μέγιστο της μικραίνει (Σχήμα 3.4.2)



Σχήμα 3.4.2 : Καμπύλη απορρόφησης της διάτρητης επιφάνειας τοποθετημένης πάνω σε πορώδες υλικό

Σύμφωνα με την πηγή [4] η σύνθετη εμπέδηση μίας διάτρητης επιφάνειας για  $N$  οπές μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας την ακουστική εμπέδηση για μία οπή δια του αριθμού των οπών  $N$ . Έτσι, για μία διάτρητη επιφάνεια με εμβαδό  $S$ , η ακουστική εμπέδηση που οφείλεται στις οπές, δίνεται από τα σχέση:

$$Z_{Ah} = \frac{100}{PS} (j\rho c \tan(kl(1 - M)) + R_A A) \quad (3.4.6)$$

Όπου  $A$  είναι το εμβαδόν μίας οπής,

$P$  είναι το % ποσοστό διάτρησης της επιφάνειας το οποίο δίδεται από τη σχέση:

$$P = \frac{100 N \pi \alpha^2}{S} \quad (3.4.7)$$

$M$  είναι ο συντελεστής του Mach, και

$R_A$  είναι η ακουστική αντίσταση.

Μια πιο ακριβής έκφραση για την εμπέδηση μίας διάτρητης επιφάνειας συμπεριλαμβάνει τη μάζα της πλάκας ενδιάμεσα των οπών και υπολογίζει την εμπέδηση υποθέτοντας ότι η εμπέδηση της μάζας της πλάκας δρα παράλληλα με την εμπέδηση των οπών (Bolt 1947).

Η ακουστική εμπέδηση μιας πλάκας με μάζα ανά μονάδα επιφάνειας  $m$  και εμβαδό  $S$  δίδεται από τη σχέση:

$$Z_{Ap} = \frac{j\omega m}{S} \quad (3.4.8)$$

Επομένως η ακουστική εμπέδηση της μάζας της πλάκας παράλληλα με τις οπές στην πλάκα δίνεται από τη σχέση:

$$Z_P = \frac{Z_{Ah}}{1 + \frac{Z_{Ah}}{Z_{Ap}}} = \frac{\frac{100}{PS} (j\rho c \tan(kl(1-M)) + R_A A)}{1 + \frac{100}{j\omega m P} (j\rho c \tan(kl(1-M)) + R_A A)} \quad (3.4.9)$$

### 3.4.1 Χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την Απορρόφηση μίας Διάτρητης Επιφάνειας

#### 3.4.1.1 Πυκνότητα

Σύμφωνα με τη σχέση 3.3.3 η πυκνότητα εξαρτάται από τη μάζα και αυξάνει ανάλογα με αυτή. Στις διάτρητες επιφάνειες η πυκνότητα του υλικού παίζει ρόλο στην εμπέδηση της μάζας της πλάκας  $Z_{Ap}$ . Όσο αυξάνει η μάζα αυξάνει και η εμπέδηση  $Z_{Ap}$  και επομένως και η συνολική εμπέδηση της διάτρητης πλάκας.

#### 3.4.1.2 Το μήκος της μίας οπής

Εξετάζοντας την ηχητική διάδοση στην περιοχή μιας οπής, παρατηρούμε ότι η ενέργεια του ακουστικού κύματος μεταδίδεται μέσω της κίνησης των μορίων του αέρα στο εσωτερικό της οπής. Σε κάθε δεδομένη στιγμή υπάρχει ένας όγκος αέρα, λίγο μεγαλύτερος από τον πραγματικό όγκο της διατομής, που λαμβάνει μέρος στην προκαλούμενη κίνηση. Τα όρια αυτού του όγκου είναι προφανώς ασαφή, αλλά ο όγκος αυτός μπορεί να θεωρηθεί ως ένας όγκος αέρα κυλινδρικού σχήματος με μήκος ίδιο με αυτό της διατομής με ένα επιπρόσθετο μήκος  $l_0$ .

Το μήκος της διατομής  $l$  με επιπρόσθετο το μήκος  $l_0$  ονομάζεται Ενεργό Μήκος (*effective Length*) ενώ το  $l_0$  από μόνο του ονομάζεται (*End Correction*).

Για οπές ακτίνας  $a$  που απέχουν μεταξύ τους κατά  $q$  (από το κέντρο της μίας οπής στο κέντρο της επόμενης) σε μία διάτρητη επιφάνεια, το *End Correction* για κάθε πλευρά της επιφάνειας είναι:

$$l_0 = \frac{8a}{3\pi} \left( 1 - 0,43 \frac{a}{q} \right) \quad (3.4.10)$$

Στην παραπάνω σχέση για την σύνθετη εμπέδηση  $Z_A$  μίας διάτρητης επιφάνειας Το  $l$  είναι το ενεργό μήκος της κάθε οπής. Το πάχος δηλαδή του υλικού συν το *End Correction*  $l_0$ . [4]

### 3.4.1.3 Συντελεστής (λόγος) του Mach

Ο συντελεστής του Mach αναφέρεται στην ταχύτητα της ροής στο εσωτερικό των οπών. Ορίζεται ως η ταχύτητα των μορίων του αέρα μέσα στις οπές μίας διάτρητης επιφάνειας προς την ταχύτητα του ήχου στον αέρα[14]:

$$M = \frac{u}{c} \quad (3.4.11)$$

όπου  $u$  η ταχύτητα των μορίων του αέρα στις οπές.

### 3.4.1.4 Ακουστική Αντίσταση

Η ακουστική αντίσταση  $R_A$  ενός σωλήνα ή μιας διατομής μήκους  $w$  (m), επιφάνειας  $A$  ( $m^2$ ) και περιμέτρου  $D$ (m) μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$R_A = \frac{\rho c}{A} \left[ \frac{ktDw}{2A} \left( 1 + (\gamma - 1) \sqrt{\frac{5}{3\gamma}} \right) + 0,288kt \log_{10} \left( \frac{4A}{\pi h^2} \right) + \varepsilon \frac{Ak^2}{2\pi} + M \right] \quad (3.4.12)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το  $\rho c$  είναι η χαρακτηριστική εμπίεση του αέρα(415 Rayls),  $\gamma$  είναι ο λόγος της θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση προς την θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο του μέσου διάδοσης (1,4 για τον αέρα), το  $k$  είναι ο κυματάρριθμος,  $\omega$  η κυκλική συχνότητα,  $c$  η ταχύτητα του ήχου,  $M$  ο συντελεστής του Mach και  $t$  είναι το πάχος του στρώματος στο σημείο διεπαφής της επιφάνεια και του αέρα:

$$t = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho\omega}} \quad (3.4.13)$$

Όπου  $\mu$  είναι το ιξώδες του μέσου( $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  για τον αέρα στους  $20^\circ\text{C}$ )

Και  $\rho$  είναι η πυκνότητα του μέσου( $1,2 \text{ kg/m}^3$  για τον αέρα υπό κανονικές συνθήκες)

Οι μεταβλητές  $h$  και  $\varepsilon$  τις σχέσης 3.4.12 θα αναλυθούν παρακάτω

Ο πρώτος όρος της σχέσης 3.4.12 ερμηνεύει την εξασθένηση κατά μήκος του σωλήνα. Είναι γενικά αμελητέος με εξαίρεση τις περιπτώσεις μικρού σωλήνα και στις υψηλές συχνότητες. Επειδή όμως ο όρος εξαρτάται από το μήκος του σωλήνα (η το πάχος του υλικού)  $w$ , μπορεί να γίνει σημαντικός για πολύ μεγάλους σωλήνες.

Ο δεύτερος όρος ερμηνεύει τις απώλειες ιξώδους στη διατομή ή στην είσοδο του σωλήνα και εξαρτάται σημαντικά από τη παράμετρο  $h$ . Για διατομές σε λεπτές πλάκες αμελητέου πάχους, το  $h$  μπορεί να είναι το μισό πάχος της πλάκας η το  $t$  για το οποίο μιλήσαμε παραπάνω. Αναλόγως πιο είναι μεγαλύτερο. Σε περίπτωση που το πάχος τις διάτρητης πλάκας είναι πολύ μεγαλύτερο του μηδενός, τότε το  $h$  μπορεί να είναι η ακτίνα  $a$  τις διατομής ή το  $t$ . Αναλόγως ποιο είναι μεγαλύτερο.

Ο τρίτος όρος ερμηνεύει την απώλεια ενέργειας στη διατομή ή στην έξοδο του σωλήνα. Για σωλήνες που καταλήγουν σε χώρο με διάμετρο πολύ μικρότερη από το

μήκος κύματος του ήχου, η παράμετρος  $\varepsilon$  μπορεί να είναι 0. Για σωλήνες που εκπέμπουν στο κενό το  $\varepsilon$  παίρνει την τιμή 0,5 ενώ για σωλήνες που καταλήγουν σε κενό από ένα μεγάλο επίπεδο τοίχο το  $\varepsilon$  παίρνει την τιμή 1.

Ο τέταρτος και τελευταίος όρος ερμηνεύει τη ροή του μέσου μέσα στη διατομή και είναι συνήθως ο κυρίαρχος όρος όταν παρατηρείται παρουσία ροής του μέσου.

Ο όρος αυτός ισχύει μόνο όταν ο συντελεστής του Mach παίρνει τιμές μικρότερες του 0,2 [4]

## Κεφάλαιο 4

### Σύνθετοι Απορροφητές

Η μορφή που θα πάρει η γραφική παράσταση του συντελεστή απορρόφησης, για κάθε ένα τύπο απορροφητικού Υλικού (πορώδη υλικά, απορροφητικά μεμβράνης, διάτρητες επιφάνειες) είναι γενικώς γνωστή. Το ζήτημα που θα μας απασχολήσει σε αυτό το κεφάλαιο είναι η ηχοαπορροφητική συμπεριφορά των υλικών αυτών στη περίπτωση που συνδυαστούν μεταξύ τους πάνω σε ένα συμπαγή τοίχο.

Υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στον τρόπο που δύνανται να τοποθετηθούν, οι οποίοι περιορισμοί έχουν συνήθως να κάνουν με την φύση του υλικού και με το μηχανισμό στον οποίο βασίζεται η απορροφητική τους ικανότητα.

Ο απορροφητής μεμβράνης, ο μηχανισμός απορρόφησης του οποίου εξαρτάται αποκλειστικά σχεδόν από το μέγεθος της ταλάντωσης του, δεν είναι δυνατό να τοποθετηθεί σε άμεση επαφή με άλλα υλικά όπως για παράδειγμα ένα πορώδες απορροφητικό ή ένας σκληρός τοίχος. Πρέπει λοιπόν, προκειμένου να μελετηθεί αποτελεσματικά, να συνυπολογιστεί η εμπέδηση του στρώματος αέρα που θα τοποθετηθεί ανάμεσα στη μεμβράνη και στο οποιοδήποτε υλικό συνδυαστεί με αυτή.

Μία διάτρητη επιφάνεια έχει τη δυνατότητα να τοποθετηθεί πάνω από ένα στρώμα αέρα, η πάνω από ένα πορώδες υλικό. Δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να τοποθετηθεί σε άμεση επαφή με τον τοίχο και δεν επιτρέπει σε άλλο υλικό να τοποθετηθεί πάνω από αυτή.

Ένα πορώδες υλικό έχει τη δυνατότητα να συνδυαστεί με οποιοδήποτε από τα υπόλοιπα υλικά. Είναι μάλιστα, όπως αναφέρθηκε στη παράγραφο 3.2.4 αρκετά σύνηθες να τοποθετείται σε κάποια απόσταση από τον τοίχο πάνω από ένα στρώμα αέρα. Επιπροσθέτως, η ιδιότητα ενός πορώδους υλικού να απορροφάει κυρίως στις ψηλές συχνότητες το καθιστά ιδανικό για να συνδυαστεί με έναν απορροφητή μεμβράνης προκειμένου να καλυφθεί απορροφητικά ένα πολύ μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων. Ένας συνδυασμός υλικών που συναντάται αρκετά συχνά είναι το σύστημα Τοίχος – στρώμα αέρα – πορώδες υλικό – διάτρητη επιφάνεια το οποίο θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

#### 4.1 Υπολογισμός Εμπέδησης και Απορρόφησης Πολλαπλών Στρωμάτων Υλικών

Για να υπολογιστεί η εμπέδηση  $Z_{tot}$  μίας επιφάνειας ενός συστήματος που αποτελείται από ένα στρώμα με πάχος  $L_1$ , εμπέδηση  $Z_1$  και συντελεστή διάδοσης  $k_1$  τοποθετημένο πάνω σε μία επιφάνεια με εμπέδηση  $Z_2$  πρέπει να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση[9][10]:

$$Z_{tot} = Z_1 \frac{\cosh(jk_1 L_1) + \frac{Z_1}{Z_2} \sinh(jk_1 L_1)}{\sinh(jk_1 L_1) + \frac{Z_1}{Z_2} \cosh(jk_1 L_1)} \quad (4.1.1)$$

Στη περίπτωση δε που θέλουμε να τοποθετήσουμε το υλικό πάνω σε ένα συμπαγή τοίχο, θεωρούμε πως η εμπέδηση  $Z_2$  (εμπέδηση του τοίχου) τείνει στο άπειρο, καθότι η επιφάνεια είναι απόλυτα ανακλαστική, και η παραπάνω έκφραση τροποποιείται ως εξής[9]:

$$Z_{tot} = Z_1 \coth(jk_1 L_1) \quad (4.1.2)$$

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν μόνο για τα υλικά που έχουν τη δυνατότητα να τοποθετηθούν σε επαφή με τον τοίχο και που υπάρχει διάδοση του ήχου μέσα από αυτά. Τέτοια υλικά είναι τα πορώδη και το στρώμα αέρα.

Στη περίπτωση της διάτρητης επιφάνειας και της μεμβράνης όπου η ταχύτητα εκατέρωθεν της μεμβράνης είναι η ίδια, αρκεί απλά να προσθέσουμε την εμπέδηση της διάτρητης πλάκας ή της μεμβράνης με την εμπέδηση της επιφάνειας στην οποία επιθυμούμε να την τοποθετήσουμε [4]:

$$Z_{tot} = Z_1 + Z_2 \quad (4.1.3)$$

Όταν υπολογιστεί η εμπέδηση της επιφάνειας ενός συστήματος πολλαπλών στρωμάτων απορροφητικών υλικών, Ο συνολικός συντελεστής απορρόφησης του συστήματος μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο[11]:

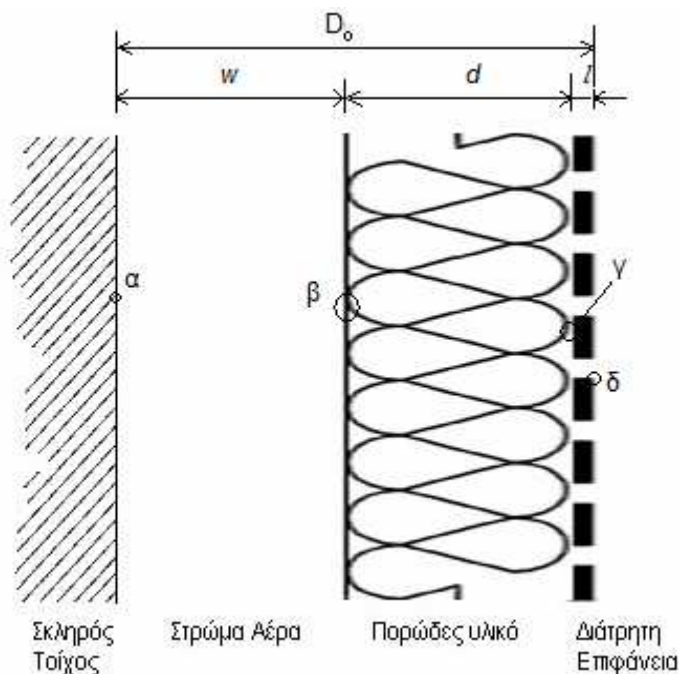
$$a = 1 - \left| \frac{Z_{tot} \cos \theta - \rho_0 c}{Z_{tot} \cos \theta + \rho_0 c} \right|^2 \quad (4.1.4)$$

Στον παραπάνω τύπο το  $\theta$  αντιπροσωπεύει τη γωνία πρόσπτωσης ενώ τα  $\rho$  και  $c$  είναι η πυκνότητα και η ταχύτητα του ήχου στο μέσο διάδοσης αντίστοιχα (417 για τον αέρα).

Ο παραπάνω τύπος για το συντελεστή απορρόφησης ισχύει όταν έχουμε απλή πρόσπτωση του ηχητικού κύματος. Στην περίπτωση που έχουμε τυχαία πρόσπτωση, χρησιμοποιείται ο διάχυτος συντελεστής απορρόφησης οποίος σχετίζεται με τον κάθετο και υπολογίζεται ως εξής[3]:

$$a_{diffuse} = 8 \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - a}}{1 + \sqrt{1 - a}} \right]^2 \left[ \frac{2}{1 - \sqrt{1 - a}} - \frac{1 - \sqrt{1 - a}}{2} + 2 \ln \left( \frac{1 - \sqrt{1 - a}}{2} \right) \right] \quad (4.1.5)$$

## 4.2 Εφαρμογή: Τοίχος – Αέρας – Πορώδες – Διάτρητη Επιφάνεια



Σχήμα 4.2.1

Αν λοιπόν θέλουμε να υπολογίσουμε την εμπέδηση στο σημείο (δ) και το συνολικό συντελεστή απορρόφησης του παραπάνω συστήματος Τοίχος – Αέρας – Πορώδες υλικό – Διάτρητη επιφάνεια (σχήμα 4.2.1) Θα πρέπει να προβούμε στις παρακάτω ενέργειες.

Κατ' αρχάς, θα πρέπει να υπολογιστεί η εμπέδηση στο σημείο(β). Θεωρώντας ότι η εμπέδηση στο σημείο (α) τείνει στο άπειρο ( $Z_a \approx 0$ ), θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η σχέση 4.1.2

Το  $Z_1$  στη προκειμένη περίπτωση αντιπροσωπεύει την εμπέδηση του αέρα( $\rho c$ ), το  $k_1$  είναι ο κυματάρριθμος  $\omega/c$  και το  $L$  θα αντικατασταθεί από το πάχος  $w$  του στρώματος αέρα.

$$Z_\beta = Z_A \coth(jk_A w) \quad (4.2.1)$$

Στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογιστεί η εμπέδηση στο σημείο (γ). Η εμπέδηση  $Z_0$  που μόλις υπολογίστηκε θα χρησιμοποιηθεί σαν  $Z_2$  στη σχέση 4.1.1, όπου τη θέση του  $L$  θα λάβει το πάχος  $d$  του πορώδους υλικού και τα  $Z_1$  και  $k_1$  αντιπροσωπεύουν την εμπέδηση και το σύνθετο συντελεστή διάδοσης του πορώδους, αντίστοιχα. Επομένως, η σχέση 4.1.1 θα τροποποιηθεί ως εξής:



$$Z_\gamma = Z_f \frac{\cosh(jk_f d) + \frac{Z_f}{Z_\beta} \sinh(jk_f d)}{\sinh(jk_f d) + \frac{Z_f}{Z_\beta} \cosh(jk_f d)} \quad (4.2.2)$$

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα ας θεωρήσουμε ότι χρησιμοποιούμε το μοντέλο των Delany και Bazley, οπότε οι σχέσεις που αντιστοιχούν στα  $Z_1$  και  $k_1$  είναι οι σχέσεις (3.2.5.α) και (3.2.5.β) αντίστοιχα.

Προκειμένου να υπολογιστεί η εμπέδηση στο σημείο (δ) θα χρησιμοποιηθεί η σχέση 4.1.3. το  $Z_1$  εδώ είναι η εμπέδηση του πορώδους υλικού ενώ το  $Z_2$  αντιπροσωπεύει την εμπέδηση της διάτρητης επιφάνειας (σχέση 3.4.9). Η Σχέση 4.1.3 λοιπόν τροποποιείται ως εξής:

$$Z_\delta = Z_p + Z_\gamma \quad (4.2.3)$$

Χρησιμοποιώντας τώρα τη σχέση 4.1.4 και βάζοντας όπου  $Z_0$  την εμπέδηση στην επιφάνεια της διάτρητης πλάκας, μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό συντελεστή απορρόφησης του παραπάνω συστήματος.

$$a = 1 - \left| \frac{Z_\delta \cos \theta - \rho c}{Z_\delta \cos \theta + \rho c} \right|^2 \quad (4.2.4)$$

Στην περίπτωση που θέλουμε να υπολογίσουμε το διάχυτο συντελεστή απορρόφησης θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση 4.1.5

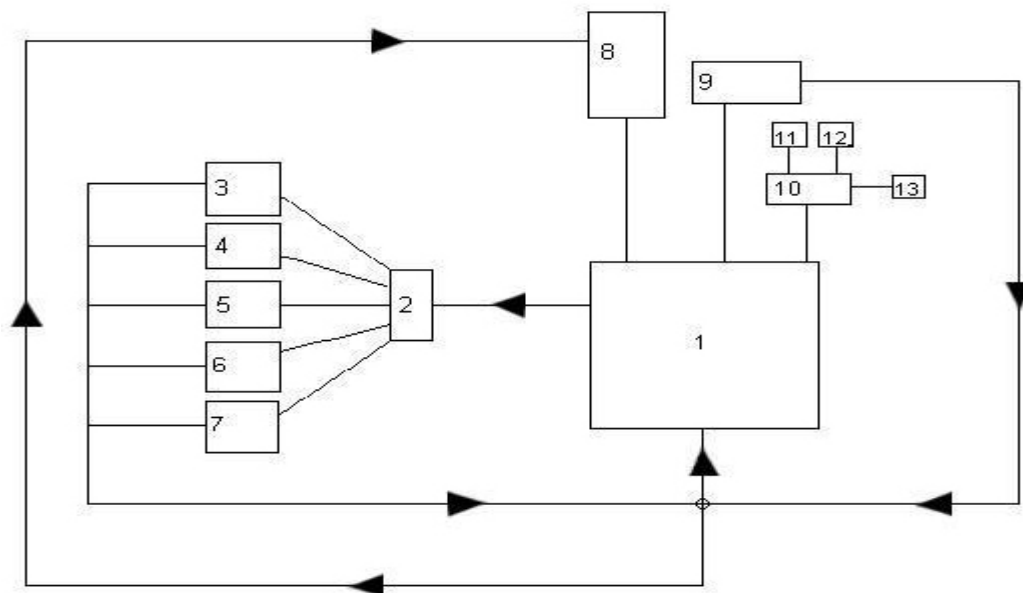
## Κεφάλαιο 5

## Το λογισμικό ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ 1.1

Το λογισμικό ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ 1.1 υπολογίζει τον συνολικό συντελεστή απορρόφησης για σύνθετους απορροφητές οι οποίοι αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα διαφορετικών υλικών τοποθετημένων σε ένα συμπαγή τοίχο. Δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός απορροφητή ο οποίος μπορεί να αποτελείται μέχρι και από 4 υλικά. Προκειμένου ο χρήστης να δημιουργήσει έναν απορροφητή μπορεί να επιλέξει τα παρακάτω υλικά.

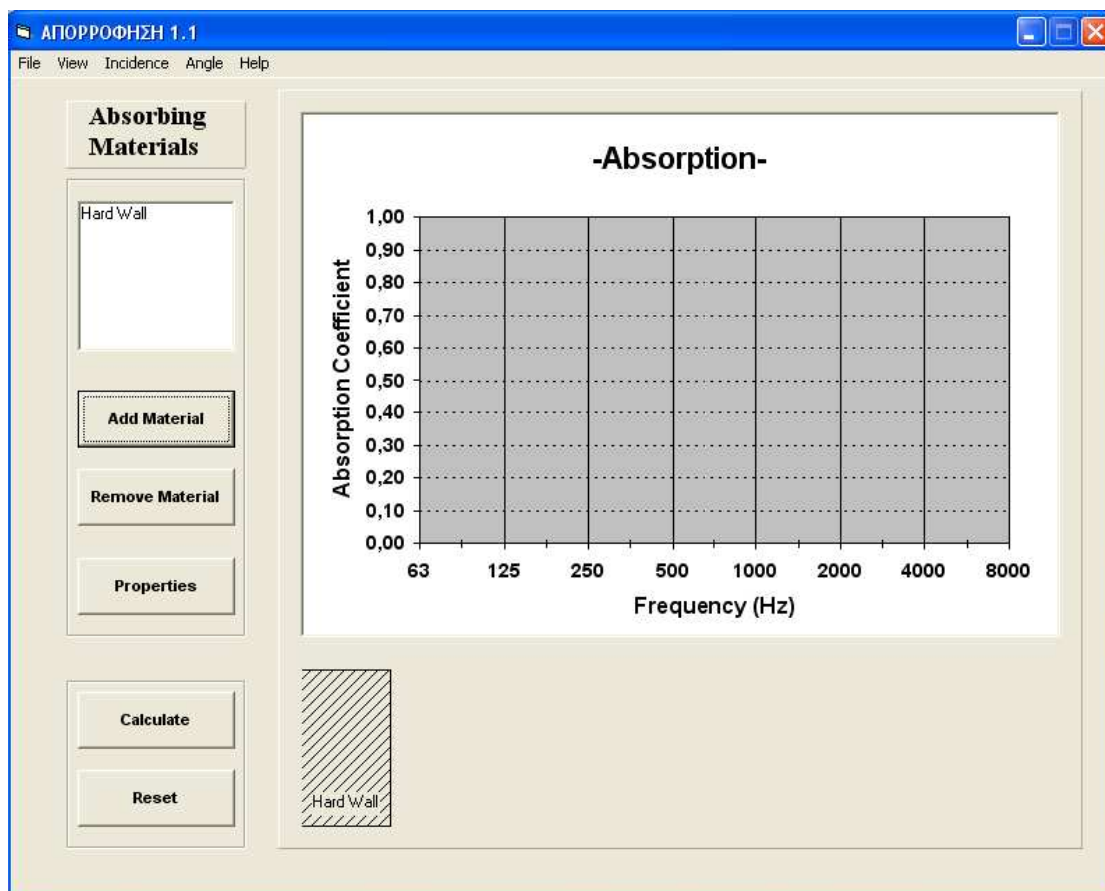
- Μέχρι δύο πορώδη υλικά (βάση του μοντέλου του F.P. Mechel)
- Μέχρι δύο στρώματα αέρα
- Έναν απορροφητή μεμβράνης
- Μία διάτρητη πλάκα
- Ένα λεπτό στρώμα πορώδους υλικού σε κάποια απόσταση από τον τοίχο που δεν μπορεί όμως να συνδυαστεί με άλλα υλικά.

Τις διαφορές ιδιότητες των υλικών όπως για παράδειγμα το πάχος ή τη πυκνότητα των υλικών έχει τη δυνατότητα ο χρήστης να τις ορίσει όπως ο ίδιος επιθυμεί. Παρακάτω παρουσιάζεται το Διάγραμμα ροής του προγράμματος.



- |        |                               |        |               |
|--------|-------------------------------|--------|---------------|
| 1:     | Κεντρική Φόρμα                | 10:    | Help          |
| 2:     | Add Material                  | 11-13: | Υπομενού Help |
| 3 – 7: | Παράθυρα ιδιοτήτων των υλικών |        |               |
| 8:     | Datasheet                     |        |               |
| 9:     | Angle                         |        |               |

Αυτή είναι η κεντρική οθόνη του προγράμματος:



Σχήμα 5.1: Η κεντρική οθόνη του προγράμματος ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ 1.1

## 5.1 Μενού

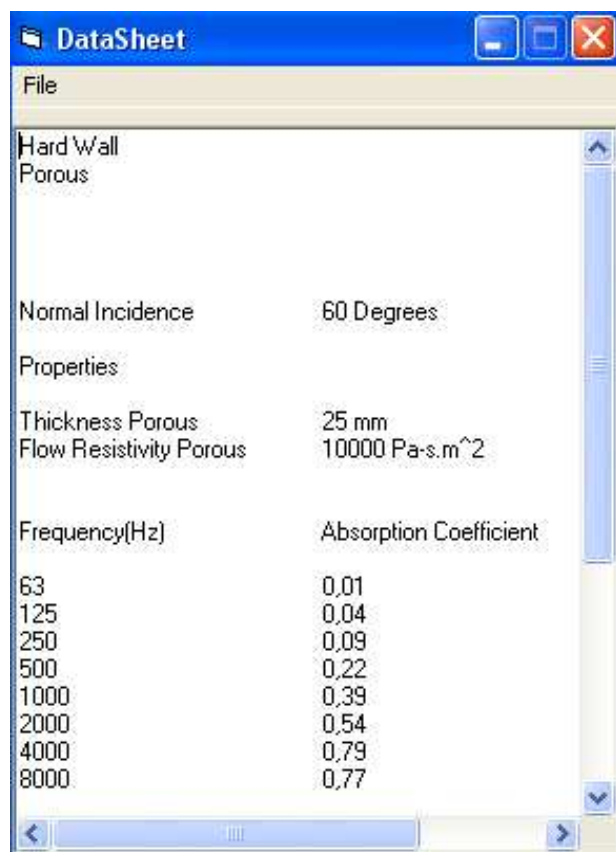
Υπάρχουν πέντε κεντρικά μενού στο πρόγραμμα.  
File, View, Incidence, Angle και Help

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.2, Μπαίνοντας στο Μενού View εμφανίζεται το υπομενού Datasheet. Επιλέγοντας το Datasheet ανοίγει ένα παράθυρο το οποίο δίνει μια αναφορά όλων των στοιχείων που επεξεργάζεται το πρόγραμμα τη δεδομένη στιγμή.



Σχήμα 5.1.2: Στο μενού View ο χρήστης μπορεί να ανοίξει το Datasheet

Το Datasheet Αναφέρει τα υλικά που έχουν τοποθετηθεί στο Hard Wall, τη σειρά με την οποία έχουν τοποθετηθεί, την πρόσπτωση (κανονική – τυχαία), τη γωνία πρόσπτωσης, τις ιδιότητες των υλικών όπως έχουν οριστεί από το χρήστη, το συντελεστή απορρόφησης και την εμπέδηση για τις δεδομένες συχνότητες (Σχήμα 3). Επειδή η εμπέδηση είναι μιγαδικός αριθμός, το πραγματικό και το φανταστικό μέρος αναγράφονται ξεχωριστά.



File	
Hard Wall	
Porous	
Normal Incidence	60 Degrees
Properties	
Thickness Porous	25 mm
Flow Resistivity Porous	10000 Pa·s·m <sup>2</sup>
Frequency(Hz)	Absorption Coefficient
63	0,01
125	0,04
250	0,09
500	0,22
1000	0,39
2000	0,54
4000	0,79
8000	0,77

Σχήμα 5.1.3: Παράδειγμα Datasheet. Στη κορυφή ο χρήστης μπορεί να δει τα υλικά που έχουν εισαχθεί. Παρακάτω αναφέρεται η γωνία πρόσπτωσης και οι ιδιότητες των υλικών με τις τιμές τους και από κάτω ο συντελεστής απορρόφησης και η εμπέδηση για συχνότητες από 63 – 8000 Hz

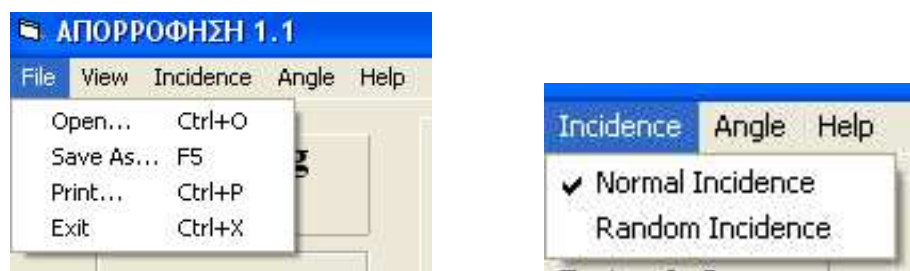
Στο Μενού File υπάρχουν οι εντολές Save As, Open, Print και Exit.(Σχήμα 5.1.4)

Η εντολή Save As, αποθηκεύει το Datasheet σε ένα TXT αρχείο.

Η εντολή Open ανοίγει ένα αποθηκευμένο Datasheet με το όνομα που του έχει αποθηκευτεί

Η εντολή Print ανοίγει ένα παράθυρο μέσα από το οποίο ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τι επιθυμεί να εκτυπώσει καθώς και πόσα αντίγραφα . Αν ο χρήστης επιλέξει να εκτυπώσει το Datasheet, πατώντας το OK το πρόγραμμα θα προχωρήσει αμέσως στην εκτύπωση. Ο χρήστης έχει τη επιλογή να εκτυπώσει όποιο παράθυρο του προγράμματος επιθυμεί. Εάν τσεκαριστεί η επιλογή Print specific window, αυτομάτως ενεργοποιείται μία λίστα από την οποία μπορεί ο χρήστης να επιλέξει εάν θα εκτυπωθεί το κεντρικό παράθυρο ή οποιοδήποτε άλλο βασικό παράθυρο του προγράμματος. Με το OK το πρόγραμμα θα προχωρήσει στην εκτύπωση.

Κάνοντας «κλικ» στην επιλογή Exit μπορείτε να βγείτε από το πρόγραμμα αφού πρώτα έχετε κάνει Save στο τρέχον Datasheet εάν το επιθυμείτε.



Σχήμα 5.1.4: Το μενού File και το μενού Incidence

Το μενού Incidence δίνει στο πρόγραμμα πληροφορίες σχετικά με τη πρόσπτωση. Περιέχει δύο υπομενού (Σχήμα 5.1.4 Δεξιά) Normal Incidence (κανονική πρόσπτωση) και Random Incidence (τυχαία πρόσπτωση). Όπως φαίνεται και στο σχήμα η κανονική πρόσπτωση είναι προεπιλεγμένη ενώ ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τυχαία πρόσπτωση εάν το επιθυμεί. Το πρόγραμμα θεωρεί ότι στις 0 μοίρες η πρόσπτωση είναι κάθετη.

Δίπλα στο μενού Incidence υπάρχει το μενού Angle μέσα από το οποίο ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει τη γωνία πρόσπτωσης σε μοίρες (Σχήμα 5.1.5).

Το μενού Help περιέχει αρχεία βοήθειας σχετικά με την επιλογή των υλικών, με τις Ιδιότητες των Υλικών καθώς και βοήθεια σχετικά με τη λειτουργία του προγράμματος ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ 1.1.



Σχήμα 5.1.5 : σε αυτό το παράθυρο ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τη γωνία πρόσπτωσης

## 5.2 Absorbing Materials

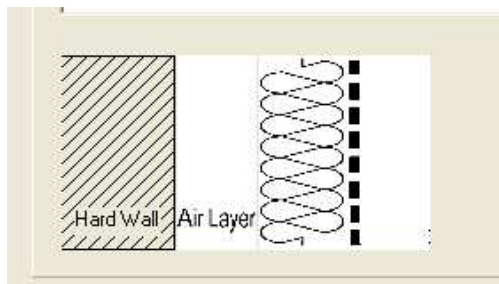
Αριστερά στην κεντρική οθόνη του προγράμματος εμφανίζεται ένα πλαίσιο στη κορυφή του οποίου αναγράφεται “Hard Wall”. Εκεί τοποθετούνται τα υλικά που επιλέγει ο χρήστης. Το πρόγραμμα θεωρεί δεδομένο ότι υπάρχει ένας συμπαγής τοίχος πάνω στον οποίο θα τοποθετηθούν τα υλικά.

## 5.3 Add Material – Remove Material Εισαγωγή ή αφαίρεση υλικού

Ακριβώς κάτω από τη Λίστα υλικών υπάρχουν τα κουμπιά “Add Material” και “Remove Material”. Το κουμπί “Add Material” ανοίγει ένα μικρό παράθυρο με τις εξής επιλογές : Porous, Panel, Perforated Plate, Air και Thin Layer.

Ο χρήστης Μπορεί να επιλέξει ένα ή περισσότερα από αυτά τα υλικά για να τοποθετηθούν στη Λίστα. Υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης δύο υλικών Porous και δύο στρωμάτων αέρα (Air). Το πρόγραμμα μπορεί να διαχειριστεί μέχρι τέσσερα υλικά τη φορά και δεν θα επιτρέψει να εισαχθούν περισσότερα. Με την εισαγωγή ενός υλικού στο πλαίσιο, ταυτόχρονα εισάγεται ένα σχέδιο του συγκεκριμένου υλικού στο κάτω μέρος της κεντρικής φόρμας δίπλα στον συμπαγή τοίχο (Σχήμα 5.3.1)

Το κουμπί “Remove Material” δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να αφαιρέσει τα υλικά που έχουν τοποθετηθεί στη λίστα, ξεκινώντας από το τελευταίο. Ταυτόχρονα αφαιρεί και τις αντίστοιχες εικόνες των υλικών από τη φόρμα. Το “Hard Wall” δεν μπορεί να αφαιρεθεί.



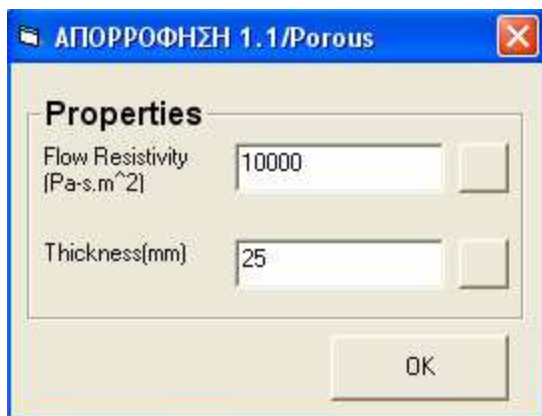
Σχήμα 5.3.1 : Με την εισαγωγή υλικού στο πλαίσιο, εισάγεται και ένα σχήμα στο κάτω μέρος της φόρμας.

## 5.4 Properties

Εάν ο χρήστης επιλέξει ένα υλικό από τη λίστα και πατήσει αυτό το κουμπί, ανοίγει ένα παράθυρο ιδιοτήτων για το συγκεκριμένο υλικό. Το ίδιο συμβαίνει εάν ο χρήστης κάνει διπλό κλικ στο υλικό του οποίου τις ιδιότητες επιθυμεί να ορίσει.

Το κάθε υλικό έχει τις δικές του ιδιότητες. Η κάθε ιδιότητα έχει μια προεπιλεγμένη τιμή την οποία μπορεί να αλλάξει ο χρήστης εάν το επιθυμεί.

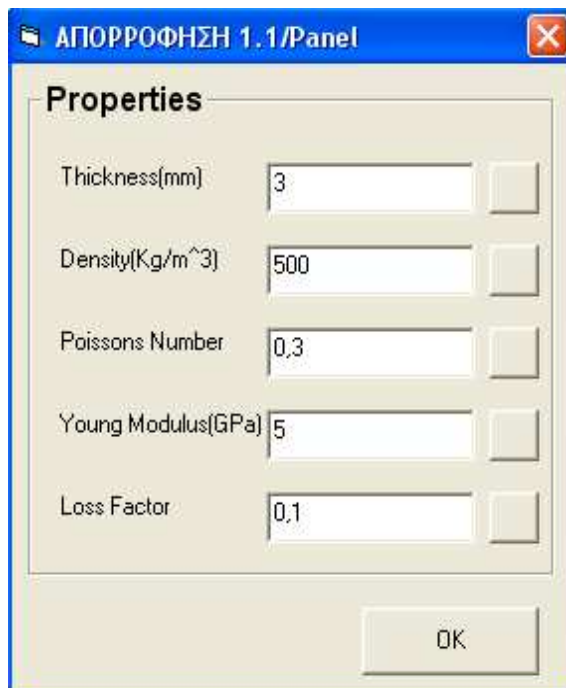
Το παράθυρο ιδιοτήτων για ένα πορώδες υλικό (Porous) φαίνεται στο σχήμα 5.4.1.



Σχήμα 5.4.1: οι ιδιότητες ενός πορώδους υλικού

Το μοντέλο που έχει χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της απορρόφησης ενός πορώδους υλικού είναι το μοντέλο του F.P. Mechel. Οι σχέσεις για την εμπέδηση και για το σύνθετο συντελεστή διάδοσης είναι οι Σχέσεις 3.2.7.α και 3.2.7.β αντίστοιχα.

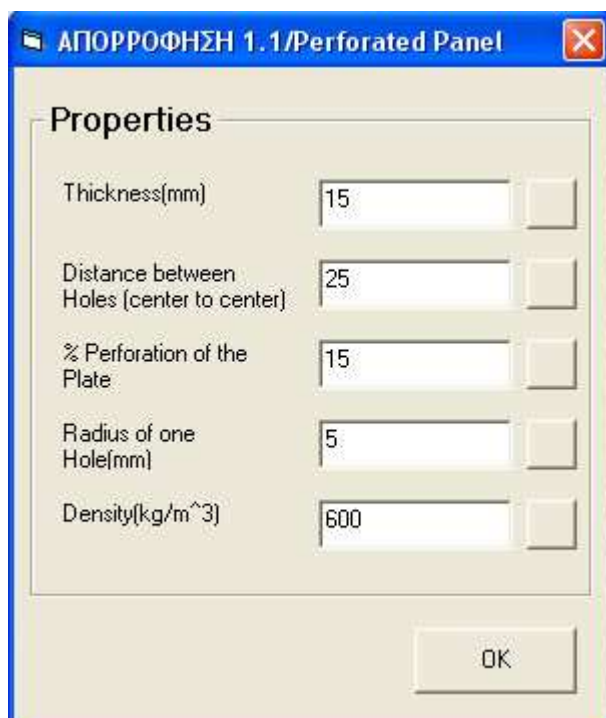
Παρακάτω φαίνεται το παράθυρο ιδιοτήτων για έναν απορροφητή μεμβράνης (Panel). Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της απορροφητικής συμπεριφοράς μιάς μεμβράνης καθώς και πληροφορίες σχετικά αναφέρονται στην Παράγραφο 3.3 καθώς και στις πηγές [8][5]



Property	Value
Thickness(mm)	3
Density(Kg/m <sup>3</sup> )	500
Poissons Number	0,3
Young Modulus(GPa)	5
Loss Factor	0,1

Σχήμα 5.4.2: οι ιδιότητες ενός απορροφητή μεμβράνης

Οι ιδιότητες μίας διάτρητης επιφάνειας φαίνονται στο σχήμα 5.4.3. Η σχέση για την εμπέδηση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ηχοαπορροφητικής συμπεριφοράς μίας διάτρητης επιφάνειας είναι η σχέση 3.4.9

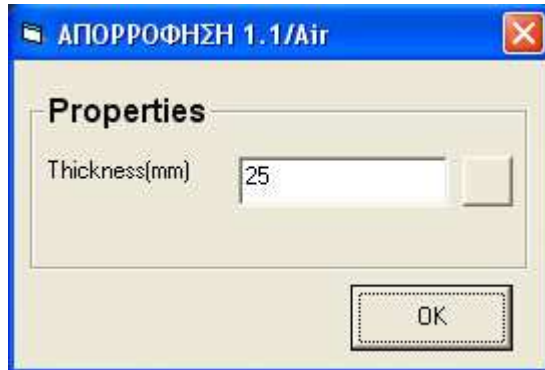


Property	Value
Thickness(mm)	15
Distance between Holes (center to center)	25
% Perforation of the Plate	15
Radius of one Hole(mm)	5
Density(kg/m <sup>3</sup> )	600

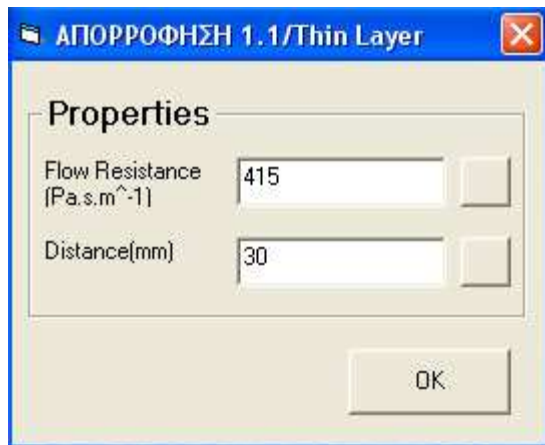
Σχήμα 5.4.3: Οι ιδιότητες μίας διάτρητης επιφάνειας



Στα σχήματα 5.4.4 και 5.4.5 παρουσιάζονται τα παράθυρα ιδιοτήτων για ένα στρώμα αέρα και για ένα λεπτό πορώδες υλικό αντίστοιχα. Η εμπέδηση του αέρα είναι  $\rho c$  δηλαδή 415 υπο κανονικές συνθήκες.



Σχήμα 5.4.4: είναι λογικό η μοναδική ιδιότητα ενός στρώματος αέρα να είναι το πάχος του



Σχήμα 5.4.5: Οι ιδιότητες ενός λεπτού άκαμπτου στρώματος πορώδους υλικού, τοποθετημένου σε κάποια απόσταση από τον τοίχο

Υπάρχουν περιορισμοί στις τιμές που μπορεί να πάρει μία ιδιότητα

Προκειμένου να γίνει το πρόγραμμα πιο λειτουργικό και εκπαιδευτικό, έχει εισαχθεί ένα κουμπί δεξιά από κάθε ιδιότητα, πατώντας το οποίο, ο χρήστης μπορεί να δει πληροφορίες για την κάθε ιδιότητα, τι τιμές μπορεί να πάρει στο πρόγραμμα, με ποιο τρόπο επηρεάζει η ιδιότητα αυτή την απορρόφηση καθώς και μια λίστα από τιμές που παίρνει για συγκεκριμένα υλικά.

Παράδειγμα ενός τέτοιου παραθύρου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα





Σχήμα 5.4.6.

Στο συγκεκριμένο παράθυρο ο χρήστης μπορεί να δει πληροφορίες για τη σταθερά του Young. Στην κορυφή του πλαισίου κειμένου αναγράφεται το εύρος τιμών που μπορεί να εισάγει ο χρήστης για τη συγκεκριμένη ιδιότητα, παρακάτω αναγράφονται πληροφορίες σχετικά με τη σταθερά και τέλος, το πρόγραμμα χρησιμοποιώντας μια βάση δεδομένων υλικών δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει εκείνος ποιο υλικό θέλει να εισάγει.

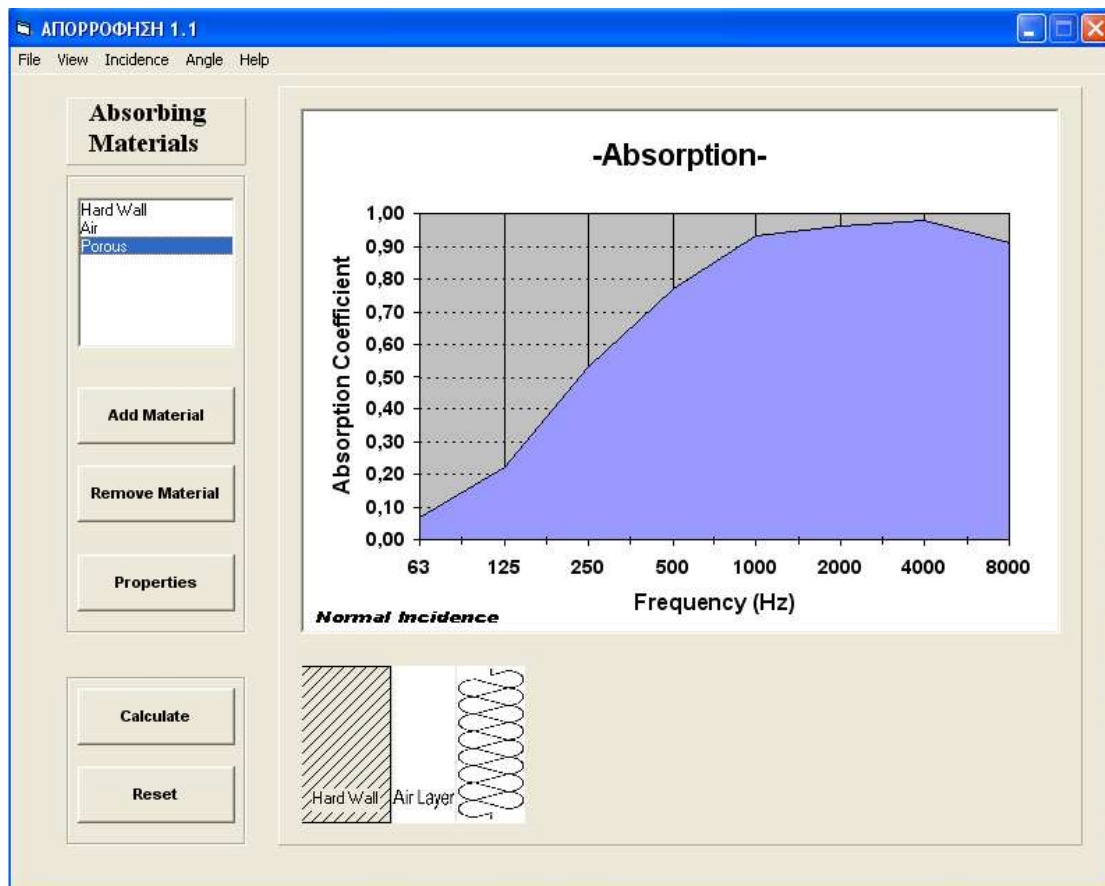
Επιλέγοντας ένα υλικό από τη λίστα και πατώντας το κουμπί Display ο χρήστης μπορεί να δει τι τιμή παίρνει η ιδιότητα για το συγκεκριμένο υλικό (Σχήμα 5.4.6). Αν πραγματοποιηθεί το ίδιο για όλες τις ιδιότητες ο χρήστης μπορεί να αποκτήσει μια αρκετά καλή εικόνα για την ηχοαπορροφητική συμπεριφορά ενός υλικού της επιλογής του.

## 5.5 Calculate - Reset

Αφού έχετε τοποθετήσει τα απορροφητικά υλικά με τη σειρά που θέλετε και έχετε ορίσει τις ιδιότητες τους, πατήστε “Calculate”. Το πρόγραμμα θα επεξεργαστεί τα στοιχεία που έχετε εισάγει και θα παρουσιάσει στο γράφημα τη γραφική παράσταση του συνολικού συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας.

Πατώντας το “Reset” ο χρήστης μηδενίζει το γράφημα και αφαιρεί όλα τα υλικά από τη λίστα. Οι ιδιότητες ωστόσο διατηρούν τις τιμές που έχει ορίσει ο χρήστης.

Παρακάτω Παρουσιάζεται ένα παράδειγμα από μέτρηση ενός πορώδους υλικού πάχους 25 mm και Αντιστάσεως Ροής  $20 \text{ Pa s/m}^2$  πάνω από ένα στρώμα αέρα βάθους 50mm όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι  $60^\circ$  (σχήμα 5.4.1)



Σχήμα 5.4.1: Παράδειγμα υπολογισμού συντελεστή απορρόφησης για ένα απλό συνδυασμό υλικών.

## Κεφάλαιο 6

### Σύγκριση αποτελεσμάτων

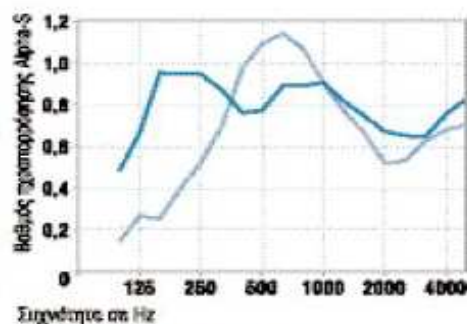
Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων που πήραμε από το πρόγραμμα με αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων σε αντίστοιχες διατάξεις του εμπορίου.

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η αξιολόγηση του προγράμματος και για αυτό το λόγο επιλέξαμε πιστοποιητικά από γνωστές εταιρείες όπως είναι η Knauf και η Geolan. Μετά από κάθε σύγκριση ακολουθεί αξιολόγηση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

#### 6.1 Διάτρητη Επιφάνεια

Συνδυασμός Υλικών	Πάχος
Στρώμα Αέρα	60 mm
Πορώδες Υλικό	20 mm
Διάτρητη Επιφάνεια	12 mm

### Διάτρητη γυψοσανίδα Knauf 8/18Q



Μέτρηση σε 400mm κενό αέρος

Alpha = 0,83 – απορρόφηση

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha_s$	0,66	0,95	0,77	0,90	0,67	0,75

Μέτρηση σε 60mm κενό αέρος

Alpha = 0,84 – απορρόφηση

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha_s$	0,27	0,53	1,09	0,90	0,52	0,68

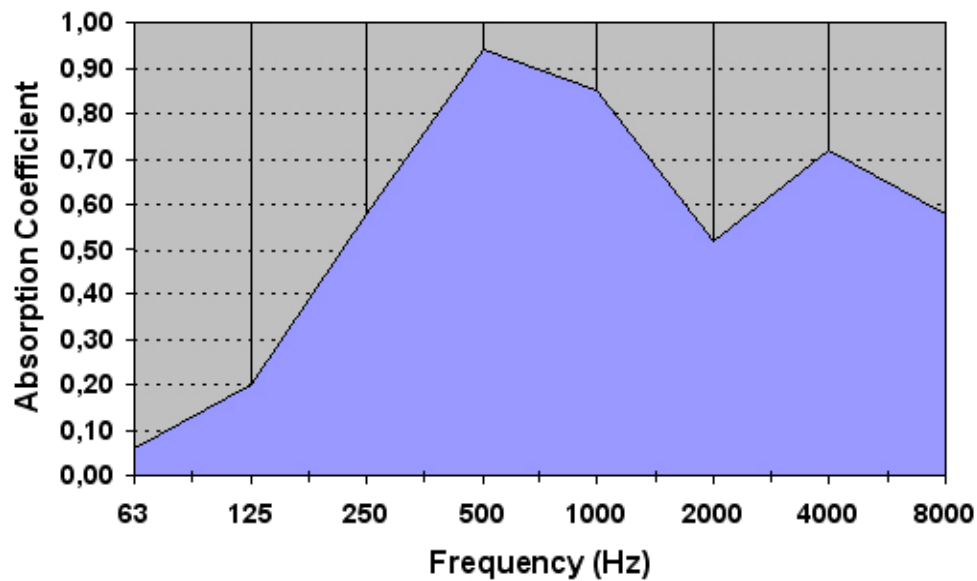
Ινώδες φίλτρο

20mm ηχοαπορροφητική πλάκα

Akustik SSP1



## Πρόγραμμα ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ 1.1

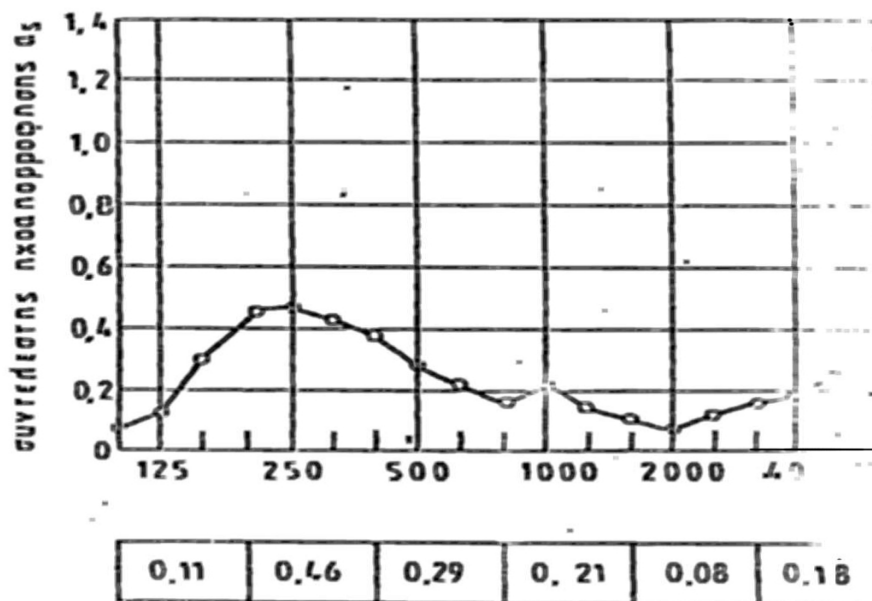


Συχνότητα(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Συντελεστής Απορρόφησης	0,2	0,58	0,94	0,85	0,52	0,72

Εξετάζοντας κάποιος τις τιμές είναι εύκολο να παρατηρήσει την ομοιότητα που υπάρχει σε όλο το φάσμα. Η συχνότητα μέγιστης απορρόφησης είναι κοινή(500 Hz) όπως επίσης και η συχνότητα του ελαχίστου (2 kHz). Η τιμή του συντελεστή απορρόφησης στα 2 kHz είναι ακριβώς η ίδια (0,52) ενώ σε όλες τις υπόλοιπες συχνότητες, η μέγιστη απόκλιση που υπάρχει είναι μέχρι 7 %. Συμπερασματικά λαμβάνοντας υπόψη και το πειραματικό σφάλμα, το πρόγραμμα στα συγκεκριμένα υλικά είναι απολύτως αξιόπιστο.

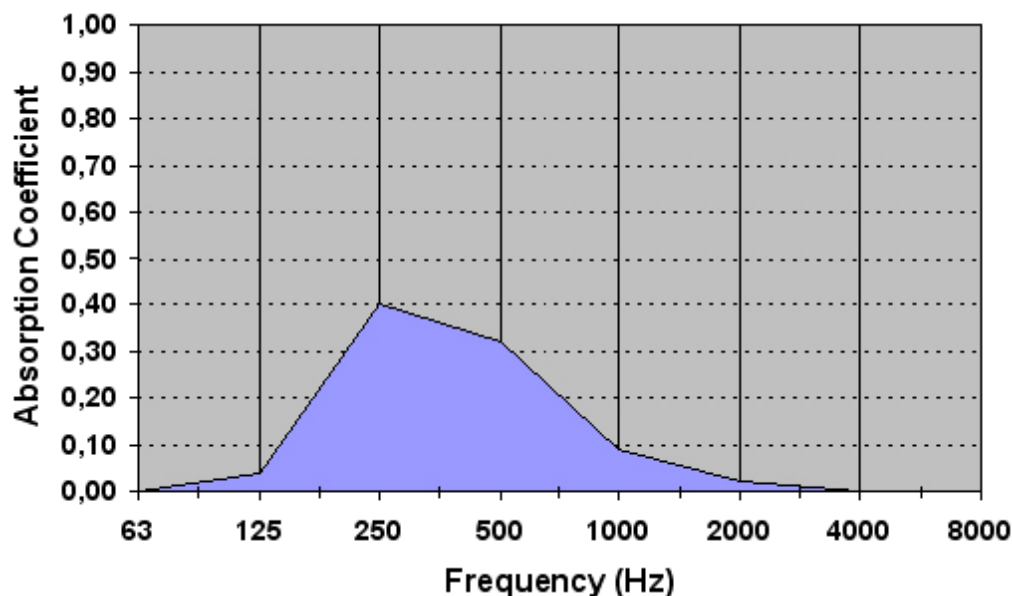
## 6.2 Απορροφητής Μεμβράνης

Τύπος Απορροφητή	Συνδυασμός Υλικών	Πάχος
Απορροφητής Μεμβράνης	Στρώμα Αέρα	60 mm
	Μεμβράνη(Κόντραπλακέ	3 mm



Πιστοποιητικό Μέτρησης από το Εργαστήριο Ηχοτεχνίας του Αριστοτέλειου  
Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

## Πρόγραμμα ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ 1.1

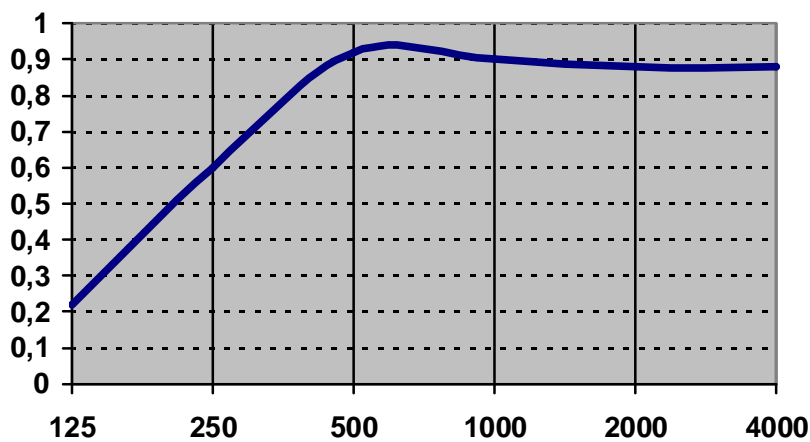
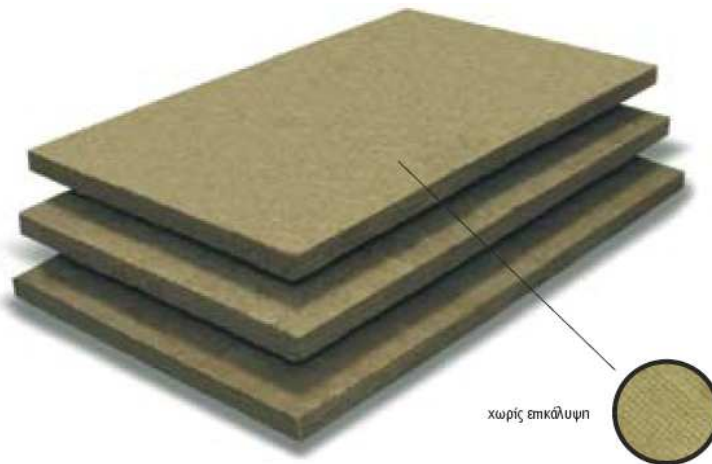


Συχνότητα(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Συντελεστής Απορρόφησης	0,04	0,4	0,32	0,1	0,02	0

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ενώ η συχνότητα της κορυφής είναι κοινή και η τιμή του συντελεστή απορρόφησης έχει μικρή απόκλιση από την τιμή της μέτρησης, (σίγουρα μέσα στα όρια του επιτρεπτού) όσο απομακρυνόμαστε από την κεντρική συχνότητα η απόκλιση μεγαλώνει. Υπενθυμίζουμε ότι το μοντέλο υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι προσεγγιστικό και δύναται να υπολογίσει μόνο τη βασική συχνότητα συντονισμού του πάνελ. Ως εκ τούτου στις συχνότητες συντονισμού ανώτερης τάξης του πάνελ η απορρόφηση που υπολογίζουμε είναι μικρότερη από την πειραματικά μετρούμενη. Δεδομένου όμως ότι οι απορροφητές τύπου πάνελ χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για τον έλεγχο των πολύ χαμηλών συχνοτήτων (καθότι οι υψηλότερες συχνότητες απορροφούνται συνήθως από πορώδη ή διάτρητα ηχοαπορροφητικά στοιχεία) σε χώρους υψηλών ακουστικών απαιτήσεων (λ.χ. ηχογραφικά κέντρα) εκτιμούμε ότι η ακρίβεια των υπολογισμών μας είναι σε πρώτη προσέγγιση ικανοποιητική.

### 6.3 Πορώδες Υλικό

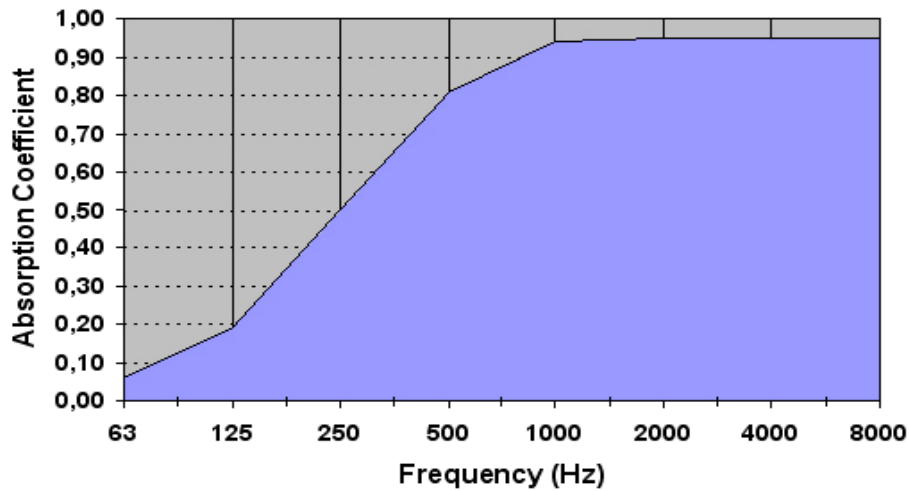
Τύπος Απορροφητή	Υλικό	Πάχος
Πορώδες	Πετροβάμβακας	50 mm



Συντελεστής Απορρόφησης Υλικού για τυχαία πρόσπτωση

	Octave band frequency in Hz						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Rockwool thickness = 50 mm, 80 kg/m <sup>3</sup>	0.22	0.6	0.92	0.90	0.88	0.88	0.88

## Πρόγραμμα ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ 1.1



Συχνότητα(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Συντελεστής Απορρόφησης	0,19	0,51	0,81	0,94	0,95	0,95

Αρχικά, οφείλουμε να παρατηρήσουμε την εμφανή ομοιότητα που παρουσιάζει η παραπάνω καμπύλη με την καμπύλη που αναμέναμε σύμφωνα με τη θεωρία της παραγράφου 3.2. Συγκριτικά με την εργαστηριακή μέτρηση μπορούμε να δούμε ότι στις υψηλές συχνότητες, όπου και χρησιμοποιούνται ως επι το πλείστον τα πορώδη απορροφητικά υλικά, τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι ικανοποιητικά (μέχρι 7 % απόκλιση). Ακριβή είναι επίσης τα αποτελέσματά μας και στις πολύ χαμηλές (125 Hz) ενώ το πρόγραμμα παρουσιάζει μία κάπως μεγαλύτερη απόκλιση στα 250 – 500 Hz η οποία όμως σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνάει το 11 %.



## 6.4 Συμπεράσματα

Κατά τη διάρκεια υλοποίησης της πτυχιακής εργασίας παρατηρήθηκαν ελλείψεις στη βιβλιογραφία και συγκεκριμένα σε πληροφορίες που αφορούν τους απορροφητές μεμβράνης και σε λιγότερο βαθμό διάτρητες επιφάνειες. Η προσπάθεια να εντοπίσουμε στη βιβλιογραφία ένα ικανοποιητικό μοντέλο για την εμπέδηση του πάνελ δεν απέφερε καρπούς καθώς τα μοντέλα που επικρατούν, είναι στην πλειονοψηφία τους ατελή, λειτουργούν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ή δεν λειτουργούν καθόλου. Ένα πιο αξιόπιστο μοντέλο είναι αυτό που προτείνει ο Mechel του οποίου όμως η πολυπλοκότητα το καθιστά πρακτικά αδύνατο να υλοποιηθεί. Σε αυτό το γεγονός οφείλεται και η σχετικά μεγάλη απόκλιση (συγκριτικά με τις υπόλοιπες ηχοαπορροφητικές διατάξεις που μοντελοποιήθηκαν) που παρατηρούμε στο συντελεστή απορρόφησης του πάνελ. Στα υπόλοιπα ωστόσο στοιχεία (πορώδη, διάτρητες επιφάνειες), το λογισμικό δίνει ακριβή αποτελέσματα γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία του. Η δυνατότητα που παρέχεται στο χρήστη να ορίζει ο ίδιος τη γωνία πρόσπτωσης, καθιστά το πρόγραμμα ιδανικό για χρήση σε studio ηχογραφήσεων όπου απαιτείται γνώση του συντελεστή απορρόφησης υπο γωνία με σκοπό την απορρόφηση των ανεπιθύμητων πρώτων ανακλάσεων.

Μετά από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε και έχοντας υπόψη τα παραπάνω, έχουμε τη δυνατότητα να προτείνουμε πιθανά θέματα για μελλοντικές πτυχιακές εργασίες με βάση την παρούσα. Αρχικά θα μπορούσαν να προστεθούν μοντέλα για τον υπολογισμό περισσότερων τύπων απορροφητών. Με βάση το μοντέλο για διάτρητες επιφάνειες θα μπορούσε να δημιουργηθεί μοντέλο για υπολογισμό μικροδιάτρητων επιφανειών καθώς και υπολογισμό του συντελεστή απορρόφησης για τοπικά αντιδρώντα συστήματα. Μία χρήσιμη και λειτουργική προσθήκη στο πρόγραμμα θα ήταν αυτή του υπολογισμού του χρόνου αντήχησης  $R_T$  και συχνотικής απόκρισης του χώρου στις χαμηλές συχνότητες. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη την προαναφερθείσα έλλειψη της βιβλιογραφίας σε μοντέλα για το πάνελ, προτείνουμε την στατιστική επεξεργασία ειδικών λύσεων των πολύπλοκων εξισώσεων του Mechel με σκοπό τη δημιουργία ενός εφαρμόσιμου ημι-εμπειρικού κανόνα για τον υπολογισμό της απορρόφησης του.

## Βιβλιογραφία

- [1] Beranek, L, Vér L, L. (2006) “Noise and Vibration Control Engineering”, Second Edition
- [2] Σκαρλάτος, Δ. (2003) “Εφαρμοσμένη Ακουστική”
- [3] Vorlader, M.(2008) “Auralization”, First Edition
- [4] Bies, D, Hansen, C. (1988) “Engineering Noise Control”
- [5] Pierce, A, D.(1991) “Acoustics – an introduction to its Physical Principles and Applications”, Second Edition
- [6] Halvorson, M.(1998) Microsoft Visual Basic 6.0 Professional Step by Step

## Επιστημονικά Άρθρα

- [7] Attenborough, K. (1985) “Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces”, *Journal of Sound and Vibration*. **99**(4), 521 – 544.
- [8] Mechel, F. P. (2001) “Panel Absorber”, *Journal of Sound and Vibration*. **248**(1),
- [9] Panteghini, A, Genna, F, Piana, E. (2007) “Analysis of a Perforated Panel for the Correction of Low Frequency Resonances in Medium Size Rooms” , *Applied Acoustics* **68**, 1086 – 1103.
- [10] Ying-Chun Chang, Long-Jyi Yeh, Min-Chie Chiu. (2005) “Optimization of Constrained Composite Absorbers Using Simulated Annealing”, *Applied Acoustics* **66**, 341 - 352  
43 - 70
- [11] Kristiansen U. R, Vigran T. E. (1994) “On the Design of Resonant Absorbers Using a Slotted Plate” *Applied Acoustics* **43**, 39-48

## Λοιπές Πηγές

- [12] Vigran, T, E. WINFLAG 1.2 Help
- [13] <http://citysoundproofing.com/materials.html>
- [14] <http://en.wikipedia.org/wiki/>
- [15] [www.acousticalsolutions.com/education/pdfs/SoundDiffusion](http://www.acousticalsolutions.com/education/pdfs/SoundDiffusion)

## Παράρτημα Α Τυπολόγιο

Συντελεστής ανάκλασης  $r = \frac{W_r}{W_i} = \frac{I_r}{I_i}$

Συντελεστής ανάκλασης για κάθετη πρόσπτωση  $r = \frac{(z_2 - z_1)^2}{(z_2 + z_1)^2}$

Συντελεστής ανάκλασης για πλάγια πρόσπτωση  $r = \frac{(z_2 \cos \theta_i - z_1 \cos \theta_t)^2}{(z_2 \cos \theta_i + z_1 \cos \theta_t)^2}$

Συντελεστής διάδοσης  $\tau = \frac{W_t}{W_i} = \frac{I_t}{I_i}$

Συντελεστής διάδοσης για κάθετη πρόσπτωση:  $\tau = \frac{(4z_1 z_2)}{(z_2 + z_1)^2}$

Συντελεστής διάδοσης για πλάγια πρόσπτωση:  $\tau = \frac{(4z_1 z_2 \cos \theta_i \cos \theta_t)}{(z_2 \cos \theta_i + z_1 \cos \theta_t)^2}$

Συντελεστής απορρόφησης  $a = \frac{W_a}{W_i} = \frac{I_a}{I_i}$

Μηχανική Εμπέδηση  $Z_m = F/u = pA/u$

Ειδική ακουστική Εμπέδηση  $Z = p/U$

Ακουστική Εμπέδηση  $Z_d = p/v = p/uA$

Εμπέδηση λεπτού στρώματος πορώδους υλικού  $z' = \frac{Rf}{\rho_0 c_0}$

Συνολική εμπέδηση ενός συστήματος

Τοίχος – Αέρας – λεπτό πορώδες υλικό

$$Z = z' + jz'' = \frac{Rf}{\rho_0 c_0} + j \cot(kt)$$

Μέγιστη τιμή του συντελεστή απορρόφησης

Για ένα λεπτό πορώδες υλικό μπροστά από

ένα τοίχο

$$a_{\max} = \frac{4z'}{(1+z')^2}$$

Συντελεστής απορρόφησης για

ένα λεπτό πορώδες υλικό σε

$$a(f) = \left\{ \left[ \left( \frac{Rf}{\rho_0 c_0} \right)^{0.5} + \left( \frac{\rho_0 c_0}{Rf} \right)^{0.5} \right]^2 + \frac{\rho_0 c_0}{Rf} \cot^2 \left( \frac{2\pi f t}{c_0} \right) \right\}^{-1}$$

κάποια αποσταση από ένα τοίχο

Εμπέδηση ενός πορώδους σύμφωνα

με το μοντέλο των Delany – Bazley

$$Z_f = \rho_0 c_0 (1 + 0.0571 \cdot E^{-0.751} - j0.087 \cdot E^{-0.732})$$

Σύνθετος συντελεστής Διάδοσης για

Ένα πορώδες υλικό σύμφωνα με το

$$k_f = j \frac{\omega}{c_0} (1 + 0.0978 \cdot E^{-0.7} - j0.189 \cdot E^{-0.595})$$

Μοντέλο των Delany - Bazley

Εμπέδηση ενός πορώδους σύμφωνα

Με το μοντέλο του Miki

$$Z_f = \rho_0 c_0 (1 + 0.070 \cdot E^{-0.632} - j0.107 \cdot E^{-0.632})$$

Σύνθετος συντελεστής Διάδοσης για

Ένα πορώδες υλικό σύμφωνα με το

$$k_f = j \frac{\omega}{c_0} (1 + 0.109 \cdot E^{-0.618} - j0.160 \cdot E^{-0.618})$$

Μοντέλο του Miki

Οι τύποι του Mechel για την Εμπέδηση  
ενός Πορώδους υλικού

$$Z_f = \rho_0 c_0 (1 + 0.0563 \cdot E^{-0.725} - j 0.127 \cdot E^{-0.655})$$

εάν το  $E \geq 0.025$

$$Z_f = \rho_0 c_0 (1 + 0.081 \cdot E^{-0.699} - j 0.191 \cdot E^{-0.566})$$

εάν το  $E \leq 0.025$

Οι τύποι του Mechel για τον Σύνθετο  
Συντελεστή διάδοσης ενός Πορώδους  
Υλικού.

$$k_f = \frac{\omega}{c_0} \left( 1 + 0.179 E^{-0.663} - j \left( 1 + 0.103 \cdot E^{-0.716} \right) \right)$$

εάν το  $E \geq 0.025$

$$k_f = \frac{\omega}{c_0} \left( 1 + 0.322 \cdot E^{-0.502} - j \left( 1 + 0.136 \cdot E^{-0.641} \right) \right)$$

εάν το  $E \leq 0.025$

Στους παραπάνω τύπους για την εμπέδηση  
Το  $E$  αποτελεί μια αυθαίρετη παράμετρο  
την οποία εισήγαγαν οι Delany και Bazley  
για τον καθορισμό της Εμπέδησης

$$E = \frac{\rho_0 f}{R_f}$$

Porosity

$$h = \frac{V_v}{V_t}$$

Tortuosity

$$T = \frac{1}{h}$$

Συχνότητα συντονισμού Συνηχητή  
Helmholtz

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{Vl}}$$

Συχνότητα συντονισμού Διάτρητης  
Επιφάνειας με κυκλικές οπές

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(1+\delta)}}$$

Συχνότητα συντονισμού Διάτρητης  
Επιφάνειας με οπές με μορφή σχισμών

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(1+Kb)}}$$

Στην Παραπάνω σχέση στην περίπτωση

Σχισμών πεπερασμένου μήκους ισχύει:

$$K = \frac{1}{\pi} + \frac{2}{\pi} \ln \frac{2a}{b}$$

Στην περίπτωση σχισμών απείρου μήκους

Ισχύει:

$$K = \frac{2}{\pi} \ln \left( \cos ec \frac{\pi}{2} P \right)$$

Η ακουστική Εμπέδηση που οφείλεται

Στις οπές μιας Διάτρητης Επιφάνειας

$$Z_{Ah} = \frac{100}{PS} (j\rho c \tan(kl(1-M)) + R_A A)$$

Η ακουστική εμπέδηση που οφείλεται

Στη μάζα της διάτρητης επιφάνειας

$$Z_{Ap} = \frac{j\omega m}{S}$$

Η ακουστική Εμπέδηση της Μάζας

Παράλληλα με τις οπές της πλάκας

$$Z_p = \frac{Z_{Ah}}{1 + \frac{Z_{Ah}}{Z_{Ap}}} = \frac{\frac{100}{PS} (j\rho c \tan(kl(1-M)) + R_A A)}{1 + \frac{100}{j\omega m P} (j\rho c \tan(kl(1-M)) + R_A A)}$$

To End Correction για κάθε πλευρά

Μίας διάτρητης πλάκας

$$l_0 = \frac{8a}{3\pi} \left( 1 - 0,43 \frac{a}{q} \right)$$

Η ακουστική αντίσταση

$$R_A = \frac{\rho c}{A} \left[ \frac{ktDw}{2A} \left( 1 + (\gamma - 1) \sqrt{\frac{5}{3\gamma}} \right) + 0,288kt \log_{10} \left( \frac{4A}{\pi h^2} \right) + \varepsilon \frac{Ak^2}{2\pi} + M \right]$$

Μίας διάτρητης πλάκας

Στον παραπάνω τύπο ισχύει:

$$t = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho\omega}}$$

Εμπέδηση Μεμβράνης

$$Z_s = j\omega m \left[ 1 - \left( \frac{f}{f_{cr}} \right)^2 \cdot (1 + j\eta) \sin^4 \theta \right]$$

Κεντρική συχνότητα

μεμβράνης

$$f_{cr} = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B}}$$

Bending Stiffness

$$B = \frac{E}{1-u^2} \cdot I = \frac{E}{1-u^2} \cdot \frac{d^3}{12}$$

Πυκνότητα

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Επιφανειακή πυκνότητα Υλικού

$$\rho = \frac{m}{d}$$

Η συνολική Εμπέδηση μίας επιφάνειας με εμπέδηση  $Z_1$  τοποθετημένης πάνω σε μία επιφάνεια εμπέδησης  $Z_2$  όταν η επιφάνεια 1 είναι πορώδες υλικό ή αέρας

$$Z_{tot} = Z_1 \frac{\cosh(jk_1 L_1) + \frac{Z_1}{Z_2} \sinh(jk_1 L_1)}{\sinh(jk_1 L_1) + \frac{Z_1}{Z_2} \cosh(jk_1 L_1)}$$

Η συνολική Εμπέδηση μίας επιφάνειας με εμπέδηση  $Z_1$  τοποθετημένης πάνω σε ένα συμπαγή τοίχο

$$Z_{tot} = Z_1 \coth(jk_1 L_1)$$

Η εμπέδηση μίας επιφάνειας με εμπέδηση  $Z_1$  τοποθετημένης μπροστά από μία επιφάνεια με εμπέδηση  $Z_2$  όταν η επιφάνεια 1 είναι Διάτρητη ή απλή Μεμβράνη

$$Z_{tot} = Z_1 + Z_2$$

## Παράρτημα Β

### Κώδικας Προγραμματισμού Visual Basic

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που περιέχεται στην πρώτη Φόρμα του προγράμματος στην οποία και πραγματοποιούνται οι βασικότεροι υπολογισμοί.

```
Dim z1 As Complex
Dim k1 As Complex

Dim empedisilayer(1, 8) As Variant
Dim propag(0, 8) As Complex
Dim propag1(7, 8) As Complex
Dim empedisiWTM(0, 8) As Complex
Dim empedisiWDM(0, 8) As Complex
Dim empedisiWM(0, 12) As Complex
Dim empedisiW(0, 12) As Complex
Dim empedisi(0, 12) As Complex
Dim empedisi1(7, 12) As Complex

Dim f
Dim u As Double
Dim iota As Complex
Dim ip 'metablhth gia pinaka empedhshs porous
Dim ipan 'metablhth gia empedhsi panel
Dim ih ' metablhth gia emped helmholtz
Dim itl ' metablhth gia empadisi Thin Layer
Dim ia ' metablhth gia empedisi Air
Dim msg, NewLine, Tabb
Dim lf As Double
Dim fres As Double

Dim Properties1 As Variant
Dim Properties2 As Variant
Dim Properties3 As Variant
Dim Properties4 As Variant
Dim oGraphChart As Graph.Chart
Dim r As Double
Dim z100 As Double
Dim bend As Double
Dim m As Double
Dim d As Double
Dim pc As Double
Dim j 'metavlhth gia pinaka aporroghshs
Dim i 'deikths pinaka empedhshs gia aporrofhsh

Private Sub Common_Error()
'-----
'This is used to catch the error
```



```
'that occurs when Cancel is clicked,  
'otherwise the problem will crash.  
'-----
```

```
If error is 32755("Cancel was clicked") then  
If Err.Number = 32755 Then  
    'Do nothing because  
    'nothing is required...  
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdPrint_Click()  
'-----  
'The Print command button is clicked.  
'-----
```

```
If an error occurs goto ErrorH(below)...
```

```
'The Print button will only display the box and not print...  
Load Form26  
Form26.Show
```

```
'Show the Print dialog box...
```

```
'If an error occurs(usually when Cancel is clicked)  
'Call the Common_Error sub-routine...  
    'Exit the sub(if an error)...
```

```
End Sub
```

```
Private Sub vbAbsorbtionData_Click()  
Load Form25  
Form25.Show  
Form1.vbAbsorbtionData.Enabled = False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub vbSave_Click()  
'note: the entire file is stored in a string  
    Form1.CommonDialog.Filter = "Text files (*.TXT)|*.TXT"  
    Form1.CommonDialog.ShowSave    'display Save dialog  
    If Form1.CommonDialog.FileName <> "" Then  
        Open Form1.CommonDialog.FileName For Output As #1  
        Print #1, Form25.Text1.Text 'save string to file  
        Close #1                    'close file  
    End If
```

End Sub

Private Sub cmdOpen\_Click()

'-----

'The Open command button is clicked.

'-----

'If an error occurs goto ErrorH(below)...

On Error GoTo ErrorH

'This setups the dialog box to only

'allow Icons to be loaded...

CommonDialog.Filter = "Text files (\*.TXT)|\*.TXT"

'The Open dialog box is shown...

CommonDialog.ShowOpen

'The line below is run AFTER Ok is clicked on the

'Open box.

'The chosen picture is loaded into the image control...

imgLoad.Picture = LoadPicture(CommonDialog.FileName)

'If an error occurs(usually when Cancel is clicked)

ErrorH:

Common\_Error 'Call the Common\_Error sub-routine...

Exit Sub 'Exit the sub(if an error)...

End Sub

Private Sub Command1\_Click()

Load Form2

Form2.Show

End Sub

Private Sub Command2\_Click()

Load Form25

Form25.Show

End Sub

Private Sub Command4\_Click()

```
ProgressBar1.Visible = True
If List1.ListCount = 2 Then
    ProgressBar1.Min = 0
    ProgressBar1.Max = 1500
    For i = 0 To 1500 Step 1
        ProgressBar1.Value = i
    Next i

    ElseIf List1.ListCount = 3 Then
        ProgressBar1.Min = 0
        ProgressBar1.Max = 4000
        For i = 0 To 4000 Step 1
            ProgressBar1.Value = i
        Next i

        ElseIf List1.ListCount = 4 Then
            ProgressBar1.Min = 0
            ProgressBar1.Max = 6000
            For i = 0 To 6000 Step 1
                ProgressBar1.Value = i
            Next i

            ElseIf List1.ListCount = 5 Then
                ProgressBar1.Min = 0
                ProgressBar1.Max = 11000
                For i = 0 To 11000 Step 1
                    ProgressBar1.Value = i
                Next i

            End If
            If ProgressBar1.Value = ProgressBar1.Max Then
                ProgressBar1.Visible = False
                Form25.Text1.Text = ""
                Tab = vbTab
                NewLine = vbNewLine

                pc = 415
                c = 343
                p = 1.21
                pi = 3.14159265358979
```

```
f = 62.5
    For i = 0 To 8 Step 1
```

```

'gemize pinakes me z kai k porous
r = Form3.Text1.Text 'flow Resistivity Porous
d = Form3.Text2.Text 'Thickness porous
d = d / (10 ^ 3)
iota.re = 0
iota.im = 1

If (p * f / r) >= 0.025 Then

    z1.re = pc * (1 + 0.0563 * (p * f / r) ^ -0.725)
    z1.im = pc * (-0.127 * (p * f / r) ^ -0.655)
    k1.re = (2 * pi * f / c) * (1 + 0.103 * (p * f / r) ^ -0.716)
    k1.im = (((2 * pi * f) / c) * (-0.179) * (p * f / r) ^ -0.663)

ElseIf (p * f / r) < 0.025 Then

    z1.re = pc * (1 + 0.081 * (p * f / r) ^ -0.699)
    z1.im = pc * (-0.191 * (p * f / r) ^ -0.556)
    k1.re = (2 * pi * f / c) * (1 + 0.136 * (p * f / r) ^ -0.641)
    k1.im = (((2 * pi * f) / c) * (-0.322) * (p * f / r) ^ -0.502)
End If
empedisi1(0, i) = z1
propag1(0, i) = k1

f = f * 2

Next i

f = 62.5
For i = 0 To 8 Step 1
    'gemize pinakes me z kai k porous B
    r = Form23.Text1.Text 'flow Resistivity Porous B
    d = Form23.Text2.Text 'Thickness porous B
    d = d / (10 ^ 3)
    iota.re = 0
    iota.im = 1

```

```

If (p * f / r) >= 0.025 Then

    z1.re = pc * (1 + 0.0563 * (p * f / r) ^ -0.725)
    z1.im = pc * (-0.127 * (p * f / r) ^ -0.655)
    k1.re = (2 * pi * f / c) * (1 + 0.103 * (p * f / r) ^ -0.716)
    k1.im = (((2 * pi * f) / c) * (-0.179) * (p * f / r) ^ -0.663)

ElseIf (p * f / r) < 0.025 Then

    z1.re = pc * (1 + 0.081 * (p * f / r) ^ -0.699)
    z1.im = pc * (-0.191 * (p * f / r) ^ -0.556)
    k1.re = (2 * pi * f / c) * (1 + 0.136 * (p * f / r) ^ -0.641)
    k1.im = (((2 * pi * f) / c) * (-0.322) * (p * f / r) ^ -0.502)

```

```

End If
empedisi1(5, i) = z1
propag1(5, i) = k1
f = f * 2
Next i

```

```

f = 62.5
For i = 0 To 8 Step 1      'gemizei pinaka me z panel

```

```

d = Form4.Text1.Text 'thickness panel
d = d / (1000)
lf = Form4.Text6.Text 'loss factor panel
p1 = Form4.Text2.Text 'Density panel
u = Form4.Text3.Text 'Poisson panel
E = Form4.Text4.Text * (10 ^ 9) '??? Young panel

```

```

X = Form4.Text5.Text
m = p1 * d 'mass panel
bend = (E / (1 - (u ^ 2))) * ((d ^ 3) / 12)
sq = m / bend
fmax = (1 / (2 * pi)) * (Sqr((p * (c ^ 2)) / (m * (Form10.Text2.Text / 1000))))

```

```

fg = ((c ^ 2) / (2 * pi)) * (Sqr(sq))

```

```

z1.re = ((2 * pi * m * lf) / (fg ^ 2)) * ((f ^ 3) * ((Sin(X)) ^ 4))
z1.im = -((2 * pi * m * f) + (2 * pi * m / (fg ^ 2)) * (f ^ 3) * ((Sin(X)) ^ 4))
empedisi1(1, i) = z1

```

```

f = f * 2
Next i

```

```

f = 62.5
For i = 0 To 8 Step 1
    'gemizei pinakes me z kai k air

```

```

iota.re = 0
iota.im = 1
d = Form10.Text2.Text 'Thickness Air
d = d / (10 ^ 3)
z1.re = pc
z1.im = 0
k1.re = 2 * pi * f / c
k1.im = 0

```

```

empedisi1(2, i) = z1

```

```

propag1(2, i) = k1

f = f * 2
Next i
f = 62.5
For i = 0 To 8 Step 1
d = Form20.Text2.Text 'Thickness Air
d = d / (10 ^ 3)
z1.re = pc
    z1.im = 0
    k1.re = 2 * pi * f / c
    k1.im = 0

    empedis1(4, i) = z1
    propag1(4, i) = k1
f = f * 2
Next i

Dim emp1 As Double
f = 125
z.re = 0
z.im = 0
For i = 0 To 8 Step 1 'gemizei pinaka me z perforated plate

iota.re = 0
iota.im = 1
d = Form5.Text1.Text 'thickness plate
d = d / (10 ^ 3)
q = Form5.Text2.Text 'distance btwin holes(center to center)
q = q / (10 ^ 3)
perf = Form5.Text3.Text ' % perforation
rad = Form5.Text4.Text 'aktina hole
rad = rad / (10 ^ 3)
p1 = Form5.Text5.Text ' Density perforated plate
fres = Form5.Combo1.Text
erend = ((8 * rad) / (3 * pi)) * (1 - (0.43 * rad / q))
Length = d + 2 * erend * ((1 - 0.01) ^ 2) 'efficient length of tube
emvad = pi * (rad ^ 2)
vbl = (Sqr(2 * (1.8 * (10 ^ (-5)))) / (p * 2 * pi * f))
If vbl > (d / 2) Then
hstath = vbl
ElseIf vbl < (d / 2) Then
hstath = d / 2
End If
m = p1 * d
ra = (pc / emvad) * (((2 * pi * f / c) * vbl * (2 * pi * rad) * d) / (2 * emvad)) * (1 +
(0.4 * (Sqr(5 / (3 * 1.4)))))
Rb = (0.288 * (2 * pi * f / c) * vbl) * (Log((4 * emvad) / (pi * (hstath ^ 2)))) /
(Log(10#))
Rc = ((1 * emvad * ((2 * pi * f / c) ^ 2)) / (2 * pi)) + 0.01

```

$R_{ol} = r_a + R_b + R_c$

```

z = MultiCompReal(iota, (pc * (Tan(((2 * pi * f) / c) * Length * (1 - 0.01)) + (Rol *
emvad))))
z2 = MultiCompReal(z, (100 / (perf * 5 * 4)))
z3 = MultiCompReal(z, 100)
z4 = MultiCompReal(iota, (2 * pi * f * m * perf))
z5 = DivideComplex(z3, z4)
z6 = AddCompReal(z5, 1)
z7 = DivideComplex(z2, z6)
z8 = AddCompReal(z7, (fres / (perf / 100)))
empedisi1(3, i) = z8
f = f * 2

```

Next i

msg = Tab + " 63" & Tab & "125" & Tab & "250" & Tab & "500" & Tab & "1000" & Tab & "2000" & Tab & "4000" & Tab & "8000"

If List1.ListCount = 1 And List1.List(0) = "Hard Wall" Then 'Hard Wall

Load Form7

Form7.Show

msg = msg & NewLine + "absorption" & Tab & "0" & Tab & "0" & Tab & "0" & Tab & "0" & Tab & "0" & Tab & "0" & Tab & "0" & Tab & "0"

GoTo Line1

Else: GoTo Line2

Line2:

If List1.List(1) = "Porous" Then 'an to prwto einai POROUS

r = Form3.Text1.Text 'flow Resistivity Porous

d = Form3.Text2.Text 'Thickness porous

$d = d / (10^3)$

f = 62.5

For i = 0 To 8 Step 1

If  $(p * f / r) \geq 0.025$  Then

$z_{1.re} = pc * (1 + 0.0563 * (p * f / r)^{-0.725})$

$z_{1.im} = pc * (-0.127 * (p * f / r)^{-0.655})$

$k_{1.re} = (2 * pi * f / c) * (1 + 0.103 * (p * f / r)^{-0.716})$

$k_{1.im} = (((2 * pi * f) / c) * (-0.179) * (p * f / r)^{-0.663})$

ElseIf  $(p * f / r) < 0.025$  Then

$z_{1.re} = pc * (1 + 0.081 * (p * f / r)^{-0.699})$

$z_{1.im} = pc * (-0.191 * (p * f / r)^{-0.556})$

$k_{1.re} = (2 * pi * f / c) * (1 + 0.136 * (p * f / r)^{-0.641})$

```

    k1.im = (((2 * pi * f) / c) * (-0.322) * (p * f / r) ^ -0.502)
    End If
    empedisi(0, i) = z1
    propag(0, i) = k1
    f = f * 2
    Next i

ElseIf List1.List(1) = "Air" Then 'an to prwto einai AIR

f = 62.5

d = Form10.Text2.Text 'Thickness Air
d = d / (10 ^ 3)
For i = 0 To 8 Step 1

    z1.re = p * c
    z1.im = 0
    k1.re = 2 * pi * f / c
    k1.im = 0

    empedisi(0, i) = z1
    propag(0, i) = k1

    f = f * 2
    Next i

ElseIf List1.List(1) = "Perforated Plate" Then
    f = 125
    z.re = 0
    z.im = 0
    iota.re = 0
    iota.im = 1
    For i = 0 To 8 Step 1 'gemizei pinaka me z perforated plate

        iota.re = 0
        iota.im = 1
        d = Form5.Text1.Text 'thickness plate
        d = d / (10 ^ 3)
        q = Form5.Text2.Text 'distance btwin holes(center to center)
        q = q / (10 ^ 3)
        perf = Form5.Text3.Text ' % perforation
        rad = Form5.Text4.Text 'aktina hole
        rad = rad / (10 ^ 3)
        p1 = Form5.Text5.Text ' Density perforated plate
        erend = ((8 * rad) / (3 * pi)) * (1 - (0.43 * rad / q))
        Length = d + 2 * erend * ((1 - 0.01) ^ 2) 'efficient length of tube
        emvad = pi * (rad ^ 2)
        vbl = (Sqr(2 * (1.8 * (10 ^ (-5)))) / (p * 2 * pi * f))
        If vbl > (d / 2) Then

```



```

hstath = vbl
ElseIf vbl < (d / 2) Then
hstath = d / 2
End If
m = p1 * d
ra = (pc / emvad) * (((2 * pi * f / c) * vbl * (2 * pi * rad) * d) / (2 * emvad)) * (1 +
(0.4 * (Sqr(5 / (3 * 1.4)))))
Rb = (0.288 * (2 * pi * f / c) * vbl) * (Log((4 * emvad) / (pi * (hstath ^ 2)))) /
(Log(10#))
Rc = ((1 * emvad * ((2 * pi * f / c) ^ 2)) / (2 * pi)) + 0.01
Rol = ra + Rb + Rc

z = MultiCompReal(iota, (pc * (Tan(((2 * pi * f) / c) * Length * (1 - 0.01)) + (Rol *
emvad))))
z2 = MultiCompReal(z, (100 / (perf * 100)))
z3 = MultiCompReal(z, 100)
z4 = MultiCompReal(iota, (2 * pi * f * m * perf))
z5 = DivideComplex(z3, z4)
z6 = AddCompReal(z5, 1)
z7 = DivideComplex(z2, z6)
z8 = AddCompReal(z7, 5)
empedisi(0, i) = z8
k1.re = (2 * pi * f / c)
k1.im = 0
propag(0, i) = k1

f = f * 2

```

Next i

```

ElseIf List1.List(1) = "Thin Layer" Then GoTo line20 'an to prwto einai THIN
LAYER

```

End If

'EMPEDISI ME HARD WALL

For i = 0 To 8 Step 1

```

iota.re = 0
iota.im = 1
z = MultiplyComplex(iota, propag(0, i))
z2 = MultiCompReal(z, d)
z3 = DivideComplex(CoshComplex(z2), SinhComplex(z2))

```

```
z4 = MultiplyComplex(empedisi(0, i), z3)
empedisiW(0, i) = z4
```

```
Next i
```

```
'EMPEDISI ME DYO YLIKA!!!!
```

```
If List1.List(2) = "Porous" Then 'an to deutero uliko einai porous
```

```
z.re = 0
```

```
z.im = 0
```

```
iota.re = 0
```

```
iota.im = 1
```

```
d = Form3.Text2.Text "Thickness Porous
```

```
d = d / (10 ^ 3)
```

```
For i = 0 To 8 Step 1
```

```
z = MultiplyComplex(iota, propag1(0, i))
```

```
z2 = MultiCompReal(z, d)
```

```
z3 = CoshComplex(z2)
```

```
z4 = SinhComplex(z2)
```

```
z5 = DivideComplex(empedisi1(0, i), empedisiW(0, i))
```

```
z6 = MultiplyComplex(z5, z4)
```

```
z7 = MultiplyComplex(z5, z3)
```

```
z8 = AddComplex(z3, z6)
```

```
z9 = AddComplex(z4, z7)
```

```
z10 = DivideComplex(z8, z9)
```

```
z11 = MultiplyComplex(empedisi1(0, i), z10)
```

```
empedisiWM(0, i) = z11
```

```
Next i
```

```
ElseIf List1.List(2) = "Porous B" Then 'an to deutero uliko einai porous B
```

```
z.re = 0
```

```
z.im = 0
```

```
iota.re = 0
```

```
iota.im = 1
```

```
d = Form23.Text2.Text "Thickness Porous
```

```
d = d / (10 ^ 3)
```

```
For i = 0 To 8 Step 1
```

```
z = MultiplyComplex(iota, propag1(5, i))
```

```
z2 = MultiCompReal(z, d)
```

```
z3 = CoshComplex(z2)
```

```
z4 = SinhComplex(z2)
```

```
z5 = DivideComplex(empedisi1(5, i), empedisiW(0, i))
```

```
z6 = MultiplyComplex(z5, z4)
```

```
z7 = MultiplyComplex(z5, z3)
```

```
z8 = AddComplex(z3, z6)
```

```
z9 = AddComplex(z4, z7)
```

```

    z10 = DivideComplex(z8, z9)
    z11 = MultiplyComplex(empedisi1(5, i), z10)
empedisiWM(0, i) = z11
Next i

```

```

ElseIf List1.List(2) = "Air" Then 'an to deuterio uliko einai air

```

```

z.re = 0
z.im = 0
iota.re = 0
iota.im = 1
d = Form10.Text2.Text "Thickness Air"
d = d / (10 ^ 3)

```

```

For i = 0 To 8 Step 1
z = MultiplyComplex(iota, propag1(2, i))
z2 = MultiCompReal(z, d)
z3 = CoshComplex(z2)
z4 = SinhComplex(z2)
z5 = DivideComplex(empedisi1(2, i), empedisiW(0, i))
z6 = MultiplyComplex(z5, z4)
z7 = MultiplyComplex(z5, z3)
z8 = AddComplex(z3, z6)
z9 = AddComplex(z4, z7)
z10 = DivideComplex(z8, z9)
z11 = MultiplyComplex(empedisi1(2, i), z10)
empedisiWM(0, i) = z11

```

```

Next i

```

```

ElseIf List1.List(2) = "Air Again" Then 'an to deytero yliko einai air again

```

```

z.re = 0
z.im = 0
For i = 0 To 8 Step 1
iota.re = 0
iota.im = 1
d = Form20.Text2.Text "Thickness Air"
d = d / (10 ^ 3)

```

```

z = MultiplyComplex(iota, propag1(4, i))
z2 = MultiCompReal(z, d)
z3 = CoshComplex(z2)
z4 = SinhComplex(z2)
z5 = DivideComplex(empedisi1(4, i), empedisiW(0, i))
z6 = MultiplyComplex(z5, z4)
z7 = MultiplyComplex(z5, z3)
z8 = AddComplex(z3, z6)
z9 = AddComplex(z4, z7)
z10 = DivideComplex(z8, z9)

```

```

z11 = MultiplyComplex(empedisi1(4, i), z10)
empedisiWM(0, i) = z11

```

```

Next i
'an to deuterio uliko einai panel
ElseIf List1.List(2) = "Panel" Then
z.re = 0
z.im = 0
iota.re = 0
iota.im = 1
f = 62.5
d = Form4.Text1.Text 'thickness panel
d = d / (10 ^ 3)
X = Form4.Text5.Text

```

```

For i = 0 To 8 Step 1

```

```

z100 = (2 * pi * f / c) * d
z2 = MultiCompReal(empedisi1(1, i), Tan(z100))
z3 = MultiplyComplex(iota, z2)
z4 = AddComplex(empedisiW(0, i), z3)
z5 = MultiCompReal(empedisiW(0, i), Tan(z100))
z6 = MultiplyComplex(iota, z5)
z7 = AddComplex(empedisi1(1, i), z6)
z8 = DivideComplex(z4, z7)
z9 = MultiplyComplex(empedisi1(1, i), z8)
empedisiWM(0, i) = z9
f = f * 2
Next i

```

```

ElseIf List1.List(2) = "Perforated Plate" Then 'an to deytero yliko einai perforated
plate

```

```

z.re = 0
z.im = 0
For i = 0 To 8 Step 1
z = AddComplex(empedisiW(0, i), empedisi1(3, i))
empedisiWM(0, i) = z
Next i

```

```

End If

```

```

                'GIA TRIA YLIKA!!!!
If List1.List(3) = "Porous" Then
z.re = 0
z.im = 0
iota.re = 0
iota.im = 1                'an to trito yliko einai porous
For i = 0 To 8 Step 1
    d = Form3.Text2.Text 'Thickness Porous
    d = d / (10 ^ 3)
    z = MultiplyComplex(iota, propag1(0, i))
    z2 = MultiCompReal(z, d)
    z3 = CoshComplex(z2)
    z4 = SinhComplex(z2)
    z5 = DivideComplex(empedisi1(0, i), empedisiWM(0, i))
    z6 = MultiplyComplex(z5, z4)
    z7 = MultiplyComplex(z5, z3)
    z8 = AddComplex(z3, z6)
    z9 = AddComplex(z4, z7)
    z10 = DivideComplex(z8, z9)
    z11 = MultiplyComplex(empedisi1(0, i), z10)
empedisiWDM(0, i) = z11

```

```
Next i
```

```

ElseIf List1.List(3) = "Porous B" Then
z.re = 0
z.im = 0
iota.re = 0
iota.im = 1                'an to trito yliko einai porous B
For i = 0 To 8 Step 1
    d = Form23.Text2.Text 'Thickness Porous
    d = d / (10 ^ 3)
    z = MultiplyComplex(iota, propag1(5, i))
    z2 = MultiCompReal(z, d)
    z3 = CoshComplex(z2)
    z4 = SinhComplex(z2)
    z5 = DivideComplex(empedisi1(5, i), empedisiWM(0, i))
    z6 = MultiplyComplex(z5, z4)
    z7 = MultiplyComplex(z5, z3)
    z8 = AddComplex(z3, z6)
    z9 = AddComplex(z4, z7)
    z10 = DivideComplex(z8, z9)
    z11 = MultiplyComplex(empedisi1(5, i), z10)
empedisiWDM(0, i) = z11

```

```
Next i
```

```
ElseIf List1.List(3) = "Panel" Then
```

```

z.re = 0
z.im = 0
iota.re = 0
iota.im = 1
f = 62.5
d = Form4.Text1.Text 'thickness panel
  d = d / (10 ^ 3)
  For i = 0 To 8 Step 1      ' an to trito uliko einai PANEL

```

```

z100 = (2 * pi * f / c) * d
z2 = MultiCompReal(empedisi1(1, i), Tan(z100))
z3 = MultiplyComplex(iota, z2)
z4 = AddComplex(empedisiWM(0, i), z3)
z5 = MultiCompReal(empedisiWM(0, i), Tan(z100))
z6 = MultiplyComplex(iota, z5)
z7 = AddComplex(empedisi1(1, i), z6)
z8 = DivideComplex(z4, z7)
z9 = MultiplyComplex(empedisi1(1, i), z8)
empedisiWDM(0, i) = z9
f = f * 2
Next i

```

```

ElseIf List1.List(3) = "Air" Then      'an to trito yliko einai air
z.re = 0
z.im = 0
For i = 0 To 8 Step 1
iota.re = 0
iota.im = 1
  d = Form10.Text2.Text 'Thickness Air
  d = d / (10 ^ 3)

```

```

  z = MultiplyComplex(iota, propag1(2, i))
  z2 = MultiCompReal(z, d)
  z3 = CoshComplex(z2)
  z4 = SinhComplex(z2)
  z5 = DivideComplex(empedisi1(2, i), empedisiWM(0, i))
  z6 = MultiplyComplex(z5, z4)
  z7 = MultiplyComplex(z5, z3)
  z8 = AddComplex(z3, z6)
  z9 = AddComplex(z4, z7)
  z10 = DivideComplex(z8, z9)
  z11 = MultiplyComplex(empedisi1(2, i), z10)
empedisiWDM(0, i) = z11

```

```

Next i
ElseIf List1.List(3) = "Air Again" Then      'an to trito yliko einai air again
z.re = 0
z.im = 0

```

```

For i = 0 To 8 Step 1
iota.re = 0
iota.im = 1
d = Form20.Text2.Text "Thickness Air"
d = d / (10 ^ 3)

z = MultiplyComplex(iota, propag1(4, i))
z2 = MultiCompReal(z, d)
z3 = CoshComplex(z2)
z4 = SinhComplex(z2)
z5 = DivideComplex(empedisi1(4, i), empedisiWM(0, i))
z6 = MultiplyComplex(z5, z4)
z7 = MultiplyComplex(z5, z3)
z8 = AddComplex(z3, z6)
z9 = AddComplex(z4, z7)
z10 = DivideComplex(z8, z9)
z11 = MultiplyComplex(empedisi1(4, i), z10)
empedisiWDM(0, i) = z11

Next i

ElseIf List1.List(3) = "Perforated Plate" Then 'an to trito yliko einai perforated plate
z.re = 0
z.im = 0

For i = 0 To 8 Step 1
z = AddComplex(empedisiWM(0, i), empedisi1(3, i))
empedisiWDM(0, i) = z
Next i
End If

```

'G I A T E S S E R A Y L I K A ! ! ! !

```

If List1.List(4) = "Perforated Plate" Then
z.re = 0
z.im = 0
For i = 0 To 8 Step 1
z = AddComplex(empedisiWDM(0, i), empedisi1(3, i))
empedisiWTM(0, i) = z
Next i

ElseIf List1.List(4) = "Porous" Then

```

```

z.re = 0
z.im = 0

iota.re = 0
iota.im = 1 'an to tetarto yliko einai porous
For i = 0 To 8 Step 1
  d = Form3.Text2.Text "Thickness Porous"
  d = d / (10 ^ 3)
  z = MultiplyComplex(iota, propag1(0, i))
  z2 = MultiCompReal(z, d)
  z3 = CoshComplex(z2)
  z4 = SinhComplex(z2)
  z5 = DivideComplex(empedisi1(0, i), empedisiWDM(0, i))
  z6 = MultiplyComplex(z5, z4)
  z7 = MultiplyComplex(z5, z3)
  z8 = AddComplex(z3, z6)
  z9 = AddComplex(z4, z7)
  z10 = DivideComplex(z8, z9)
  z11 = MultiplyComplex(empedisi1(0, i), z10)
  empedisiWTM(0, i) = z11

Next i

ElseIf List1.List(4) = "Porous B" Then
  z.re = 0
  z.im = 0

  iota.re = 0
  iota.im = 1 'an to tetarto yliko einai porous B
  For i = 0 To 8 Step 1
    d = Form23.Text2.Text "Thickness Porous B"
    d = d / (10 ^ 3)
    z = MultiplyComplex(iota, propag1(5, i))
    z2 = MultiCompReal(z, d)
    z3 = CoshComplex(z2)
    z4 = SinhComplex(z2)
    z5 = DivideComplex(empedisi1(5, i), empedisiWDM(0, i))
    z6 = MultiplyComplex(z5, z4)
    z7 = MultiplyComplex(z5, z3)
    z8 = AddComplex(z3, z6)
    z9 = AddComplex(z4, z7)
    z10 = DivideComplex(z8, z9)
    z11 = MultiplyComplex(empedisi1(5, i), z10)
    empedisiWTM(0, i) = z11

  Next i

ElseIf List1.List(4) = "Panel" Then
  z.re = 0
  z.im = 0
  iota.re = 0

```



```

iota.im = 1
f = 62.5
d = Form4.Text1.Text 'thickness panel
  d = d / (10 ^ 3)
  For i = 0 To 8 Step 1      ' an to tetarto uliko einai PANEL

z100 = (2 * pi * f / c) * d
z2 = MultiCompReal(empedisi1(1, i), Tan(z100))
z3 = MultiplyComplex(iota, z2)
z4 = AddComplex(empedisiWDM(0, i), z3)
z5 = MultiCompReal(empedisiWDM(0, i), Tan(z100))
z6 = MultiplyComplex(iota, z5)
z7 = AddComplex(empedisi1(1, i), z6)
z8 = DivideComplex(z4, z7)
z9 = MultiplyComplex(empedisi1(1, i), z8)
empedisiWTM(0, i) = z9
f = f * 2
Next i

End If

line20:
      'A P O R R O F H S H ! ! ! !
If List1.ListCount = 2 Then 'gia ena uliko - wall
If List1.List(1) = "Thin Layer" Then
f = 62.5
r = Form9.Text1.Text
d = Form9.Text2.Text / 1000
pc = 415
  c = 343
  p = 1.21
  pi = 3.14159265358979
  For i = 0 To 8 Step 1

a6 = (((((r / pc) ^ 0.5) + ((pc / r) ^ 0.5)) ^ 2) + (pc / r) * ((Cos(2 * pi * f * d / c)) ^ 2) /
((Sin(2 * pi * f * d / c)) ^ 2)) ^ (-1)
a7 = Round(a6, 2)
absorb(0, i) = a7
If absorb(0, i) < 0 Then
absorb(0, i) = 0
End If
f = f * 2
Next i

Else

For i = 0 To 8 Step 1
a = AddCompReal(empedisiW(0, i), (-pc))
a2 = AddCompReal(empedisiW(0, i), pc)

```

```

a3 = DivideComplex(a, a2)
a4 = AbsComplex(a3)
a5 = a4 ^ 2
a6 = 1 - a5
a7 = Round(a6, 2)
absorb(0, i) = a7
If absorb(0, i) < 0 Then
absorb(0, i) = 0
End If
Next i
End If

```

```

line21:
ElseIf List1.ListCount = 3 Then 'gia 2 ulika - wall

```

```

For i = 0 To 8
a = AddCompReal(empedisiWM(0, i), (-pc))
a2 = AddCompReal(empedisiWM(0, i), pc)
a3 = DivideComplex(a, a2)
a4 = AbsComplex(a3)
a5 = a4 ^ 2
a6 = 1 - a5
a7 = Round(a6, 2)
absorb(0, i) = a7
If absorb(0, i) < 0 Then
absorb(0, i) = 0
End If
Next i

```

```

ElseIf List1.ListCount = 4 Then 'gia 3 ulika - wall
For i = 0 To 8 Step 1
a = AddCompReal(empedisiWDM(0, i), (-pc))
a2 = AddCompReal(empedisiWDM(0, i), pc)
a3 = DivideComplex(a, a2)
a4 = AbsComplex(a3)
a5 = a4 ^ 2
a6 = 1 - a5
a7 = Round(a6, 2)
absorb(0, i) = a7
If absorb(0, i) < 0 Then
absorb(0, i) = 0
End If
Next i

```

```

ElseIf List1.ListCount = 5 Then 'gia 4 ulika - wall
For i = 0 To 8 Step 1
a = AddCompReal(empedisiWTM(0, i), (-pc))
a2 = AddCompReal(empedisiWTM(0, i), pc)
a3 = DivideComplex(a, a2)
a4 = AbsComplex(a3)

```

```

a5 = a4 ^ 2
a6 = 1 - a5
a7 = Round(a6, 2)
absorb(0, i) = a7
If absorb(0, i) < 0 Then
absorb(0, i) = 0
End If
Next i

End If
msg = msg & NewLine + "absorption" & Tab & absorb(0, 0) & Tab & absorb(0, 1)
& Tab & absorb(0, 2) & Tab & absorb(0, 3) & Tab & absorb(0, 4) & Tab &
absorb(0, 5) & Tab & absorb(0, 6) & Tab & absorb(0, 7)
wrap$ = Chr$(13) & Chr$(10) 'add date to string

If List1.List(1) = "Air" Then
Properties1 = "Properties" & wrap$ & wrap$ & "Thickness Air" & Tab & Tab &
Form10.Text2.Text & " mm" + wrap$
ElseIf List1.List(1) = "Porous" Then
Properties1 = "Properties" & wrap$ & wrap$ & "Thickness Porous" & Tab & Tab &
& Form3.Text2.Text + " mm" & wrap$ + "Flow Resistivity Porous" & Tab &
Form3.Text1.Text + " Pa-s.m^2" & wrap$
ElseIf List1.List(1) = "Thin Layer" Then
Properties1 = "Properties" & wrap$ & wrap$ & "Distance Between Thin Layer &
Wall" & Tab & Form9.Text2.Text + " mm" & wrap$ + "Flow Resistivity Thin
Layer" & Tab & Tab & Form9.Text1.Text + " Pa-s.m^2" & wrap$
End If

If List1.List(2) = "Air" Then
Properties2 = "Thickness Air" & Tab & Tab & Form10.Text2.Text & wrap$
ElseIf List1.List(2) = "Porous" Then
Properties2 = "Thickness Porous" & Tab & Tab & Form3.Text2.Text + " mm" &
wrap$ + "Flow Resistivity Porous" & Tab & Form3.Text1.Text + " Pa-s.m^2" &
wrap$
ElseIf List1.List(2) = "Air Again" Then
Properties2 = "Thickness Air" & Tab & Tab & Form20.Text2.Text + " mm" &
wrap$
ElseIf List1.List(2) = "Porous B" Then
Properties2 = "Thickness Porous B" & Tab & Tab & Form23.Text2.Text + " mm"
& wrap$ + "Flow Resistivity Porous B" & Tab & Form23.Text1.Text + " Pa-s.m^2"
& wrap$
ElseIf List1.List(2) = "Perforated Plate" Then
Properties2 = "Thickness Perforated Plate" & Tab + Tab & Form5.Text1.Text + "
mm" + wrap$ + "Distance between Holes(Perf. Plate)" & Tab + Form5.Text2.Text +
" mm" + wrap$ + "% Perforation" + Tab + Tab + Tab + Form5.Text3.Text +
wrap$ + "Radius of one Hole(Perf. Plate)" + Tab + Form5.Text4.Text + " mm" +
wrap$ + "Density Perforated Plate" + Tab + Tab + Form5.Text5 + " kg/m^3" +
wrap$
ElseIf List1.List(2) = "Panel" Then

```

```

Properties2 = "thickness Panel" & Tabb + Tabb & Form4.Text1.Text + " mm" &
wrap$ + "Density Panel" & Tabb + Tabb + Form4.Text2.Text + " kg/m^3" & wrap$ +
"Poisson's Number Panel" + Tabb + Form4.Text3.Text & wrap$ + "Young's Modulus
Panel" + Tabb + Form4.Text4.Text & wrap$ & "Angle Panel" + Tabb + Tabb +
Form4.Text5.Text + wrap$ + "Loss Factor Panel" + Tabb + Tabb + Form4.Text6.Text
+ wrap$

```

```
End If
```

```

If List1.List(3) = "Air" Then
Properties3 = "Thickness Air" & Tabb & Tabb & Form10.Text2.Text & wrap$
ElseIf List1.List(3) = "Porous" Then
Properties3 = "Thickness Porous" & Tabb & Tabb & Form3.Text2.Text + " mm" &
wrap$ + "Flow Resistivity Porous" & Tabb & Form3.Text1.Text + " Pa-s.m^2" &
wrap$
ElseIf List1.List(3) = "Air Again" Then
Properties3 = "Thickness Air" & Tabb & Tabb & Form20.Text2.Text & wrap$
ElseIf List1.List(3) = "Porous B" Then
Properties3 = "Thickness Porous B" & Tabb & Tabb & Form23.Text2.Text + " mm"
& wrap$ + "Flow Resistivity Porous B" & Tabb & Form23.Text1.Text + " Pa-s.m^2"
& wrap$
ElseIf List1.List(3) = "Perforated Plate" Then
Properties3 = "Thickness Perforated Plate" & Tabb + Tabb & Form5.Text1.Text + "
mm" + wrap$ + "Distance between Holes(Perf. Plate)" & Tabb + Form5.Text2.Text +
" mm" + wrap$ + "% Perforation" + Tabb + Tabb + Tabb + Form5.Text3.Text +
wrap$ + "Radius of one Hole(Perf. Plate)" + Tabb + Form5.Text4.Text + " mm" +
wrap$ + "Density Perforated Plate" + Tabb + Tabb + Form5.Text5 + " kg/m^3"
ElseIf List1.List(3) = "Panel" Then
Properties3 = "thickness Panel" & Tabb + Tabb & Form4.Text1.Text + " mm" &
wrap$ + "Density Panel" & Tabb + Tabb + Form4.Text2.Text + " kg/m^2" + wrap$ +
"Poisson's Number Panel" + Tabb + Form4.Text3.Text & wrap$ + "Young's Modulus
Panel" + Tabb + Form4.Text4.Text & wrap$ & "Angle Panel" + Tabb + Tabb +
Form4.Text5.Text + wrap$ + "Loss Factor Panel" + Tabb + Tabb + Form4.Text6.Text
+ wrap$

```

```
End If
```

```

If List1.List(4) = "Air" Then
Properties4 = "Thickness Air" & Tabb & Tabb & Form10.Text2.Text & wrap$
ElseIf List1.List(4) = "Porous" Then
Properties4 = "Thickness Porous B" & Tabb & Tabb & Form3.Text2.Text + " mm" &
wrap$ + "Flow Resistivity Porous B" & Tabb & Form3.Text1.Text + " Pa-s.m^2" &
wrap$
ElseIf List1.List(4) = "Air Again" Then
Properties4 = "Thickness Air" & Tabb & Tabb & Form20.Text2.Text & wrap$
ElseIf List1.List(4) = "Porous B" Then
Properties4 = "Thickness Porous B" & Tabb & Tabb & Form23.Text2.Text + " mm"
& wrap$ + "Flow Resistivity Porous B" & Tabb & Form23.Text1.Text + " Pa-s.m^2"
& wrap$
ElseIf List1.List(4) = "Perforated Plate" Then

```

```

Properties4 = "Thickness Perforated Plate" & Tab + Tab & Form5.Text1.Text + "
mm" + wrap$ + "Distance between Holes(Perf. Plate)" & Tab + Form5.Text2.Text +
" mm" + wrap$ + "% Perforation" + Tab + Tab + Tab + Form5.Text3.Text +
wrap$ + "Radius of one Hole(Perf. Plate)" + Tab + Form5.Text4.Text + " mm" +
wrap$ + "Density Perforated Plate" + Tab + Tab + Form5.Text5 + " kg/m^3"
ElseIf List1.List(4) = "Panel" Then
Properties4 = "thickness Panel" & Tab + Tab & Form4.Text1.Text + " mm" &
wrap$ + "Density Panel" & Tab + Tab + Form4.Text2.Text + " kg/m^3" + wrap$ +
"Poisson's Number Panel" + Tab + Form4.Text3.Text & wrap$ + "Young's Modulus
Panel" + Tab + Form4.Text4.Text & wrap$ & "Angle Panel" + Tab + Tab +
Form4.Text5.Text + wrap$ + "Loss Factor Panel" + Tab + Tab + Form4.Text6.Text
+ wrap$

End If

```

```

Form25.Text1.Text = wrap$ + "Frequency(Hz)" & Tab & Tab & "Absorption
Coefficient" + wrap$ & Form25.Text1.Text + wrap$ + "63" & Tab & Tab & Tab
& absorb(0, 0) & wrap$ + "125" & Tab & Tab & Tab & absorb(0, 1) & wrap$ +
"250" & Tab & Tab & Tab & absorb(0, 2) & wrap$ + "500" & Tab & Tab &
Tab & absorb(0, 3) & wrap$ + "1000" & Tab & Tab & Tab & absorb(0, 4) &
wrap$ + "2000" & Tab & Tab & Tab & absorb(0, 5) & wrap$ + "4000" & Tab &
Tab & Tab & absorb(0, 6) & wrap$ + "8000" & Tab & Tab & Tab & absorb(0,
7)
If List1.ListCount = 2 Then
Form25.Text1.Text = Properties1 & wrap$ + Form25.Text1.Text
ElseIf List1.ListCount = 3 Then
Form25.Text1.Text = Properties1 + wrap$ + Properties2 & wrap$ +
Form25.Text1.Text
ElseIf List1.ListCount = 4 Then
Form25.Text1.Text = Properties1 + wrap$ + Properties2 & wrap$ + Properties3 &
wrap$ + Form25.Text1.Text
ElseIf List1.ListCount = 5 Then
Form25.Text1.Text = Properties1 + wrap$ + Properties2 & wrap$ + Properties3 &
wrap$ + Properties4 & wrap$ & Form25.Text1.Text
End If
Form25.Text1.Text = Form1.List1.List(0) & wrap$ & Form1.List1.List(1) & wrap$
& Form1.List1.List(2) & wrap$ & Form1.List1.List(3) & wrap$ &
Form1.List1.List(4) & wrap$ & wrap$ & Form25.Text1.Text

```

With OLE1

```

' Use this if you want the object to remain hidden until you click on the data button
' .DoVerb vbOLEShow

```

```
If .AppIsRunning Then

    .DataText = msg
    .Update
Else

    MsgBox "Graph is not active"
End If

End With

Line1:
End If
End If
End Sub

Private Sub Command5_Click()

    If List1.ListCount >= 2 Then

        Form1.List1.RemoveItem (Form1.List1.ListCount - 1)
        End If
        If List1.List(1) = "" Then
            Image1.Visible = False
        ElseIf List1.List(2) = "" Then
            Image2.Visible = False
        ElseIf List1.List(3) = "" Then
            Image3.Visible = False
        ElseIf List1.List(4) = "" Then
            Image4.Visible = False
        End If
    End Sub

Private Sub Command6_Click()
Cls
If List1.ListCount = 5 Then
List1.RemoveItem (4)
List1.RemoveItem (3)
List1.RemoveItem (2)
List1.RemoveItem (1)
ElseIf List1.ListCount = 4 Then
List1.RemoveItem (3)
List1.RemoveItem (2)
List1.RemoveItem (1)
ElseIf List1.ListCount = 3 Then
List1.RemoveItem (2)
List1.RemoveItem (1)
ElseIf List1.ListCount = 2 Then
List1.RemoveItem (1)
```

End If

Tabb = vbTab

NewLine = vbNewLine

msg = Tabb + " 63" & Tabb & "125" & Tabb & "250" & Tabb & "500" & Tabb & "1000" & Tabb & "2000" & Tabb & "4000" & Tabb & "8000"

msg = msg & NewLine + "absorption" & Tabb & "0" & Tabb & "0" & Tabb & "0" & Tabb & "0" & Tabb & "0" & Tabb & "0" & Tabb & "0"

With OLE1

' Use this if you want the object to remain hidden until you click on the data button

' .DoVerb vbOLEShow

If .AppIsRunning Then

.DataText = msg

.Update

Else

MsgBox "Graph is not active"

End If

End With

End Sub

Private Sub DAS\_BarChart1\_DbClick()

End Sub

Private Sub Command7\_Click()

Select Case List1.ListIndex

Case 1

If List1.List(1) = "Porous" Then

Load Form3

Form3.Show

ElseIf List1.List(1) = "Panel" Then

Load Form4

Form4.Show

ElseIf List1.List(1) = "Perforated Plate" Then

Load Form5

Form5.Show

ElseIf List1.List(1) = "Thin Layer" Then

Load Form9

Form9.Show

ElseIf List1.List(1) = "Air" Then

Load Form10

Form10.Show

```
End If
Case 2
If List1.List(2) = "Porous" Then
    Load Form3
    Form3.Show
ElseIf List1.List(2) = "Panel" Then
    Load Form4
    Form4.Show
ElseIf List1.List(2) = "Perforated Plate" Then
    Load Form5
    Form5.Show
ElseIf List1.List(2) = "Thin Layer" Then
    Load Form9
    Form9.Show
ElseIf List1.List(2) = "Air" Then
    Load Form10
    Form10.Show
ElseIf List1.List(2) = "Air Again" Then
    Load Form20
    Form20.Show
ElseIf List1.List(2) = "Porous B" Then
    Load Form23
    Form23.Show
End If
Case 3
If List1.List(3) = "Porous" Then
    Load Form3
    Form3.Show
ElseIf List1.List(3) = "Panel" Then
    Load Form4
    Form4.Show
ElseIf List1.List(3) = "Perforated Plate" Then
    Load Form5
    Form5.Show
ElseIf List1.List(3) = "Thin Layer" Then
    Load Form9
    Form9.Show
ElseIf List1.List(3) = "Air" Then
    Load Form10
    Form10.Show
ElseIf List1.List(3) = "Air Again" Then
    Load Form20
    Form20.Show
ElseIf List1.List(3) = "Porous B" Then
    Load Form23
    Form23.Show
End If
Case 4
    If List1.List(4) = "Porous" Then
        Load Form3
```



```
Form3.Show
ElseIf List1.List(4) = "Panel" Then
    Load Form4
    Form4.Show
ElseIf List1.List(4) = "Perforated Plate" Then
    Load Form5
    Form5.Show
ElseIf List1.List(4) = "Thin Layer" Then
    Load Form9
    Form9.Show
ElseIf List1.List(4) = "Air" Then
    Load Form10
    Form10.Show
ElseIf List1.List(4) = "Air Again" Then
    Load Form20
    Form20.Show
ElseIf List1.List(4) = "Porous B" Then
    Load Form23
    Form23.Show
End If
End Select

End Sub

Private Sub Form_Load()
List1.AddItem "Hard Wall"
Set MyGrafObj = Me![OLE1].object.Application.Chart
With OLE1
    .Format = "CF_TEXT"
    .SizeMode = vbOLESizeStretch
End With

End Sub

Private Sub List1_DblClick()
Select Case List1.ListIndex
Case 1
    If List1.List(1) = "Porous" Then
        Load Form3
        Form3.Show
    ElseIf List1.List(1) = "Panel" Then
        Load Form4
        Form4.Show
    ElseIf List1.List(1) = "Perforated Plate" Then
        Load Form5
        Form5.Show
    ElseIf List1.List(1) = "Thin Layer" Then
        Load Form9
        Form9.Show
```

```
ElseIf List1.List(1) = "Air" Then
    Load Form10
    Form10.Show
End If
Case 2
If List1.List(2) = "Porous" Then
    Load Form3
    Form3.Show
ElseIf List1.List(2) = "Panel" Then
    Load Form4
    Form4.Show
ElseIf List1.List(2) = "Perforated Plate" Then
    Load Form5
    Form5.Show
ElseIf List1.List(2) = "Thin Layer" Then
    Load Form9
    Form9.Show
ElseIf List1.List(2) = "Air" Then
    Load Form10
    Form10.Show
ElseIf List1.List(2) = "Air Again" Then
    Load Form20
    Form20.Show
ElseIf List1.List(2) = "Porous B" Then
    Load Form23
    Form23.Show

End If
Case 3
If List1.List(3) = "Porous" Then
    Load Form3
    Form3.Show
ElseIf List1.List(3) = "Panel" Then
    Load Form4
    Form4.Show
ElseIf List1.List(3) = "Perforated Plate" Then
    Load Form5
    Form5.Show
ElseIf List1.List(3) = "Thin Layer" Then
    Load Form9
    Form9.Show
ElseIf List1.List(3) = "Air" Then
    Load Form10
    Form10.Show
ElseIf List1.List(3) = "Air Again" Then
    Load Form20
    Form20.Show
ElseIf List1.List(3) = "Porous B" Then
    Load Form23
    Form23.Show
```

```
End If
Case 4
    If List1.List(4) = "Porous" Then
        Load Form3
        Form3.Show
    ElseIf List1.List(4) = "Panel" Then
        Load Form4
        Form4.Show
    ElseIf List1.List(4) = "Perforated Plate" Then
        Load Form5
        Form5.Show
    ElseIf List1.List(4) = "Thin Layer" Then
        Load Form9
        Form9.Show
    ElseIf List1.List(4) = "Air" Then
        Load Form10
        Form10.Show
    ElseIf List1.List(4) = "Air Again" Then
        Load Form20
        Form20.Show
    ElseIf List1.List(4) = "Porous B" Then
        Load Form23
        Form23.Show
    End If
End Select
End Sub
```

```
Private Sub vbexit_Click()
Load Form27
Form27.Show
End Sub
```

```
Private Sub vbhelp_Click()
Load Form24
Form24.Show
```

```
End Sub
```