



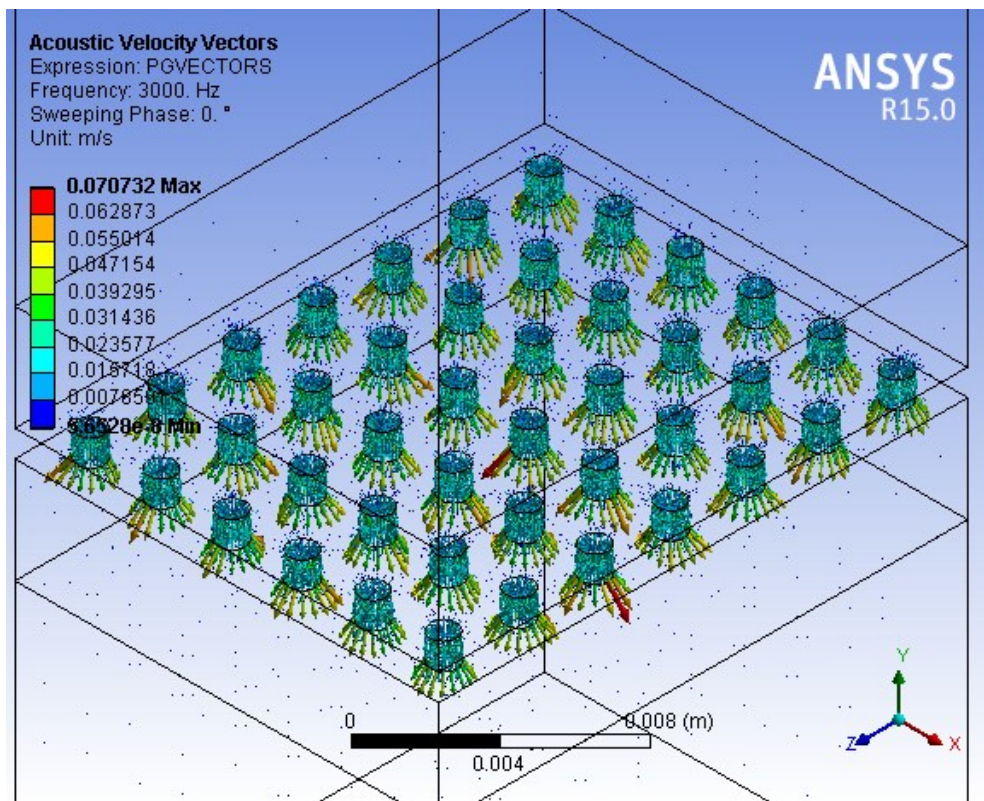
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



**ΣΤΑΜΑΤΑΚΗ ΖΑΧΑΡΟΥΛΑ**

Επιβλέπων: Χριστόφορος Προβατίδης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2015



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ανάγκη του ανθρώπου για ανάπτυξη και εξέλιξη αποτελεί το βασικό λόγο για συνεχή πρόοδο σε όλους τους τομείς. Στη σημερινή εποχή παρατηρείται διείσδυση νέων προϊόντων σε ποικίλους τομείς με στόχο την ανάπτυξη δομών με βελτιωμένες ιδιότητες. Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται και τα κλωστοϋφαντουργικά (κ/υ) προϊόντα τα οποία έχουν εισχωρήσει σε πολυάριθμους τομείς όπως στις μεταφορές, τη γεωργία, τις κατασκευές, την ιατρική, την ασφάλεια, την αρχιτεκτονική κ.τ.λ. Η νέα πραγματικότητα αυξάνει τις απαιτήσεις της αγοράς κατά τη φάση του σχεδιασμού και της παραγωγής προϊόντων. Η ενσωμάτωση εργαλείων Computer Aided Design (CAD) και Computer Aided Engineering (CAE) μειώνει σημαντικά τη διάρκεια της σχεδιαστικής φάσης και το κόστος παραγωγής προϊόντων.

Παρά το γεγονός ότι η διαδικασία της μοντελοποίησης αποτελεί ένα τόσο σημαντικό στάδιο για την ανάπτυξη και παραγωγή ενός προϊόντος, δεν έχει αναπτυχθεί επαρκώς σε όλους τους τομείς. Ειδικά στον κλάδο των κ/υ προϊόντων το πρόβλημα είναι η αυξημένη γεωμετρική πολυπλοκότητα και η μη-γραμμική συμπεριφορά των δομών. Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας γίνεται προσπάθεια μοντελοποίησης και υπολογιστικής ανάλυσης τριδιάστατων δομών υφάσματος (Spacer Fabric) για τη μελέτη της ακουστικής απόκρισής τους, εστιάζοντας κυρίως στις ηχοαπορροφητικές τους ιδιότητες.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανολογών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. κ. Χριστόφορο Προβατίδη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής μου εργασίας και για την καθοδήγησή του στην εκπόνηση της διπλωματικής. Επίσης τη Διδάκτωρα κα. Κλειώ Βόσου, η συνεισφορά και η βοήθεια της οποίας σε πολλά σημεία της εργασίας ήταν πολύτιμη για την επιτυχημένη ολοκλήρωσή της. Θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου για την διαρκή τους υποστήριξη, που επέτρεψε την επιτυχή διεκπεραίωση των σπουδών μου. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους μου για τα όμορφα και δημιουργικά χρόνια που περάσαμε μαζί.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάζονται οι δυνατότητες μοντελοποίησης υφασμάτων διατήρησης απόστασης (Spacer Fabrics) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method), με στόχο τη διερεύνηση της ακουστικής τους συμπεριφοράς. Τα υφάσματα διατήρησης απόστασης έχουν τριδιάστατη δομή η οποία αποτελείται από δύο εξωτερικά υποστρώματα απλού πλεκτού υφάσματος τα οποία συνδεόνται μεταξύ τους μέσω νημάτων διατήρησης απόστασης. Πρόκειται για εν δυνάμει ηχοαπορροφητικά υλικά καθώς ο τρόπος πλέξης των νημάτων, που αποτελούν την πρώτη ύλη κατασκευής τους, σύνθετοι μία δομή που αποτελείται από δύο διάτρητες εξωτερικές επιφάνειες και έναν πορώδη απορροφητή που τις συνδέει.

Κατά την προσομοίωση, η παραπάνω περιγραφείσα δομή θεωρείται πακτωμένη σε στερεό τοίχωμα και εκτείνεται σε ρεύμα αέρα που μεταφέρει ακουστικά κύματα εκπεμπόμενα από ακουστική πηγή τοποθετημένη σε άπειρη, θεωρητικά, απόσταση από το προς εξέταση μοντέλο. Το ρευστό προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια της δομής, η οποία θεωρείται πλήρως απορροφητική, και τη διαπερνά. Στην πορεία του, χάνει μέρος της αρχικής του ενέργειας, με αποτέλεσμα τα ακουστικά κύματα που φθάνουν στο κάτω άκρο της δομής να είναι εξασθενημένα. Η ανάλυση πραγματοποιείται στο υπολογιστικό περιβάλλον Ansys® v.15 εκτελώντας μία δοκιμή αρμονικής απόκρισης σε εύρος συχνοτήτων 0-4000 Hz.

Η δομή εξετάζεται σε ποικίλες παραλλαγές, στις οποίες οι παράμετροι που μεταβάλλονται είναι τρεις:

- Ακτίνα διάτρησης
- Ποσοστό κενού χώρου διάτρητης επιφάνειας
- Αντίσταση ροής πορώδη απορροφητή

Η αναπαράσταση του φυσικού μοντέλου πραγματοποιείται σε πρώτο στάδιο, με χρήση μίας ομογενοποιημένης γεωμετρίας και προσομοίωση της μικροδομής της μέσω ορισμού ισοδύναμου ρευστού ενώ σε δεύτερο, με ακριβή σχεδιασμό της δομής του αξιοποιώντας την αλληλεπίδραση ρευστού και στερεού σώματος. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων αφορούν στην εκτίμηση του συντελεστή ηχοαπορρόφησης του μοντέλου που εξετάζεται.

Πρώτος στόχος της Διπλωματικής Εργασίας είναι να επιτευχθεί η υπολογιστική μοντελοποίηση των πειραμάτων που λαμβάνουν χώρα σε έναν σωλήνα μέτρησης ακουστικής αντίστασης. Επιπλέον, είναι επιθυμητή η διερεύνηση της συμπεριφοράς του μοντέλου και ο προσδιορισμός του ιδανικού συνδυασμού των παραμέτρων της μικροδομής του ώστε να προκύπτει βέλτιστο αποτέλεσμα ηχοαπορρόφησης. Τέλος, ένας επιπλέον στόχος της Διπλωματικής Εργασίας είναι να αναδειχθεί ο τρόπος μοντελοποίησης του φυσικού προβλήματος που προσεγγίζει επιτυχέστερα την πραγματική συμπεριφορά ενός τριδιάστατου υφάσματος συγκεκριμένων χαρακτηριστικών.



## ABSTRACT

The present Diploma Thesis discusses the possibilities of the use of the finite element (FE) modeling techniques in the estimation of the acoustic behavior of spacer fabrics. Spacer fabrics are three-dimensional textile structures which consist of three interconnected layers of different thickness. This study builds on the assumption that spacer fabrics can be considered as layered structures consisting of a thick porous material enclosed between two layers: one rigid and one micro – perforated or perforated panel.

In order to monitor the frequency response of a spacer fabric, the FE software ANSYS v.15 has been used. A plane sound wave of frequency discretely changing within the range 0 - 4000 Hz, has been used as an excitation while the spacer fabric was placed at a theoretically infinite distance from the sound source. The principle of the acoustic absorption depends on the sound pressure difference between the incident and the reflected sound waves.

A parametrical study of several microstructural characteristics of the spacer fabrics has been performed; the examined parameters are threefold:

- Perforation radius
- Porosity
- Flow resistivity

In order to simulate the physical problem, two parametric FE models have been built. The first one, uses a homogeneous geometry and simulates the microstructure through the equivalent fluid models existing in ANSYS Acoustics Toolbox, while the second one, uses the precise design of the structure taking advantage of the physics of the fluid-structure interaction. The results obtained through the FE method concern the sound absorption coefficient of the fabric.

The first aim of the present Diploma Thesis is to computationally model such a structure and evaluate its sound absorption coefficient, as well as to simulate corresponding experiments usually conducted in an impedance tube. Furthermore, it is desired to investigate the behavior of the model and determine the optimal combination of its microstructural parameters in order to best simulate the acoustic behavior of the spacer fabric. Finally, a further objective of this work is to highlight the FE element model approach simulates more accurately the actual behavior of the three-dimensional structure.





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	v
ABSTRACT .....	vii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	xiii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	1
1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ .....	3
1.1.1 Εισαγωγή στην Ακουστική.....	3
1.1.2 Περιγραφή του ήχου .....	3
1.1.3 Τύποι ηχητικών κυμάτων .....	6
1.1.4 Μέτρηση του ήχου .....	6
1.1.5 Απορρόφηση του ήχου .....	8
1.1.6 Είδη απορροφητικών υλικών .....	9
1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΤΑ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΑ ΚΛΩΣΤΟΥΦΑΝΤΟΥΡΓΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ .....	11
1.2.1 Εισαγωγή στα τριδιάστατα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα.....	11
1.2.2 Περιγραφή τριδιάστατων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων .....	12
1.2.3 Παραγωγή τριδιάστατων κλωστοϋφαντουργικών δομών.....	13
1.2.4 Υφάσματα δημιουργίας κενού ή διατήρησης απόστασης (Spacer Fabrics).....	14
1.2.5 Ιδιότητες υφασμάτων δημιουργίας κενού (Spacer Fabrics).....	14
1.2.6 Πεδίο εφαρμογών υφασμάτων δημιουργίας κενού (Spacer Fabrics).....	15
1.3 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΚΛΩΣΤΟΥΦΑΝΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΣΤΗΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ .....	16
1.3.1 Χρήση τριδιάστατων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων στην ακουστική.....	16
1.3.2 Υφάσματα δημιουργίας κενού ως ηχοαπορροφητικά υλικά .....	16
1.3.3 Εφαρμογές υφασμάτων δημιουργίας κενού στην ακουστική (6) .....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	19
2.1 Το ζήτημα της ηχοαπορρόφησης.....	21
2.1.1 Εισαγωγή στην έννοια του προβλήματος .....	21
2.1.2 Κατηγορίες απορροφητικών υλικών.....	21
2.2 Μαθηματική μοντελοποίηση ηχητικών απορροφητών.....	23
2.2.1 Πορώδεις απορροφητές.....	23
2.2.1.1 Βασικές ιδιότητες υλικών.....	23

2.2.1.2 Αναλυτικά μοντέλα .....	25
2.2.1.3 Μακροσκοπικά εμπειρικά μοντέλα .....	26
2.2.1.4 Φαινομενολογικά θεωρητικά μοντέλα .....	28
2.2.2 Διάτρητες επιφάνειες.....	29
2.2.3 Μικροδιάτρητες επιφάνειες .....	30
2.3 Προσδιορισμός βασικών ακουστικών παραμέτρων.....	32
2.3.1 Πορώδεις απορροφητές.....	32
2.3.2 Διάτρητες επιφάνειες.....	33
2.4 Ακουστικό σύστημα προς διερεύνηση.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3    ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	37
3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων .....	39
3.1.1 Βασικές έννοιες της μεθόδου .....	39
3.1.2 Πεπερασμένα στοιχεία στην ακουστική .....	40
3.1.3 Πεπερασμένα στοιχεία στην ακουστική με χρήση του λογισμικού Ansys .....	43
3.2 Περιγραφή και μοντελοποίηση του φυσικού προβλήματος.....	44
3.2.1 Περιγραφή του φυσικού προβλήματος .....	44
3.2.2 Μοντελοποίηση του φυσικού προβλήματος.....	46
3.2.2.1 Χρήση του υπολογιστικού πακέτου Ansys.....	46
3.2.2.2 Αναπαράσταση δομής υπολογιστικού μοντέλου .....	47
3.2.2.3 Καθορισμός φορτίων και οριακών συνθηκών υπολογιστικού μοντέλου .....	54
3.3 Δημιουργία πλέγματος.....	60
3.4 Αποτελέσματα πρωταρχικού σχεδιασμού .....	65
3.5 Ανάλυση ευαισθησίας.....	67
3.5.1 Διαστάσεις πλάκας.....	67
3.5.2 Ύψος ρεύματος αέρα.....	68
3.5.3 Διερεύνηση χαρακτηριστικών πλέγματος .....	70
3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων αρχικού και τελικού σχεδιασμού .....	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4    ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	81
4.1 Επίδραση ιδιοτήτων μικροδομής διάτρητης επιφάνειας .....	83
4.1.1 Ακτίνα διάτρησης .....	83
4.1.2 Ποσοστό κενού χώρου διάτρησης .....	89
4.2 Επίδραση ιδιοτήτων μικροδομής πορώδη απορροφητή .....	95
4.3 Σύγκριση ημιεμπειρικού – αναλυτικού μοντέλου .....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5    ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΚΡΙΒΟΥΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ .....	101

5.1 Αλληλεπίδραση ρευστού – στερεού σώματος.....	103
5.2 Μοντελοποίηση του φυσικού προβλήματος.....	103
5.2.1 Περιγραφή νέου υπολογιστικού μοντέλου.....	103
5.2.2 Αναπαράσταση δομής νέου υπολογιστικού μοντέλου .....	104
5.2.2.1 Χαρακτηριστικά για την περίπτωση διάτρητης πλάκας .....	105
5.2.2.2 Χαρακτηριστικά για την περίπτωση μικροδιάτρητης πλάκας .....	106
5.2.2.3 Συνολική δομή νέου υπολογιστικού μοντέλου.....	107
5.2.3 Καθορισμός φορτίων και οριακών συνθηκών .....	110
5.3 Δημιουργία πλέγματος.....	114
5.3.1 Διερεύνηση χαρακτηριστικών πλέγματος .....	123
5.4 Σύγκριση πραγματικού – υπολογιστικού – ημιεμπειρικού μοντέλου .....	123
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6     ΕΠΙΛΟΓΟΣ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	127
6.1 Επίλογος .....	129
6.2 Προκαταρκτική σύγκριση με πειραματικά δεδομένα .....	130
6.3 Μελλοντική έρευνα.....	136
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	139



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Διάδοση ηχητικού κύματος.....	4
Σχήμα 1.2 Διακύμανση της ακουστικής πίεσης γύρω από τη στατική ως προς το χρόνο, στην περιοχή της Αθήνας .....	5
Σχήμα 1.3 Εναλλασσόμενα πυκνώματα και αραιώματα των μορίων του μέσου γύρω από τη στατική τους πίεση, οδηγούν σε διακύμανση της ακουστικής πίεσης .....	5
Σχήμα 1.4 Απορρόφηση ήχου .....	8
Σχήμα 1.5 Πορώδης απορροφητής.....	10
Σχήμα 1.6 Συντονιστής Helmholtz.....	10
Σχήμα 1.7 Διάτρητη απορροφητική επιφάνεια .....	11
Σχήμα 1.8 Τριδιάστατα κλωστοϋφαντουργικά υφάσματα.....	13
Σχήμα 1.9 Υφάσματα δημιουργίας κενού.....	14
Σχήμα 1.10 Ιδιότητες υφασμάτων δημιουργίας κενού .....	15
Σχήμα 1.11 Προσέγγιση μοντελοποίησης υφάσματος δημιουργίας κενού με πορώδη απορροφητή.....	17
Σχήμα 2.1 Πορώδης απορροφητής.....	22
Σχήμα 2.2 Απορροφητική διάτρητη επιφάνεια ( $\alpha$ ), απορροφητική μικροδιάτρητη επιφάνεια ( $\beta$ ) .....	22
Σχήμα 2.3 Συνδυασμός πορώδη απορροφητή-διάτρητης επιφάνειας .....	23
Σχήμα 2.4 Σύγκριση μοντέλων ως προς το συντελεστή απορρόφησης για κάθετη πρόσπτωση ήχου σε υλικό πακτωμένο πάχους 50 mm.....	27
Σχήμα 2.5 Σχηματική παράσταση των χαρακτηριστικών των μοντέλων διάδοσης σε έναν πορώδη απορροφητή.....	29
Σχήμα 2.6 Διάδοση ηχητικού κύματος κάθετης πρόσπτωσης σε πορώδη απορροφητή.....	32
Σχήμα 2.7 Σχηματική αναπαράσταση του ακουστικού συστήματος που μελετάται.....	33
Σχήμα 2.8 Συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει συχνότητας για διάτρητη επιφάνεια ακτίνας 3 mm και πορώδη απορροφητή αντίστασης ροής 70000 rayl/m .....	35
Σχήμα 2.9 Συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει συχνότητας για διάτρητη επιφάνεια ακτίνας 0.1 mm και πορώδη απορροφητή αντίστασης ροής 50000 rayl/m .....	35
Σχήμα 2.10 Συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει συχνότητας για διάτρητη επιφάνεια ακτίνας 0.5 mm και πορώδη απορροφητή αντίστασης ροής 50000 rayl/m .....	36
Σχήμα 2.11 Συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει συχνότητας για διάτρητη επιφάνεια ακτίνας 0.5 mm και πορώδη απορροφητή αντίστασης ροής 20000 rayl/m .....	36
Σχήμα 3.1 Ισοδύναμο μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων .....	40

Σχήμα 3.2 Κοιλότητα όγκου V με τμήματα επιφανειών διαφορετικών οριακών συνθηκών .	40
Σχήμα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με αλληλεπίδραση ρευστού-στερεού σώματος.....	43
Σχήμα 3.4 Σχηματικό διάγραμμα μεθόδου .....	48
Σχήμα 3.5 Αναπαράσταση δομής sandwich .....	50
Σχήμα 3.6 Ανάθεση υλικού .....	50
Σχήμα 3.7 Ορισμός ρευστού και χαρακτηριστικών του.....	51
Σχήμα 3.8 Σχηματική αναπαράσταση τετραγωνικού πλέγματος διάτρησης .....	52
Σχήμα 3.9 Ορισμός διάτρητης επιφάνειας – Εισαγωγή παραμέτρων μικροδομής.....	53
Σχήμα 3.10 Ορισμός πορώδη απορροφητή – Εισαγωγή παραμέτρων μικροδομής.....	53
Σχήμα 3.11 Ρύθμιση επιφανειών επαφής .....	54
Σχήμα 3.12 Ορισμός τύπου διέγερσης υπολογιστικού μοντέλο .....	54
Σχήμα 3.13 Ορισμός επιφάνειας εφαρμογής της διέγερσης.....	55
Σχήμα 3.14 Ορισμός χαρακτηριστικών διέγερσης υπολογιστικού μοντέλου .....	55
Σχήμα 3.15 Επιβολή 1 <sup>ης</sup> οριακής συνθήκης .....	56
Σχήμα 3.16 Ορισμός επιφάνειας επιβολής οριακής συνθήκης ακτινοβολίας .....	57
Σχήμα 3.17 Επιβολή 2 <sup>ης</sup> οριακής συνθήκης .....	57
Σχήμα 3.18 Ορισμός χαρακτηριστικών οριακής συνθήκης ορισμού ακουστικής περιοχής... 58	58
Σχήμα 3.19 Ορισμός επιφανειών επιβολής οριακών συνθηκών ορισμού ακουστικών περιοχών .....	59
Σχήμα 3.20 Ορισμός χαρακτηριστικών οριακής συνθήκης περιορισμού του υπολογιστικού μοντέλου .....	59
Σχήμα 3.21 Επιβολή 3 <sup>ης</sup> οριακής συνθήκης .....	60
Σχήμα 3.22 Ορισμός επιφανειών επιβολής οριακών συνθηκών περιορισμού του υπολογιστικού μοντέλου .....	60
Σχήμα 3.23 Σχηματική αναπαράσταση πεπερασμένου στοιχείου FLUID220.....	61
Σχήμα 3.24 Σύγκριση ακρίβειας γραμμικής ή τετραγωνικής συνάρτησης σχήματος σε μία κατανομή πίεσης.....	61
Σχήμα 3.25 Επιλογές σύζευξης σωμάτων .....	62
Σχήμα 3.26 Γραφική αναπαράσταση πλεγματοποιημένης δομής .....	65
Σχήμα 3.27 Ρυθμίσεις υπολογιστικής ανάλυσης.....	66
Σχήμα 3.28 Γραφική απεικόνιση της μεταβολής του συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης για το μοντέλο πρωταρχικού σχεδιασμού .....	67
Σχήμα 3.29 Ανάλυση ευαισθησίας διάστασης πλάκας μοντέλου .....	68
Σχήμα 3.30 Ανάλυση ευαισθησίας ύψους ρεύματος αέρα μοντέλου .....	69

Σχήμα 3.31 Βελτιωμένο υπολογιστικό μοντέλο έπειτα από ανάλυση ευαισθησίας του ύψους του ρεύματος αέρα .....	70
Σχήμα 3.32 Ατέλειες πλέγματος πρωταρχικού σχεδιασμού.....	71
Σχήμα 3.33 Αποτελέσματα ακουστικής πίεσης πρωταρχικού πλέγματος.....	72
Σχήμα 3.34 Αναπαράσταση (α) πλέγματος 1 <sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου και (β) λεπτομέρεια .....	73
Σχήμα 3.35 Αποτελέσματα ακουστικής πίεσης 1 <sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου .	74
Σχήμα 3.36 Αποτελέσματα ακουστικής πίεσης 2 <sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου .	75
Σχήμα 3.37 Αναπαραστάση (α) πλέγματος 3 <sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου και (β) λεπτομέρεια .....	76
Σχήμα 3.38 Αποτελέσματα ακουστικής πίεσης 3 <sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου .	76
Σχήμα 3.39 Λεπτομερής αναπαράσταση 4 <sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου .....	77
Σχήμα 3.40 Αποτελέσματα ακουστικής πίεσης 4 <sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου .	78
Σχήμα 3.41 Σύγκριση ηχοαπορροφητικής συμπεριφοράς πρωταρχικού και βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου .....	79
Σχήμα 3.42 Στάθμη ηχητικής πίεσης πρωταρχικού υπολογιστικού μοντέλου.....	79
Σχήμα 3.43 Στάθμη ηχητικής πίεσης τελικού υπολογιστικού μοντέλου .....	80
Σχήμα 4.1 Διερεύνηση συμπεριφοράς με μεταβολή της ακτίνας διάτρησης για ποσοστό κενού χώρου 15% .....	84
Σχήμα 4.2 Διερεύνηση συμπεριφοράς με μεταβολή της ακτίνας μικροδιάτρησης για ποσοστό κενού χώρου 15%.....	85
Σχήμα 4.3 (α) Μέγιστος συντελεστής απορρόφησης και (β) Συχνότητα εμφάνισής του συναρτήσει ακτίνας οπών για την περίπτωση διάτρησης.....	86
Σχήμα 4.4 Ποσοστιαία μεταβολή του μέγιστου συντελεστή απορρόφησης μεταξύ διαδοχικών ακτίνων διάτρησης για μέση και υψηλή περιοχή συχνοτήτων .....	87
Σχήμα 4.5 (α) Μέγιστος συντελεστής απορρόφησης και (β) Συχνότητα εμφάνισής του συναρτήσει ακτίνας οπών για την περίπτωση μικροδιάτρησης .....	88
Σχήμα 4.6 Ποσοστιαία μεταβολή του μέγιστου συντελεστή απορρόφησης μεταξύ διαδοχικών ακτίνων μικροδιάτρησης για μέση και υψηλή περιοχή συχνοτήτων.....	89
Σχήμα 4.7 Επίδραση ποσοστού κενού χώρου για την περίπτωση διάτρησης .....	90
Σχήμα 4.8 (α) Μέγιστος συντελεστής απορρόφησης και (β) Συχνότητα εμφάνισής του συναρτήσει ποσοστού κενού χώρου για την περίπτωση διάτρησης .....	92
Σχήμα 4.9 Επίδραση ποσοστού κενού χώρου για την περίπτωση μικροδιάτρησης.....	93
Σχήμα 4.10 (α) Μέγιστος συντελεστής απορρόφησης και (β) Συχνότητα εμφάνισής του συναρτήσει ποσοστού κενού χώρου για την περίπτωση μικροδιάτρησης.....	94

Σχήμα 4.11 (α) Επίδραση αντίσταση ροής πορώδη απορροφητή και (β) ποσοστιαία μεταβολή του μέγιστου συντελεστή απορρόφησης μεταξύ διαδοχικών τιμών αντίστασης ροής για όλες τις περιοχές συχνοτήτων για την περίπτωση διάτρησης.....	95
Σχήμα 4.12 (α) Επίδραση αντίσταση ροής πορώδη απορροφητή και (β) ποσοστιαία μεταβολή του μέγιστου συντελεστή απορρόφησης μεταξύ διαδοχικών τιμών αντίστασης ροής για όλες τις περιοχές συχνοτήτων για την περίπτωση μικροδιάτρησης .....	96
Σχήμα 4.13 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την περίπτωση διάτρησης.....	98
Σχήμα 4.14 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την περίπτωση μικροδιάτρησης .....	98
Σχήμα 5.1 Σχηματική αναπαράσταση διάτρητου απορροφητή για την περίπτωση διάτρησης .....	106
Σχήμα 5.2 Σχηματική αναπαράσταση διάτρητου απορροφητή για την περίπτωση μικροδιάτρησης.....	107
Σχήμα 5.3 Τμήμα ρευστού εσωτερικά των οπών για την περίπτωση (α) διάτρησης και (β) μικροδιάτρησης.....	108
Σχήμα 5.4 Συνολική δομή νέου υπολογιστικού μοντέλου για την περίπτωση (α) διάτρησης και (β) μικροδιάτρησης .....	109
Σχήμα 5.5 Ρύθμιση επιφανειών επαφής .....	110
Σχήμα 5.6 Μηχανικές ιδιότητες υφάσματος.....	110
Σχήμα 5.7 Ορισμός χαρακτηριστικών οριακής συνθήκης ορισμού ακουστικής περιοχής για την περίπτωση διάτρησης.....	111
Σχήμα 5.8 Γεωμετρία επιβολής οριακής συνθήκης ορισμού ακουστικής περιοχής για την περίπτωση διάτρησης .....	111
Σχήμα 5.9 Ορισμός χαρακτηριστικών οριακής συνθήκης ορισμού ακουστικής περιοχής για την περίπτωση μικροδιάτρησης .....	111
Σχήμα 5.10 Γεωμετρία επιβολής οριακής συνθήκης ορισμού ακουστικής περιοχής για την περίπτωση μικροδιάτρησης.....	112
Σχήμα 5.11 Γεωμετρία επιβολής οριακής συνθήκης περιορισμού κόμβων για την περίπτωση (α) διάτρησης και (β) μικροδιάτρησης.....	113
Σχήμα 5.12 Σύζευξη ρευστού – στερεού σώματος .....	114
Σχήμα 5.13 Σύγκριση υπολογιστικού χρόνου με χρήση συμμετρικών και ασύμμετρων μητρώων στη σύζευξη σωμάτων .....	115
Σχήμα 5.14 Σχηματική αναπαράσταση (α) μη συζευγμένου και (β) συζευγμένου σώματος αέρα.....	116
Σχήμα 5.15 Αναπαράσταση μενού ορισμού (α) μη συζευγμένου και (β) συζευγμένου ακουστικού σώματος .....	117



Σχήμα 5.16 Πλεγματοποίηση (α) συνολικής δομής υπολογιστικού μοντέλου και (β) λεπτομέρεια .....	118
Σχήμα 5.17 Πλέγμα κατώτερης επιφάνειας μη συζευγμένου σώματος αέρα .....	119
Σχήμα 5.18 Πλέγμα ανώτατης επιφάνειας συζευγμένου σώματος αέρα .....	119
Σχήμα 5.19 Πλέγμα κατώτατης επιφάνειας συζευγμένου σώματος αέρα .....	120
Σχήμα 5.20 Πλέγμα ανώτατης επιφάνειας αέρα στο εσωτερικό οπών.....	120
Σχήμα 5.21 Πλέγμα ανώτατης επιφάνειας διάτρηστου απορροφητή .....	121
Σχήμα 5.22 Πλέγμα ενοποιημένου μοντέλου αέρα – διάτρητου απορροφητή.....	121
Σχήμα 5.23 Πλέγμα κατώτατης επιφάνειας συζευγμένου σώματος πορώδη απορροφητή..	122
Σχήμα 5.24 Πλέγμα ανώτατης επιφάνειας μη συζευγμένου σώματος πορώδη απορροφητή .....	122
Σχήμα 5.25 Σύγκριση μοντέλων για την περίπτωση (α) διάτρησης και (β) μικροδιάτρησης	124
Σχήμα 6.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογιστικών μοντέλων για διάτρηση και μικροδιάτρηση .....	130
Σχήμα 6.2 Δείγματα τριδιάστατων υφασμάτων, (α) διάτρητη επιφάνεια, (β) μικροδιάτρητη επιφάνεια.....	131
Σχήμα 6.3 Σύστημα ανηχοϊκού σωλήνα.....	132
Σχήμα 6.4 Πειραματικά αποτελέσματα συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας για τα δύο δείγματα τριδιάστατων υφασμάτων .....	133
Σχήμα 6.5 Υπολογιστικά αποτελέσματα συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας για το δείγμα (α) διάτρησης (Sample 1) και (β) μικροδιάτρησης (Sample 2)...	134
Σχήμα 6.6 Σύγκριση υπολογιστικών – πειραματικών αποτελεσμάτων ηχοαπορρόφησης για τα δύο νέα δείγματα τριδιάστατων υφασμάτων .....	136
Σχήμα 6.7 Όψεις πορώδη απορροφητή (α) κάτοψη, (β) πλάγια όψη και (γ) πρόοψη πορώδη απορροφητή.....	137



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά του αυτόματου πλέγματος που διακριτοποιεί την υπολογιστική δομή .....	64
Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά πρωταρχικού πλέγματος.....	70
Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά 1 <sup>ου</sup> βελτιωμένου πλέγματος.....	73
Πίνακας 3.4 Χαρακτηριστικά 2 <sup>ου</sup> βελτιωμένου πλέγματος.....	74
Πίνακας 3.5 Χαρακτηριστικά 3 <sup>ου</sup> βελτιωμένου μοντέλου .....	75
Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά 4 <sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου .....	77
Πίνακας 4.1 Τελικά μοντέλα διάτρητων επιφανειών .....	94
Πίνακας 4.2 Τελικά μοντέλα συνολικής απορροφητικής δομής .....	97
Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά πλέγματος για την περίπτωση διάτρησης και μικροδιάτρησης .....	123
Πίνακας 6.1 Δομικά χαρακτηριστικά και φυσικές ιδιότητες των δειγμάτων των τριδιάστατων υφασμάτων .....	131
Πίνακας 6.2 Αντίσταση ροής για κάθε δείγμα τριδιάστατου υφάσματος .....	132
Πίνακας 6.3 Δομικά χαρακτηριστικά νέων δειγμάτων τριδιάστατων υφασμάτων.....	135



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ**



## 1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

### 1.1.1 Εισαγωγή στην Ακουστική

Η Ακουστική αποτελεί έναν από τους αρχαιότερους κλάδους της φυσικής επιστήμης. Η απαρχή της ιστορίας της τοποθετείται στον 6<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. με τις πρώτες αναφορές του Πυθαγόρα για την φύση του ήχου. Την άποψή του, πως ο ήχος δημιουργείται από ταλαντούμενα σώματα, έρχεται να ενισχύσει αργότερα ο Αριστοτέλης (384-322 π.Χ.), ισχυριζόμενος πως ο ήχος είναι αποτέλεσμα της συμπίεσης αέρα που παράγεται από μία πηγή. Η φυσική μελέτη και ερμηνεία της Ακουστικής σημείωσε ουσιαστική πρόοδο με τον Marin Mersenne (1588-1648) ο οποίος έδωσε τον πρώτο ορισμό της συχνότητας των ακουστών ήχων προσδιορίζοντάς τον στα 84 Hz. Η μαθηματική θεμελίωση για την διάδοση του ήχου έγινε από τον Isaac Newton ο οποίος στο έργο του Principia (1687) έδωσε την μηχανική εξήγηση του ήχου, θεωρώντας τον ως παλμούς πίεσης που διαδίδονται στον αέρα μέσω των γειτονικών σωματιδίων. Η ακουστική θεωρία, ωστόσο, σε σταθερότερη μαθηματική και φυσική βάση διατυπώθηκε από τους Euler (1707-1783), Lagrange (1736-1813) και d' Alembert (1717-1783) [1].

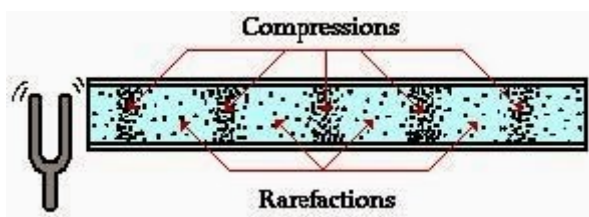
Από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, παρατηρείται μία αλματώδης ανάπτυξη της ακουστικής χάρη στην ευρεία εφαρμογή των υφιστάμενων θεωρητικών γνώσεων και στην ανάπτυξη διαφόρων νέων κλάδων όπως η αρχιτεκτονική ακουστική, η υποβρύχια ακουστική, η ηλεκτροακουστική, η ακουστική των υπερήχων, που είναι μερικοί από αυτούς.

### 1.1.2 Περιγραφή του ήχου

Το μεγάλο ενδιαφέρον που παρουσιάζει η Ακουστική οφείλεται στο γεγονός ότι ο ήχος συνοδεύει κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα. Οι εφαρμογές του δεν περιορίζονται στη μετάδοση πληροφοριών ή την ψυχολογική επίδραση στον άνθρωπο αλλά και στην έρευνα και την τεχνολογία. Στην ερώτηση “τι είναι ήχος” οι απαντήσεις είναι πολλαπλές ανάλογα με το τομέα που εξετάζεται.

Μία κοινή απάντηση είναι πως ήχος είναι οτιδήποτε μπορεί να ακουστεί. Ένας ακριβέστερος ορισμός παρ’όλα αυτά θα μπορούσε να είναι ο ακόλουθος: ήχος εμφανίζεται όταν μία διαταραχή που διαδίδεται μέσα σε ένα ελαστικό υλικό προκαλεί εναλλαγές στην πίεση ή μετακίνηση στα μόρια του υλικού, και μπορεί να ανιχνευθεί από τον άνθρωπο ή από κάποιο μετρητικό όργανο.

Ως φυσικό μέγεθος, ο ήχος περιγράφεται ως η μηχανική διαταραχή που διαδίδεται με ορισμένη ταχύτητα μέσα σε ένα μέσο που μπορεί να αναπτύξει εσωτερικές δυνάμεις (π.χ. ελαστικότητας, εσωτερικής τριβής) και έχει τέτοιο χαρακτήρα ώστε να μπορεί να διεγείρει το αισθητήριο ακοής και να προκαλέσει ακουστικό αίσθημα (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Διάδοση ηχητικού κύματος

Σύμφωνα με βασικές αρχές (Αρχή διατήρησης της μάζας, 2<sup>ος</sup> νόμος του Νεύτωνα, Αρχές συμπιεστού ρευστού) ο ήχος ως μία μηχανική χωροχρονική διαταραχή ικανοποιεί την κυματική εξίσωση. Η κυματική εξίσωση στον χώρο των τριών διαστάσεων και στην περίπτωση διάδοσης σε μέσο χωρίς απώλειες δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

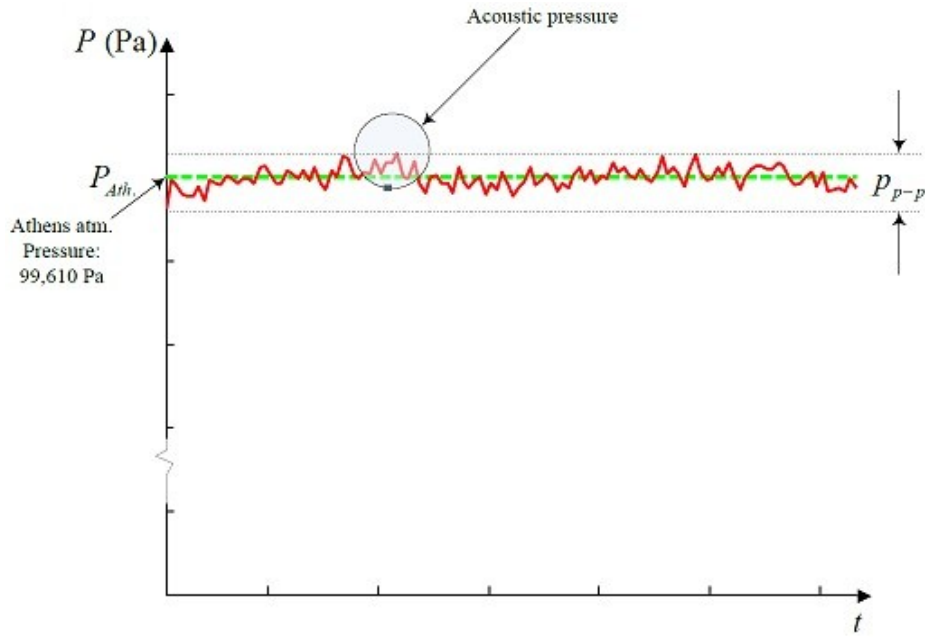
Η πιο απλή περίπτωση κύματος είναι αυτή των αρμονικών επίπεδων κυμάτων, όπου η διαταραχή διαδίδεται κατά μήκος μίας διάστασης, έστω την  $x$ , ενώ είναι σταθερή στις άλλες δύο κατευθύνσεις. Στη περίπτωση αυτή, ο ήχος ικανοποιεί την μονοδιάστατη κυματική εξίσωση:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2)$$

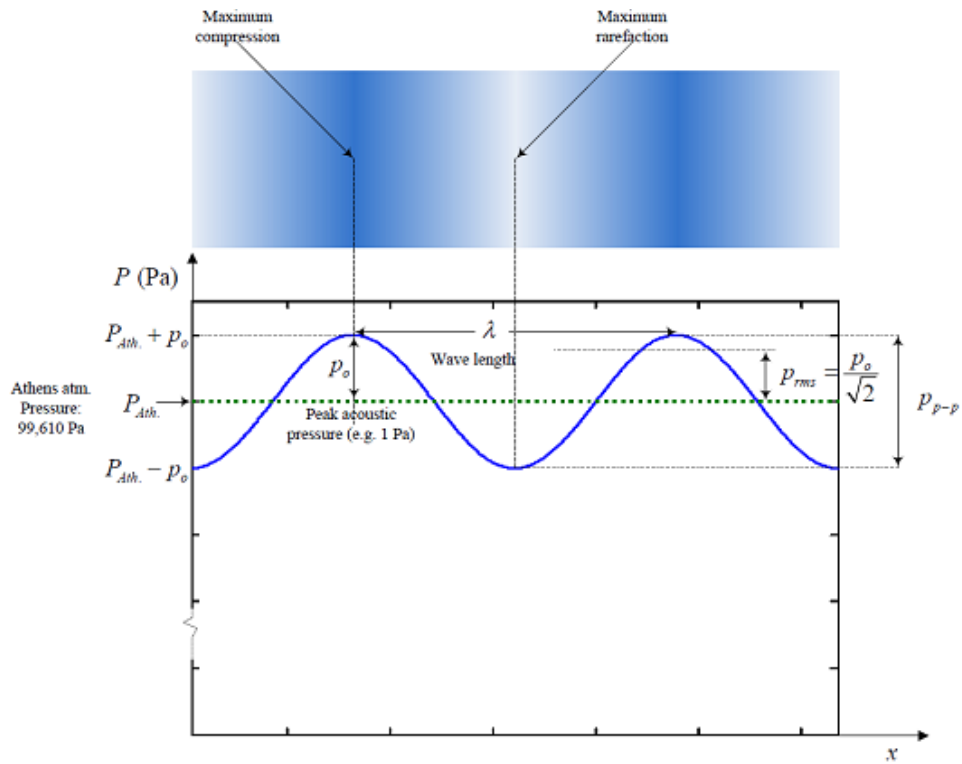
όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του ήχου, χαρακτηριστικό μέγεθος του μέσου διάδοσης για δεδομένη θερμοκρασία.

Κατά τη διάδοση του ηχητικού κύματος σε ένα μέσο, δεν παρατηρείται μεταφορά των μορίων του μέσου, αλλά μεταφορά της διαταραχής από το ένα μόριο στο διπλανό του. Αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας είναι η χωροχρονική διακύμανση της πίεσης γύρω από την στατική πίεση του μέσου διάδοσης. Παρατηρείται δηλαδή, μία ακολουθία εναλλασσόμενων πυκνωμάτων (αυξήσεις της πίεσης) και αραιωμάτων (μειώσεις της πίεσης) ανάμεσα σε γειτονικά σημεία του μέσου [1, 2]. Τα γραφήματα που ακολουθούν είναι ενδεικτικά (Σχήμα 1.2, Σχήμα 1.3).





Σχήμα 1.2 Διακύμανση της ακουστικής πίεσης γύρω από τη στατική ως προς το χρόνο, στην περιοχή της Αθήνας



Σχήμα 1.3 Εναλλασσόμενα πυκνώματα και αραιώματα των μορίων του μέσου γύρω από τη στατική τους πίεση, οδηγούν σε διακύμανση της ακουστικής πίεσης

### 1.1.3 Τύποι ηχητικών κυμάτων

Τα ηχητικά κύματα ως προς τη σχέση της ταχύτητας διάδοσης με την ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου σε κάθε σημείο του ηχητικού κύματος, διακρίνονται στους παρακάτω τρεις τύπους:

- Διαμήκη κύματα
- Εγκάρσια κύματα
- Επιφανειακά κύματα

Στα διαμήκη κύματα οι δύο ταχύτητες είναι παράλληλες ενώ στα εγκάρσια είναι κάθετες. Στα επιφανειακά ή καμπτικά κύματα τα σωματίδια του μέσου διάδοσης διαγράφουν ελλειπτικές τροχιές, με τον μεγάλο άξονα να είναι κάθετος στην επιφάνεια του μέσου και την εστία να ταυτίζεται με τη θέση ισορροπίας.

Μία ακόμα διάκριση των ηχητικών κυμάτων **σχετίζεται με τον τρόπο εξάπλωσης της διαταραχής στο μέσο διάδοσης** και έχει ως εξής:

- Σφαιρικά κύματα
- Επίπεδα κύματα
- Κυλινδρικά κύματα

Στα σφαιρικά κύματα, τα μέτωπα κύματος είναι ομόκεντρες σφαίρες. Στα επίπεδα κύματα, η διαταραχή του μέσου εξαπλώνεται με τη μορφή επίπεδης επιφάνειας, με τα μέτωπα κύματος να είναι παράλληλα επίπεδα. Τέλος, στα κυλινδρικά κύματα, τα μέτωπα κύματος είναι ομοαξονικοί κύλινδροι [1].

### 1.1.4 Μέτρηση του ήχου

Η μέτρηση του ήχου αναφέρεται στον προσδιορισμό των βασικών χαρακτηριστικών του ήχου, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

**Περίοδος (T)**, είναι ο χρόνος που απαιτείται για έναν πλήρη κύκλο ενός αρμονικού κύματος.

**Συχνότητα (f)**, είναι ο αριθμός των κύκλων μεταβολής της πίεσης ενός αρμονικού κύματος σε ένα μέσο ανά δευτερόλεπτο.

$$f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

**Οκτάβα**, ορίζεται μία ζώνη σταθερού εύρους συχνοτήτων (γραμμικής κλίμακας), στην οποία η μεγαλύτερη πλευρική συχνότητα είναι διπλάσια της μικρότερης.

**Γωνιακή ταχύτητα ( $\omega$ )**, είναι ο ρυθμός μεταβολής της φάσης ενός ημιτονοειδούς κύματος.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (4)$$

**Μήκος κύματος ( $\lambda$ )** ενός διαδιδόμενου επίπεδου αρμονικού κύματος σε ισότροπο μέσο διάδοσης, είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο κυματικά μέτωπα που έχουν μεταξύ τους χρονική διαφορά ίση με την περίοδο του κύματος.

**Κυματάριθμος (k)**, ορίζεται ως η αλλαγή φάσης ανά μονάδα απόστασης σε ένα οδεύον κύμα.

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad (5)$$

**Ταχύτητα του ήχου (c)**, είναι η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής στο υλικό μέσο.

$$c = \lambda \cdot f \quad (6)$$

**Ταχύτητα των σωματιδίων (u)**, είναι η ταχύτητα ταλάντωσης των σωματιδίων του μέσου διάδοσης.

**Ταχύτητα όγκου (U)**, ορίζεται ως ο ρυθμός ροής του μέσου διάδοσης από μία επιφάνεια εμβαδού S κάθετη στη ταχύτητα ροής.

$$U = S \cdot u \quad (7)$$

**Ακουστική πίεση (p)**, είναι η δημιουργούμενη υπερπίεση ή υποπίεση (σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση) που δημιουργεί το ηχητικό κύμα κατά τη διάδοσή του.

**Ακουστική εμπέδηση (Z)** ενός μέσου ονομάζεται ο λόγος της ακουστικής πίεσης προς την ταχύτητα όγκου του μέσου διάδοσης.

$$Z = \frac{p}{U} \quad (8)$$

**Ειδική ακουστική εμπέδηση ( $z_s$ )** ενός μέσου ονομάζεται ο λόγος της ακουστικής πίεσης προς την ταχύτητα των σωματιδίων του μέσου.

$$z_s = \frac{p}{u} \quad (9)$$

**Χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση ( $z_c$ )**, ονομάζεται η ειδική ακουστική εμπέδηση στην περίπτωση των επίπεδων κυμάτων.

$$z_c = \rho \cdot c \quad (10)$$

**Ακουστική ενέργεια (W)**, είναι η ενέργεια που περιέχεται σε ένα ακουστικό μέσο λόγω της παρουσίας του ηχητικού κύματος.

**Πυκνότητα ακουστικής ενέργειας (D)**, ορίζεται ως το πηλίκο της ηχητικής ενέργειας που περιέχεται σε έναν στοιχειώδη όγκο σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου.

$$D = \frac{dW}{dV} \quad (11)$$

**Στάθμη ακουστικής πίεσης ( $L_p$ )**, ορίζεται από τη σχέση:

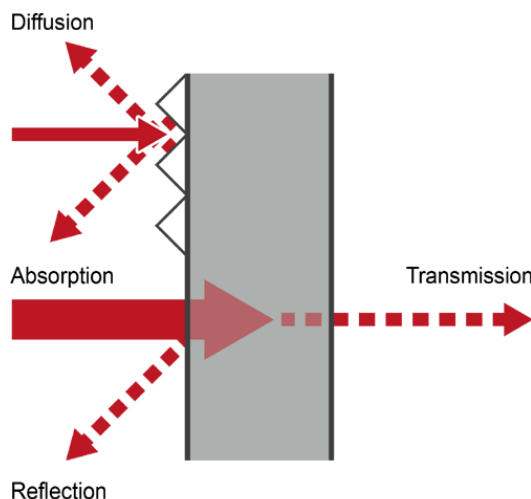
$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p_{rms}}{p_{ref}} \quad (12)$$

όπου  $p_{rms}$  η πίεση ήχου σε κάποιο σημείο του μέσου ( $p_{rms} = p \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$ ) και  $p_{ref}$  η πίεση αναφοράς.

**Ένταση του ήχου (I)**, ορίζεται η ισχύς του ηχητικού κύματος ανά μονάδα επιφάνειας [2,3].

### 1.1.5 Απορρόφηση του ήχου

Όταν ένα ηχητικό κύμα πέσει επάνω σε κάποια επιφάνεια διαχωρισμού δύο μέσων, ένα μέρος από την ενέργεια που μεταφέρει ανακλάται, ενώ ένα άλλο μέρος απορροφάται ή διαδίδεται μέσω της επιφάνειας διαχωρισμού από την άλλη πλευρά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4 παρακάτω.



**Σχήμα 1.4 Απορρόφηση ήχου**

Στο σημείο αυτό, ορίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ανάκλασης, μετάδοσης και απορρόφησης, αντίστοιχα, ως εξής:

$$\alpha_r = \frac{W_r}{W_i} = \frac{I_r}{I_i} \quad (13)$$

$$\alpha_t = \frac{W_t}{W_i} = \frac{I_t}{I_i} \quad (14)$$

$$\alpha_\alpha = \frac{W_\alpha}{W_i} = \frac{I_\alpha}{I_i} \quad (15)$$

Ένα ζήτημα που θα απασχολήσει την παρούσα μελέτη είναι η απορρόφηση του ήχου από υλικά που παρεμβάλλονται στη πορεία διάδοσης του ηχητικού κύματος [2].

Η απορρόφηση αυτή οφείλεται κυρίως σε δύο φαινόμενα:

- Μετατροπή ηχητικής ενέργειας σε κινητική: Το ηχητικό κύμα διεγείρει σε ταλάντωση τα μόρια του μέσου με αποτέλεσμα να παρατηρείται μείωση της αρχικής ενέργειας.
- Μετατροπή ηχητικής ενέργειας σε θερμική: Καθώς το ηχητικό κύμα εισχωρεί στο υλικό, το μέσο διάδοσης (συνήθως ο αέρας) κατά την εκτέλεση των ταλαντώσεων, λόγω τριβών με το υλικό, χάνει ενέργεια [1,2].

### 1.1.6 Είδη απορροφητικών υλικών

Τα απορροφητικά υλικά χωρίζονται στις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

- Πορώδη απορροφητικά
- Απορροφητικά τύπου μεμβράνης
- Συντονιστές
- Διάτρητες επιφάνειες
- Ηλεκτρονικοί απορροφητές

Παρακάτω, θα γίνει αναλυτική αναφορά στο μηχανισμό απορρόφησης κάθε επιμέρους κατηγορίας υλικών καθώς και στα χαρακτηριστικά που τους εξασφαλίζουν βέλτιστη συμπεριφορά.

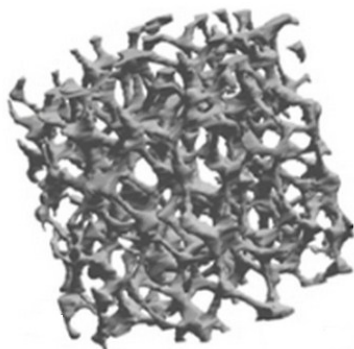
Στα **πορώδη υλικά**, η απορρόφηση του ήχου ωφείλεται στην απώλεια ενέργειας λόγω τριβών καθώς ο αέρας κινείται μέσα στους πόρους του υλικού, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμική. Οι δυνάμεις τριβής που σχηματίζονται, είναι ανάλογες με την δυναμική πίεση του κινούμενου αέρα και κατ'επέκταση ανάλογες με την ταχύτητα ταλάντωσης των μορίων του υλικού. Η ταχύτητα αυτή λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της σε αποστάσεις ίσες με  $\lambda/4$ ,  $3\lambda/4$  κ.λπ. από μία ανένδοτη επιφάνεια, καθώς όταν το ηχητικό κύμα προσπίπτει επάνω στην επιφάνεια σχηματίζονται στάσιμα κύματα.

Προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική απορρόφηση του ήχου θα πρέπει ο συντελεστής ανάκλασης των υλικών αυτών να είναι μικρός. Κάτι τέτοιο εξασφαλίζεται με μικρή πυκνότητα υλικού, 2-3 φορές μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Ένα επιπλέον στοιχείο που επηρεάζει την τιμή της απορρόφησης είναι η διάμετρος των πόρων, η οποία θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του ήχου. Επιπλέον, σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά τους έχει και το σημείο τοποθέτησής τους ως προς μία ανένδοτη επιφάνεια. Τα πορώδη υλικά επιτυγχάνουν μεγαλύτερη απορρόφηση όταν βρίσκονται σε θέσεις στις οποίες η ταχύτητα σωματιδίων του ηχητικού κύματος είναι μέγιστη, οι οποίες όπως ήδη αναφέρθηκε βρίσκονται σε απόσταση ίση με  $\lambda/4$  από την ανένδοτη επιφάνεια [1,3].

Αν υπακούουν στα παραπάνω κριτήρια οι πορώδεις απορροφητές έχουν μεγαλύτερη απόδοση σε μέσες και υψηλές συχνότητες, με συντελεστή απορρόφησης που δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha(f) = 4 \cdot \frac{R_f}{\left(\frac{R_f}{\rho \cdot c} + 1\right)^2 + \left(\cot\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{d}{c}\right)\right)^2} \quad (16)$$

όπου,  $R_f$  η αντίσταση ροής,  $\rho$  η πυκνότητα του υλικού,  $c$  η ταχύτητα του ήχου,  $f$  η συχνότητα του ήχου και  $d$  η διάμετρος των πόρων.

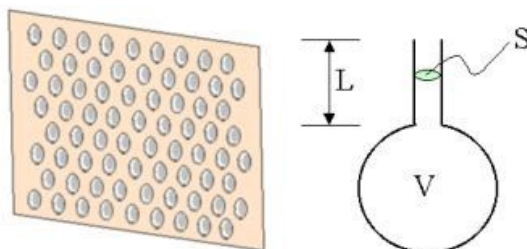


Σχήμα 1.5 Πορώδης απορροφητής

Τα **απορροφητικά υλικά τύπου μεμβράνης**, αποτελούνται από μία λεπτή μεμβράνη (συνήθως ύφασμα), που βρίσκεται σε μικρή απόσταση από κάποια ανένδοτη επιφάνεια. Όταν το ηχητικό κύμα προσπίπτει στη μεμβράνη, τη διεγείρει σε ταλαντώσεις και η απώλεια της ηχητικής ενέργειας οφείλεται στην εσωτερική τριβή του υλικού. Τα υλικά αυτά αυξάνουν την επίδοσή τους όσο πιο λεπτά είναι καθώς κατά τη διέγερσή τους η δόνηση διευκολύνεται. Χαρακτηριστική συμπεριφορά των υλικών αυτών είναι η μεγάλη απορρόφηση σε χαμηλές συχνότητες η οποία σταδιακά μειώνεται μέχρι το μηδενισμό στις υψηλότερες, καθώς και η παρουσία ενός μεγίστου, στη συχνότητα που ταυτίζεται με τη φυσική συχνότητα συντονισμού της μεμβράνης [1].

Ο **συντονιστής Helmholtz** (Σχήμα 1.6) είναι μία κοιλότητα μέσα σε οποιοδήποτε υλικό η οποία χρησιμεύει ως εξής: Όταν ο ήχος πέσει στο στόμιο της κοιλότητας, διεγείρει τον αέρα που βρίσκεται μέσα στο συντονιστή και η απώλεια ενέργειας οφείλεται και πάλι στην απόσβεση των ταλαντώσεων λόγω τριβής. Ο συντονιστής ξαναεκπέμπει ήχο ο οποίος όμως δεν είναι ακουστός σε κλειστούς χώρους. Η συμπεριφορά του ομοιάζει με τη μηχανική συμπεριφορά του συστήματος ελατήριο-μάζα.

Ο συντελεστής απορρόφησης των υλικών αυτών παρουσιάζει ένα οξύ μέγιστο στη συχνότητα συντονισμού ενώ στις υπόλοιπες συχνότητες είναι σχεδόν μηδέν. Όπως γίνεται σαφές, αυτός ο τύπος απορροφητή ενδείκνυται για κλειστούς χώρους όπου επικρατούν τόνοι χαμηλής συχνότητας [1].

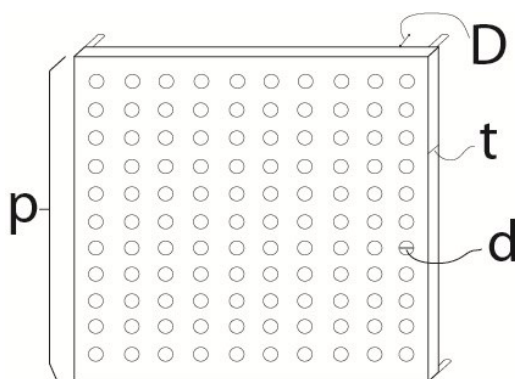


Σχήμα 1.6 Συντονιστής Helmholtz

Οι **διάτρητες επιφάνειες** αποτελούν ιδιαίτερα διαδεδομένους απορροφητές για χρήση τόσο σε ανοιχτούς όσο και σε κλειστούς χώρους. Στην πραγματικότητα αυτό συμβαίνει γιατί

συνδυάζουν και τα τρία είδη των απορροφητών που περιγράφηκαν παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, η διάτρητη επιφάνεια λειτουργεί ως απορροφητής τύπου μεμβράνης, οι οπές ως συντονιστές Helmholtz και το ενδιάμεσο υλικό (αν υπάρχει) ως πορώδες υλικό.

Οι διατρήσεις μπορεί να είναι κυκλικές ή να έχουν σχήμα σχισμών ή ακόμα συνδυασμός και των δύο (Σχήμα 1.7). Η διάτρηση παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του υλικού καθώς κατάλληλος συνδυασμός σχήματος οπών, ύπαρξης ή μη απορροφητικού υλικού κάτω από την διάτρητη επιφάνεια και ποσοστού διάτρησης καθορίζουν την απόδοση του υλικού. Όπως γίνεται κατανοητό, αυτού του τύπου οι απορροφητές προσφέρουν περισσότερες και ποικίλλες δυνατότητες απορρόφησης αναλόγως με τις εκάστοτε ανάγκες.



Σχήμα 1.7 Διάτρητη απορροφητική επιφάνεια

Τέλος, οι **ηλεκτρονικοί απορροφητές** διαφέρουν εξ' ολοκλήρου στην αρχή λειτουργίας με τις παραπάνω κατηγορίες, καθώς επιδιώκουν την ακύρωση του ήχου με εκπομπή άλλου ήχου αντίθετης φάσης προς τον αρχικό [1].

## 1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΤΑ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΑ ΚΛΩΣΤΟΥΨΑΝΤΟΥΡΓΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ

### 1.2.1 Εισαγωγή στα τριδιάστατα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα

Εδώ και χιλιάδες χρόνια, τα υφάσματα ντύνουν το ανθρώπινο σώμα και συνδέονται άρρηκτα με κάθε δραστηριότητα της καθημερινής ζωής του ανθρώπου, την ανάγκη του για προστασία και επιβίωση, τη διάκριση της ιεραρχίας, του ρόλου και της ευθύνης του, την έκφραση των συναισθημάτων του. Επιπλέον, τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα αποτελούν έναν από τους αρχαιότερους και τους πιο διαδεδομένους στον άνθρωπο τομείς μηχανικής. Η εμφάνισή τους τοποθετείται στην αρχαία Αίγυπτο, όπου οι Φαραώ φορούσαν περίτεχνα γάντια χειρός κατασκευασμένα από βαμβακερά νήματα, ή στην αρχαία Κίνα, ή και ακόμα πιο πίσω στον χρόνο. Ήδη από το 1898, αναγνωρίστηκε ότι οι διελασματικές ιδιότητες διάτμησης των ιμάτων κίνησης θα μπορούσαν να βελτιωθούν με τη προσθήκη ενισχύσεων, κατασκευασμένων από πολυστρωματικά υφάσματα. Στο τέλος της δεκαετίας του '60, η αεροδιαστημική βιομηχανία ξεκινά την αναζήτηση σύνθετων δομών βασισμένων σε ίνες που θα ήταν ιδιαίτερα ανθεκτικές στις πολλών κατευθύνσεων πιέσεις σε ακραίες θερμοκτικές συνθήκες. Στη Γαλλία και αργότερα στις Ηνωμένες Πολιτείες και στην Ιαπωνία,

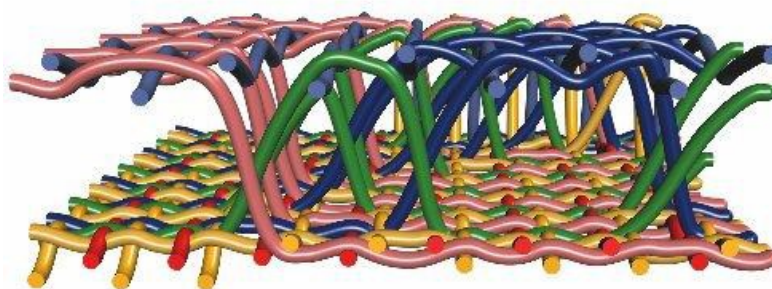
αναπτύχθηκαν τα σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα των οποίων τα συστήματα ινών τακτοποιήθηκαν πολυδιαστατικά.

Πέρα από τον τομέα της ένδυσης, όπως γίνεται φανερό, τα υφάσματα έχουν διεισδύσει σε εκατομμύρια άλλα πεδία που ποικίλλουν, από παραδοσιακές επενδύσεις εσωτερικών χώρων (σκηνές, έπιπλα, κτίρια, αυτοκίνητα, αεροπλάνα) έως εφαρμογές σε σημαντικούς τομείς όπως την ιατρική, την αρχιτεκτονική, το διάστημα, το στρατό, την ασφάλεια. Οι ιδιαίτερες ιδιότητες των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων τα έχουν καταστήσει αναπόσπαστο στοιχείο των σύγχρονων τεχνικών εφαρμογών με φανερή επίδραση στην καθημερινότητα του ανθρώπου, καθώς κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα συναντώνται σε μεταφορές, σε ενισχύσεις, σε διυλίσεις, σε μονώσεις, σε εξοπλισμούς προστασίας κ.α.

Η τεχνολογία των υφασμάτων εκτός από τα μαθηματικά, τη φυσική και τη χημεία συνδυάζει πολλαπλούς τομείς της μηχανικής όπως των υλικών, τη μηχανολογία, την ηλεκτρολογία. Δεν είναι τυχαίο λοιπόν, το αυξανόμενο ενδιαφέρον που παρουσιάζεται για την έρευνα των ιδιοτήτων τους, καθώς αποτελούν τον περισσότερο υποσχόμενο τομέα στο χώρο της κλωστοϋφαντουργίας τα τελευταία χρόνια [4].

### 1.2.2 Περιγραφή τριδιάστατων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων

Τα τριδιάστατα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα (Σχήμα 1.8) ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους και την εσωτερική δομή τους καθορίζονται με διαφορετικό τρόπο από τους ερευνητές. Κάποιοι αναγνωρίζουν ένα προϊόν ως κλωστοϋφαντουργικό όταν αυτό έχει τρεις διαστάσεις  $x$ ,  $y$ ,  $z$  στη δομή του, ενώ άλλοι όταν αυτό το τριδιάστατο προϊόν παράχθηκε σε ένα μόνο στάδιο. Γενικά, ως πραγματικά τριδιάστατα υφάσματα νοούνται τα υφάσματα που αποτελούνται από νήματα ασυνεχών ή συνεχών ινών, μονόινα ή συνδυασμούς αυτών, έχουν τουλάχιστον ένα ορθογώνιο σετ νημάτων στις διευθύνσεις  $x$ ,  $y$ ,  $z$  και παράγονται σε αυτοματοποιημένες μηχανές χωρίς χειροκίνητη λειτουργία [2].







Σχήμα 1.8 Τριδιάστατα κλωστοϋφαντουργικά υφάσματα

### 1.2.3 Παραγωγή τριδιάστατων κλωστοϋφαντουργικών δομών

Σήμερα, οι τριδιάστατες κλωστοϋφαντουργικές δομές αποτελούν μία από τις κυριότερες κατηγορίες των υφασμάτων που συμμετέχουν σε τεχνικές εφαρμογές. Οι μέθοδοι παραγωγής τους ποικίλλουν ως προς την καταλληλότητα, ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες της εκάστοτε δομής. Αυτές μπορεί να σχετίζονται με τη μηχανική συμπεριφορά του υφάσματος, τη χημική αντίδραση, την ακουστική ή σπανιότερα με την εμφάνιση και τον σχεδιασμό τους. Ενδεικτικά, νέες και βελτιωμένες μέθοδοι παραγωγής υφασμάτων τεχνικών εφαρμογών αποτελούν η τριδιάστατη ύφανση (3D weaving), η πλεκτική στημονιού με εισαγωγή υφαδιού (warp knitting with weft insertion), η πολυαξονική πολυεπίπεδη παραγωγή υφάσματος (multi-axial multi-ply fabric production), η πλεκτική στημονιού με διπλή μπάρα βελόνων με εισαγωγή υφαδιού (double needle bar warp knitting with weft insertion) κ.ά.

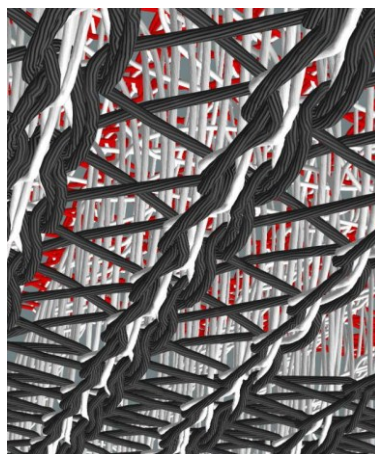
Όλες οι μέθοδοι παραγωγής κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων προσφέρουν ένα πλήθος πλεονεκτημάτων ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Παρ' όλα αυτά, η τεχνική πλεκτικής στημονιού ή υφαδιού είναι εκείνη που υπερέχει των υπολοίπων με ιδιαίτερως ωφέλιμες ιδιότητες για χρήση των υφασμάτων σε τεχνικές εφαρμογές. Μέσω της τεχνικής αυτής δίνεται η δυνατότητα παραγωγής ποικίλων δομών, με ιδιαίτερα διαδεδομένα τα τριδιάστατα υφάσματα δημιουργίας κενού ή διατήρησης απόστασης (spacer fabrics). Πρόκειται για μία κατηγορία υφασμάτων που εισήχθη στην αγορά σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, χάρη στο εύρος των φυσικών και λειτουργικών ιδιοτήτων που παρέχει [4].

#### 1.2.4 Υφάσματα δημιουργίας κενού ή διατήρησης απόστασης (Spacer Fabrics)

Τα υφάσματα διατήρησης απόστασης (Σχήμα 1.9) έχουν τριδιάστατη δομή η οποία αποτελείται από δύο εξωτερικά υποστρώματα απλού πλεκτού υφάσματος που συνδεούνται μεταξύ τους μέσω των νημάτων ή δομών διατήρησης απόστασης. Σύμφωνα με τους ερευνητές, τα spacer fabrics είναι ένας ειδικός τύπος κλωστοϋφαντουργικού προϊόντος με τριδιάστατη αρχιτεκτονική νήματος και τριδιάστατη αρχιτεκτονική υφάσματος.

Η αρχιτεκτονική νήματος θεωρείται τριδιάστατη όταν το ύφασμα δημιουργείται από τρία ή περισσότερα συστήματα νημάτων, επιτρέποντας σε ένα ορθογώνιο σύστημα αξόνων να συμπίπτει με τον προσανατολισμό των νημάτων με τέτοιο τρόπο ώστε, ο κάθε άξονας να σχηματίζει ορθή γωνία με καθέναν από τους προσανατολισμούς των νημάτων.

Η αρχιτεκτονική υφάσματος σχετίζεται με τη γεωμετρία του κλωστοϋφαντουργικού προϊόντος και θεωρείται τριδιάστατη όταν διαμορφώνεται όγκος από το προϊόν, ανεξάρτητα από την αρχιτεκτονική του νήματος [4].



Σχήμα 1.9 Υφάσματα δημιουργίας κενού

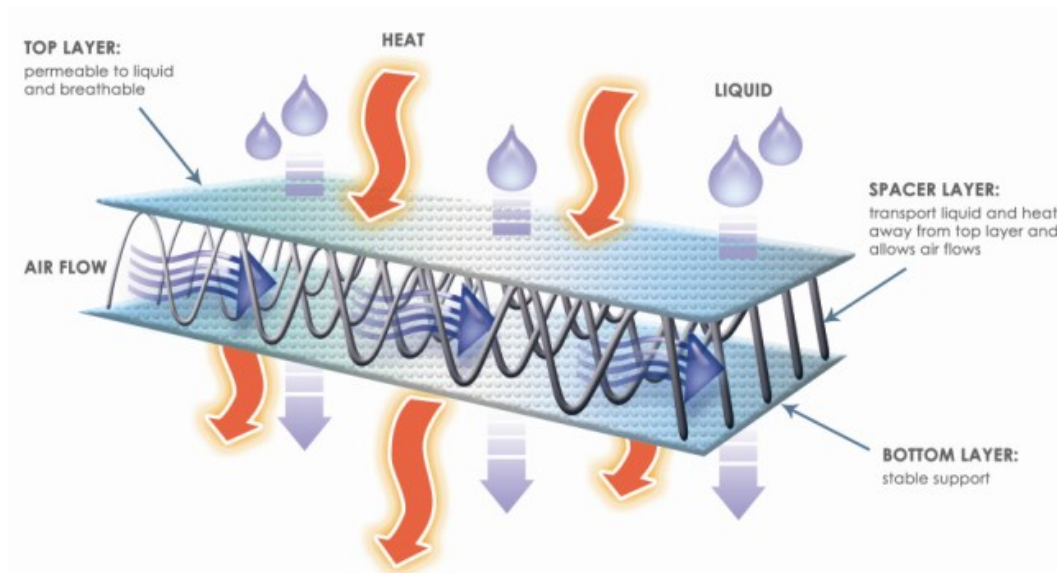
#### 1.2.5 Ιδιότητες υφασμάτων δημιουργίας κενού (Spacer Fabrics)

Η τριδιάστατη δομή των spacer fabrics τους εξασφαλίζει ιδιότητες που δεν συναντώνται σε άλλες μορφές κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων και τα καθιστά μοναδικά στη χρήση τους.

Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένες από αυτές:

- Αεροδιαπερατότητα
- Ενυδάτωση, μεταφορά και απορρόφηση θερμότητας
- Απορρόφηση ήχου
- Αντίσταση συμπίεσης
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης λειτουργικών υλικών
- Καλή αντίσταση επιφάνειας
- Ελαφριές δομές
- Ανακυκλώσιμα υλικά

Οι παραπάνω ιδιότητες (Σχήμα 1.10) μπορούν να βελτιωθούν με σωστή επιλογή των δομικών χαρακτηριστικών των υφασμάτων. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στις ίνες σύνδεσης, παράγοντες όπως το πάχος τους, ο αριθμός τους, το μήκος τους, ο προσανατολισμός τους, το υλικό κατασκευής τους αποτελούν καθοριστικά στοιχεία για τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, το πάχος του υφάσματος, η πυκνή ή αραιή δομή των εξωτερικών στρωμάτων καθώς και το είδος και το υλικό των νημάτων που χρησιμοποιούνται μπορεί να επηρεάσει σημαντικά αυτές τις ιδιότητες [3,4].



Σχήμα 1.10 Ιδιότητες υφασμάτων δημιουργίας κενού

### 1.2.6 Πεδίο εφαρμογών υφασμάτων δημιουργίας κενού (Spacer Fabrics)

Τα spacer fabrics βρίσκουν εφαρμογή σε πολυάριθμους τομείς της σύγχρονης πραγματικότητας μερικοί από τους οποίους παρατίθενται. Μία πρώτη εφαρμογή τους παρατηρείται στο **τομέα της ένδυσης** καθώς αποτελούν συστατικά στοιχεία τμημάτων εσωρούχων, χρησιμοποιούνται σαν υλικά μόνωσης στα ρούχα και κυριαρχούν ως πολυστρωματικά υλικά στην αθλητική ένδυση.

Σημαντική είναι η παρουσία τους στον **ιατρικό τομέα**, είτε ως υλικά επιδέσμων ή θεραπευτικών ενισχύσεων είτε ως συστατικά στοιχεία στρωμάτων και μαξιλαριών για την πρόληψη ειδικών παθήσεων.

Τα spacer fabrics επιπλέον, στην **αρχιτεκτονική** χρησιμοποιούνται ως κατασκευαστικά στοιχεία σύνθετων υλικών λόγω της δυνατότητας που παρουσιάζουν για φόρτιση κατά μήκος των διαμηκών αξόνων τους. Η ελαφριά δομή τους τους εξασφαλίζει μία ακόμα τεχνική χρησιμότητα ως ενισχύσεις για σύνθετες δομές.

Στο **τομέα της ακουστικής**, τα υφάσματα διατήρησης απόστασης παρουσιάζουν αυξανόμενες δυνατότητες ηχοαπορρόφησης με αποτέλεσμα την ευρεία χρήση τους στην επένδυση εσωτερικών χώρων.

Σε **βιομηχανικές εφαρμογές**, κυριαρχεί η παρουσία τους λόγω των αυξημένων μηχανικών ιδιοτήτων τους. Πιο συγκεκριμένα, στη σύγχρονη αεροπλοΐα έχει προταθεί η χρήση τριδιάστατων υφασμάτων ως προστατευτικό κάλυμα τμημάτων των αεροσκαφών, λόγω της αυξημένης ανθεκτικότητας που παρουσιάζουν σε διάτρηση.

Σημαντικός τομέας εκμετάλλευσής τους θεωρείται η **ασφάλεια και προστασία**, καθώς με επιλογή κατάλληλων ινών ή με ενσωμάτωση στη δομή τους κατάλληλων υλικών, επιτυγχάνεται η επιβράδυνση φλογών.

Τέλος, μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα εντοπίζεται στην ανάπτυξη **κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων με ηλεκτρονικές λειτουργίες (e-textiles)**, τα οποία προορίζονται για χρήση στο στρατό, στην τηλεϊατρική και σε ποικίλες εφαρμογές της καθημερινότητας, βελτιώνοντας ουσιαστικά την ποιότητα ζωής [2,4,5].

### **1.3 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΚΛΩΣΤΟΥΨΑΝΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΣΤΗΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ**

#### 1.3.1 Χρήση τριδιάστατων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων στην ακουστική

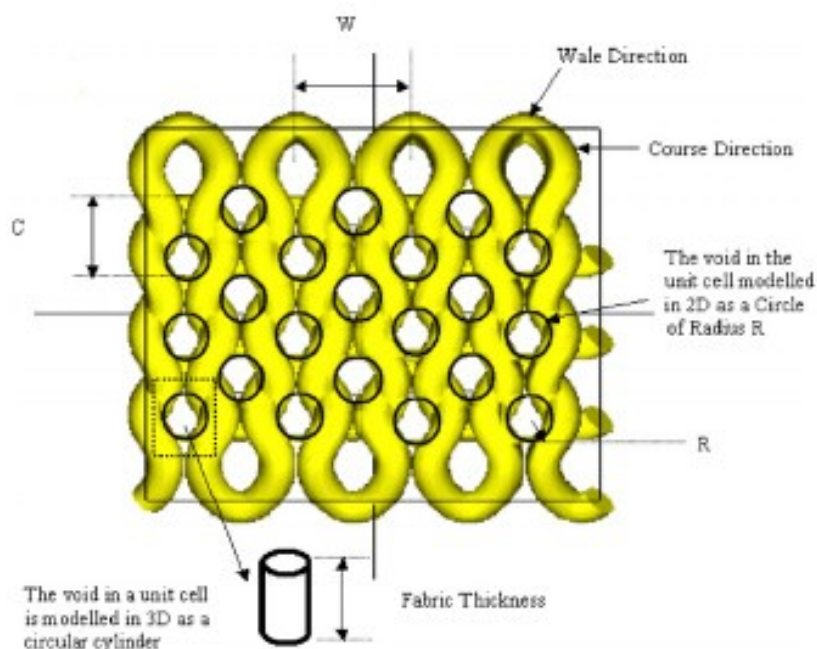
Τα υφάσματα αποτελούν τυπικά παραδείγματα απορροφητικών υλικών. Φυσικά, οι διαφορετικές τεχνικές κατασκευής και επεξεργασίας, οι διαφορετικές δομές και υλικά κατασκευής, οδηγούν στην παραγωγή υφασμάτων που ποικίλουν ως προς τα απορροφητικά τους χαρακτηριστικά. Ήδη από τις αρχές του 1970, το ενδιαφέρον εστιάστηκε στην αξιολόγηση ως προς την απορροφητικότητα των κοινών οικιακών υφασμάτων, όπως οι κουρτίνες και οι τάπητες. Τα τελευταία χρόνια, ένας αυξανόμενος αριθμός ερευνητών, τόσο από το τομέα της ακουστικής όσο και από τη πλευρά της κλωστοϋφαντουργίας, επικεντρώνουν την προσοχή τους στην ακουστική συμπεριφορά των υφασμάτων. Η τάση αυτή οφείλεται στην εξέλιξη των μεθόδων παραγωγής κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων και στις νέες υφαντικές ύλες που αναπτύσσονται. Ταυτόχρονα, τα προϊόντα αυτά αποτελούν μία ενδιαφέρουσα εναλλακτική επιλογή ηχοαπορρόφησης εξ' αιτίας των δύο πλεονεκτημάτων που προσφέρουν: χαμηλό κόστος παραγωγής και ελαφριές δομές [2,3].

#### 1.3.2 Υφάσματα δημιουργίας κενού ως ηχοαπορροφητικά υλικά

Η δομική μονάδα ενός απλού πλεκτού υφάσματος, είναι η πλέξη η οποία δημιουργείται από την παρεμβολή θηλιών που σχηματίζονται από νήματα. Οι θηλιές αυτές είναι οργανωμένες τόσο σε σειρές όσο και σε στήλες και το σχήμα τους προσεγγίζει κυκλικές οπές. Εφόσον, όπως είναι γνωστό, τα υφάσματα διατήρησης απόστασης αποτελούνται από δύο στρώματα απλού πλεκτού υφάσματος και από ένα ενδιάμεσο στρώμα με διάκενα, οι κυκλικές οπές περιγράφονται ως κύλινδροι, των οποίων η περιφέρεια οριοθετείται από τα νήματα που σχηματίζουν τη θηλιά, και το ύψος από τα νήματα των δύο εξωτερικών υποστρωμάτων (Σχήμα 1.11). Δεδομένου ότι οι θηλιές είναι κατανεμημένες ομοιόμορφα στο ύφασμα, κατ' επέκταση υπάρχει μία ομοιόμορφη διάταξη και των κυλίνδρων σε μία μονάδα επιφάνειας. Με αυτόν τον τρόπο ένα πλεκτό ύφασμα ομοιάζει με ένα ηχοαπορροφητικό υλικό. Πιο συγκεκριμένα, τα υφάσματα διατήρησης απόστασης ανάλογα με τη γεωμετρία

τους, παρουσιάζουν την τυπική συμπεριφορά απορρόφησης ήχου ενός πορώδη απορροφητή ή ενός απορροφητή μικροδιάτρητης επιφάνειας [3].

Οι ηχοαπορροφητικές δυνατότητες των υφασμάτων δημιουργίας κενού είναι εύκολο να ελεγχθούν με κατάλληλη επιλογή βασικών γεωμετρικών και φυσικών τους χαρακτηριστικών. Το μέγεθος της ίνας, ο τρόπος πλέξης, το ποσοστό του πορώδους, η ελίκωση, το πάχος του υφάσματος, η ειδική αντίσταση στη ροή του αέρα, η πυκνότητα είναι μόνο ορισμένες από τις παραμέτρους οι οποίες πρέπει να συνδυασθούν κατάλληλα ώστε να παραχθεί το ιδανικό προϊόν για την εκάστοτε εφαρμογή [2, 3].



Σχήμα 1.11 Προσέγγιση μοντελοποίησης υφάσματος δημιουργίας κενού με πορώδη απορροφητή

### 1.3.3 Εφαρμογές υφασμάτων δημιουργίας κενού στην ακουστική (6)

Τα υφάσματα διατήρησης απόστασης ενδείκνυνται για χρήση σε οποιαδήποτε εφαρμογή απαιτεί μείωση θορύβου. Τυπικοί τομείς εκμετάλλευσής τους είναι οι ακόλουθοι:

- **Αρχιτεκτονική:** χρησιμοποιούνται ως επενδύσεις εσωτερικών χώρων σε περιπτώσεις όπου συναθροίζονται πολλοί χρήστες όπως αίθουσες συνεδριάσεων, εκθεσιακοί χώροι κ.ά.
- **Αυτοκινητοβιομηχανία:** χρησιμοποιούνται ως επένδυση στην ταπετσαρία στο εσωτερικό της καμπίνας, μειώνοντας τον εσωτερικό θόρυβο.
- **Αεροδιαστημική:** χρησιμοποιούνται τόσο στο εσωτερικό του αεροσκάφους για ακουστική άνεση των επιβατών, όσο και στη μηχανή για περαιτέρω απορρόφηση θορύβου από τα μηχανικά μέρη.
- **Ιατρική:** αποτελούν συστατικά στοιχεία προστατευτικών μέσων ακοής σε ιατρικές εφαρμογές.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ**





## 2.1 Το ζήτημα της ηχοαπορρόφησης

### 2.1.1 Εισαγωγή στην έννοια του προβλήματος

Από την πρώτη εμφάνιση των θαλάμων αντήχησης για τη μέτρηση της απορρόφησης του ήχου, στα τέλη του 1920 και στις αρχές του 1930, το ζήτημα της ηχοαπορρόφησης εμφανίζεται ιδιαίτερα διαδέδομενο στους κύκλους της ακουστικής. Το πρόβλημα αυτό αφορούσε, στη μεταβλητότητα στα αποτελέσματα των μετρήσεων που προέκυπταν από τους θαλάμους αντήχησης, όταν τα δείγματα εξετάζονταν υπό διαφορετικές συνθήκες όπως διαφορετικοί χώροι, διαφορετικές περιοχές δείγματος κ.ά. Επρόκειτο για ένα ζήτημα με εκτεταμένες συνέπειες στην ανάπτυξη της ακουστικής επιστήμης. Όπως αναφέρθηκε από τον Hunt (1939), στο συμπόσιο της δέκατης επετείου ίδρυσης της “Acoustical Society of America”, το ζήτημα της ηχοαπορρόφησης αποτέλεσε βασικό κίνητρο για την συσπείρωση των επιστημόνων και την ίδρυση της Ακουστικής Κοινότητας [7].

Όταν γίνεται λόγος για την έννοια της ακουστικής εσωτερικών χώρων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλες οι παράμετροι συμπεριφοράς του ήχου, οι οποίες καλύπτουν τόσο τις φυσικές όσο και τις ψυχολογικές πτυχές. Με άλλα λόγια, η ακουστική εσωτερικών χώρων ασχολείται με τη μέτρηση και την πρόβλεψη του ηχητικού πεδίου που διαμορφώνεται από τη συμβολή ηχητικών πηγών με σκοπό τον σχεδιασμό ενός καλού ακουστικού περιβάλλοντος, που θα ανταπεξέρχεται σε όλων των ειδών τις απαιτήσεις [5].

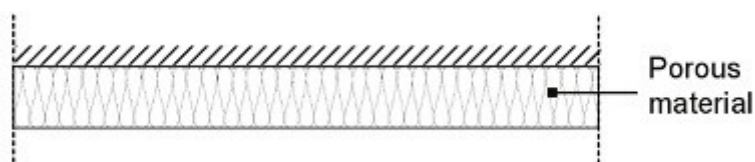
Το πρωταρχικό μέλημα κατά τη διάδοση ήχου σε εσωτερικούς χώρους είναι να διασφαλιστεί πως μόνο ένα μέρος της ηχητικής ενέργειας που εκπέμπεται από κάποια πηγή, θα ανακλαστεί πίσω στο χώρο. Η υπόλοιπη ενέργεια, θα απορροφηθεί, δηλαδή θα μετατραπεί σε θερμότητα. Ένα καλό ακουστικό περιβάλλον εξασφαλίζεται κατά κύριο λόγο, με εισαγωγή κατάλληλων ηχητικών απορροφητικών υλικών.

### 2.1.2 Κατηγορίες απορροφητικών υλικών

Οι δύο βασικές κατηγορίες απορροφητικών υλικών είναι:

- Πορώδεις απορροφητές (Σχήμα 2.1)

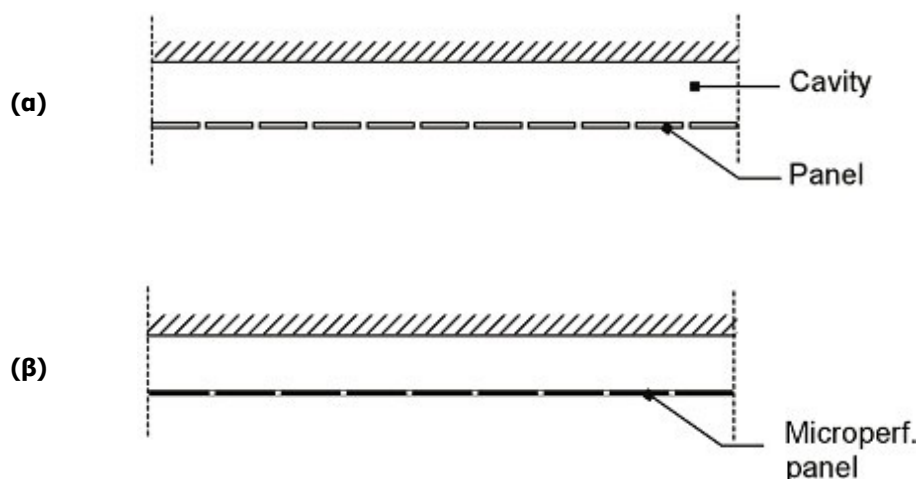
Όταν ο ήχος διαδίδεται σε μικρούς χώρους, όπως το διασυνδεδεμένο δίκτυο πόρων στα πορώδη υλικά, χάνεται ενέργεια. Αυτές οι απώλειες ενέργειας οφείλονται στο φαινόμενο της τριβής του αέρα με τα τοιχώματα των πόρων, στη μεταφορά θερμότητας από τον αέρα προς τον απορροφητή και στην απώλεια ορμής καθώς η ροή διέρχεται από μικρότερες διατομές. Η αρχική ηχητική ενέργεια του ρευστού που χάνεται μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια στον απορροφητή και σε κινητική ενέργεια στα μόριά του. Παρακάτω φαίνεται μία χαρακτηριστική μορφή πορώδους υλικού [7].



Σχήμα 2.1 Πορώδης απορροφητής

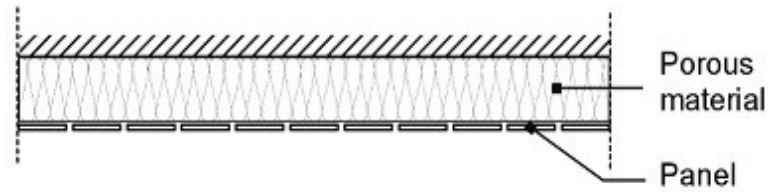
- Διάτρητες επιφάνειες (Σχήμα 2.2)

Η μείωση της ηχητικής ενέργειας που παρατηρείται κατά την παρεμβολή διάτρητων επιφανειών οφείλεται στην απόσβεση των ταλαντώσεων λόγω τριβών που αναπτύσσονται ανάμεσα στον αέρα και στη περιφέρεια των οπών, καθώς επίσης και στο φαινόμενο του συντονισμού που οφείλεται στη δόνηση της επιφάνειας του απορροφητή (ή καθώς) όταν προσκρούει σε αυτήν το ηχητικό κύμα. Αυτού του τύπου οι απορροφητές διαχωρίζονται ως προς τη διάμετρο των οπών σε διάτρητες επιφάνειες και μικροδιάτρητες επιφάνειες [5].



Σχήμα 2.2 Απορροφητική διάτρητη επιφάνεια (α), απορροφητική μικροδιάτρητη επιφάνεια (β)

Σε τεχνικές εφαρμογές, οι δύο παραπάνω κατηγορίες απορροφητών χρησιμοποιούνται συνδυαστικά (Σχήμα 2.3) εξ' αιτίας ενός βασικού πλεονεκτήματος που προσφέρουν. Πιο συγκεκριμένα, οι πορώδεις απορροφητές είναι αποτελεσματικοί σε μεσαίες και υψηλές συχνότητες ενώ οι διάτρητες επιφάνειες επιτυγχάνουν ικανοποιητική απορρόφηση ηχητικής ενέργειας κυρίως σε χαμηλές και μεσαίες συχνότητες. Όπως γίνεται φανερό λοιπόν, ο συνδυασμός τους επιφέρει απορρόφηση σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων απ' ότι θα επιτύγχανε ο κάθε απορροφητής μεμονωμένα. Παρακάτω, παρατίθεται μια τυπική μορφή απορροφητή που χρησιμοποιείται σε τεχνικές εφαρμογές [2].



Σχήμα 2.3 Συνδυασμός πορώδη απορροφητή-διάτρητης επιφάνειας

## 2.2 Μαθηματική μοντελοποίηση ηχητικών απορροφητών

Σύμφωνα με όσα παρουσιάσθηκαν παραπάνω, γίνεται αντιληπτό πως η γνώση του μαθηματικού μοντέλου ενός υλικού, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη τόσο για την ερμηνεία του μηχανισμού απορρόφησης όσο και για τη βελτίωση στο σχεδιασμό των απορροφητικών υλικών. Με χρήση των μαθηματικών μοντέλων, υπολογίζονται δύο βασικές παράμετροι της ακουστικής επιστήμης, η επιφανειακή ακουστική εμπέδηση και ο συντελεστής απορρόφησης ενός υλικού, μεγέθη τα οποία χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά του.

### 2.2.1 Πορώδεις απορροφητές

#### 2.2.1.1 Βασικές ιδιότητες υλικών

Η αλληλεπίδραση του ήχου με ένα πορώδες υλικό επηρεάζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού. Οι **ιδιότητες της μικροδομής** του, όπως είναι ευρέως γνωστές, χρησιμοποιούνται ως σχεδιαστικοί παράμετροι κατά την κατασκευή πορωδών απορροφητών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όγκου [2].

Οι δύο πιο σημαντικές και θεμελιώδεις ποσότητες είναι η αντίσταση ροής (flow resistivity) και το πορώδες (porosity).

- Αντίσταση ροής ( $\sigma$ )

Η αντίσταση ροής, είναι το μέτρο του πόσο εύκολα μπορεί ο αέρας να εισέλθει σε ένα πορώδες υλικό δηλαδή, τι αντίσταση συναντά η ροή καθώς το διαπερνά. Δίνει μία αίσθηση του πόση ενέργεια μπορεί να χαθεί εξ' αιτίας του φαινομένου του οριακού στρώματος στο εσωτερικό του υλικού. Τα πορώδη υλικά πρέπει να έχουν χαμηλή τιμή αντίστασης ροής ώστε ο ήχος να μπορεί να εισέλθει στο υλικό, αλλά όχι και τόσο χαμηλή ώστε να εξασφαλιστεί η διάχυση του ήχου.

Η αντίσταση ροής του αέρα,  $\sigma$  ( $\frac{1 \text{ kgf}}{\text{s} \cdot \text{m}^3} = \frac{1 \text{ rayl}}{\text{m}}$ ) ορίζεται ως:

$$\sigma = \frac{\Delta P}{d \cdot v_{fl}} \quad (17)$$

όπου  $\Delta P$  η πτώση πίεσης του αέρα,  $v_{fl}$  η μέση σταθερή ταχύτητα ροής και  $d$  το πάχος του απορροφητή [2].

- Πορώδες ( $\varepsilon$ )

Το πορώδες εκφράζει το μέτρο της ποσότητας του κενού χώρου μέσα στον απορροφητή που είναι διαθέσιμη για τη διάδοση του ηχητικού κύματος. Ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού όγκου των κενών προς τον συνολικό όγκο του υλικού και δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_t} \quad (18)$$

όπου  $V_a$  ο όγκος του αέρα στους πόρους και  $V_t$  ο συνολικός όγκος του υλικού.

Στον υπολογισμό του όγκου του αέρα λαμβάνονται υπόψιν μόνο οι διασυνδεδεμένοι πόροι και όχι οι κλειστές κοιλότητες αέρα [2].

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν κάποιες δευτερεύουσες αλλά εξίσου σημαντικές, ανά περίπτωση, παράμετροι που επηρεάζουν την απορρόφηση του ήχου από πορώδη υλικά.

- Ελίκωση ( $k_s$ )

Η ελίκωση (tortuosity) ορίζεται ως η σχέση ανάμεσα στη διαδρομή που ακολουθεί ο ήχος διαμέσου των πόρων και στο πάχος του πορώδη απορροφητή. Το μέγεθος αυτό στη βιβλιογραφία, είναι γνωστό και σαν συντελεστής σχήματος της δομής, και λαμβάνει υπόψη τόσο το ακανόνιστο σχήμα του πόρου όσο και τη μη ομοιόμορφη κατανομή του ανά μονάδα τμήματος σε όλο το μήκος του πορώδη απορροφητή. Η παράμετρος αυτή περιγράφει το πώς ο προσανατολισμός του πόρου σε σχέση με τη διεύθυνση του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος επηρεάζει την ηχοαπορρόφηση και πιο συγκεκριμένα, όσο πιο πολύπλοκο είναι το ηχητικό μονοπάτι τόσο υψηλότερη είναι η απορρόφηση [3].

- Χαρακτηριστικά μήκη ( $\Lambda, \Lambda'$ )

Πρόκειται για παραμέτρους που αναφέρονται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πόρων. Συνήθως, οι πόροι ποικίλλουν ως προς την πολυπλοκότητα του σχήματός τους και γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητες τουλάχιστον δύο γεωμετρικές παράμετροι για να εκφράσουν την επιρροή αυτού του χαρακτηριστικού των πόρων στην απορρόφηση. Διαφορετικά σχήματα πόρων έχουν διαφορετικές επιφάνειες και κατ' επέκταση έχουν διαφορετικές επιδράσεις θερμότητας και τριβής. Κατά συνέπεια, οι συντελεστές σχήματος των πόρων (Characteristic lengths) προσδιορίζονται κυρίως πειραματικά με κατάλληλη προσαρμογή των ιδιοτήτων όγκου του υλικού στις ακουστικές μερήσεις [8].

Για απλά σχήματα, το χαρακτηριστικό μήκος ( $\Lambda$ ) εκφράζει τη σταθμισμένη – ως προς την ταχύτητα των μορίων του ηχητικού κύματος – αναλογία του όγκου με την επιφάνεια των πόρων και δίνεται:

$$\Lambda = \frac{1}{s} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot n \cdot k_s}{\varepsilon \cdot \sigma}} \quad (19)$$

όπου  $s$  σταθερά που ποικίλλει ανάλογα με το σχήμα των πόρων και  $n$  το ιξώδες του αέρα.

Για μη κυλινδρικούς πόρους και πολύπλοκες εσωτερικές δομές υλικών εισάγεται και ένα δεύτερο χαρακτηριστικό μήκος ( $\Lambda'$ ) το οποίο εκφράζει τον παραπάνω λόγο χωρίς την ισοστάθμιση και δίνεται:

$$\Lambda' = \frac{2 \cdot V_p}{S_p} \quad (20)$$

Από τη στιγμή που οι ιδιότητες της μικροδομής των υλικών είναι γνωστές, είναι εύκολο να υπολογιστούν η χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση ( $Z_c$ ) και ο χαρακτηριστικός κυματάρθμος ( $k_c$ ) μέσω κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά είναι τριών ειδών και ο διαχωρισμός τους οφείλεται στη ποικιλομορφία του συντελεστή σχήματος των πόρων.

- Αναλυτικό μοντέλο

Χρησιμοποιείται στη μελέτη πορώδους απορροφητή με απλή μορφολογία πόρων.

- Μακροσκοπικά εμπειρικό μοντέλο

Εξετάζει μακροσκοπικά τη συμπεριφορά του ηχητικού κύματος αγνοώντας τις λεπτομέρειες της διάδοσης διαμέσου κάθε πόρου. Η χρήση του απαιτεί τη γνώση ενός μικρού αριθμού παραμέτρων της μικροδομής του υλικού.

- Φαινομενολογικά θεωρητικό μοντέλο

Έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται για πολύπλοκες μορφολογίες πόρων με απαραίτητη τη γνώση όλων των χαρακτηριστικών της μικροδομής του υλικού. Για το μοντέλο αυτό, είναι γνωστές μόνο οι ασυμπτωτικές του συμπεριφορές, ενώ η συμπεριφορά μεταξύ των ασυμπτωτικών υποθέτεται και δεν έχει αποδειχθεί μαθηματικά [9].

### 2.2.1.2 Αναλυτικά μοντέλα

Το πρώτο αναλυτικό μοντέλο διατυπώθηκε το 1949 από τους **Zwikker and Kosten** σύμφωνα με το οποίο η χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση και ο χαρακτηριστικός κυματάρθμος δίνονται για απορροφητές με κυλινδρικούς πόρους διατομής κύκλου και οδηγούν σε μία αναλυτική προσέγγιση. Πρόσφατα, έχει χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση ινωδών απορροφητών [2, 9].

$$\rho_{eff} = \frac{\rho_0}{\varepsilon} \cdot 1 / \left[ 1 - \frac{2}{\beta \cdot \sqrt{-j}} \cdot \frac{J_1 \cdot (\beta \cdot \sqrt{-j})}{J_0 \cdot (\beta \cdot \sqrt{-j})} \right] \quad (21)$$

$$k_{eff} = \frac{P_0}{\varepsilon} \cdot \gamma / \left[ 1 + (\gamma - 1) \cdot \frac{2}{\beta \cdot \sqrt{-j}} \cdot \frac{J_1 \cdot (\beta \cdot \sqrt{-j} \cdot P_r)}{J_0 \cdot (\beta \cdot \sqrt{-j} \cdot P_r)} \right] \quad (22)$$

$$Z_c = \sqrt{k_{eff} \cdot \rho_{eff}} \quad (23)$$

$$k_c = \omega \cdot \sqrt{\rho_{eff} / k_{eff}} \quad (24)$$

όπου  $\gamma$  ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας  $\gamma = 1.4$ ,  $P_0$  η ατμοσφαιρική πίεση  $P_0 = 101.32 \text{ Nm}^{-2}$  και  $N_p$  ο αριθμός Prandtl που δίνεται:

$$N_p = \frac{\delta_v^2}{\delta_h} \quad (25)$$

με  $\delta_v$ ,  $\delta_h$  τα μήκη των οριακών στρωμάτων ιξώδους και θερμότητας.

### 2.2.1.3 Μακροσκοπικά εμπειρικά μοντέλα

Το πρώτο εμπειρικό μοντέλο εισήχθη από τους **Delany and Bazley** (1970) και εξ' αιτίας της απλότητάς του, χρησιμοποιήθηκε ευρέως για να περιγράψει τη συμπεριφορά των πορωδών απορροφητών. Το μοντέλο αναπτύχθηκε από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε μεγάλο δείγμα ινωδών υλικών με τιμές πορώδους κοντά στη μονάδα. Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων οδήγησε σε ένα αξιόπιστο μοντέλο που υπολογίζει τη χαρακτηριστική εμπέδηση και τον χαρακτηριστικό κυματάριθμο των απορροφητικών υλικών σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων ως εξής:

$$Z_c = \rho_0 \cdot c_0 \cdot (1 + 0.0571 \cdot X^{-0.754} - j \cdot 0.087 \cdot X^{-0.732}) \quad (26)$$

Και

$$k_c = \frac{\omega}{c_0} \cdot ((1 + 0.0978 \cdot X^{-0.700} - j \cdot 0.189 \cdot X^{-0.595}) \quad (27)$$

όπου  $\rho_0$ ,  $c_0$  η πυκνότητα και η ταχύτητα του ήχου στον αέρα αντίστοιχα,  $\omega$  η γωνιακή συχνότητα.

$$X = \frac{f \cdot \rho_0}{\sigma} \quad (28)$$

όπου  $f$  η συχνότητα και  $\sigma$  η αντίσταση ροής του ινώδους υλικού.

Η εφαρμογή του μοντέλου των Delany and Bazley υπόκειται σε περιορισμούς προκειμένου να επιτυγχάνει υψηλή ακρίβεια.

- Η τιμή του πορώδους κυμαίνεται γύρω στη μονάδα, γεγονός που εξασφαλίζει λεπτομερή σχεδιασμό των ινωδών απορροφητικών υλικών.
- $0.01 < X < 1.0$ , που σημαίνει πως το μαθηματικό μοντέλο χρησιμοποιείται μόνο για συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων
- Τα όρια της αντίστασης της ροής είναι:  $1.000 < \sigma < 50.000$  (rayl/m)

Το παραπάνω μοντέλο αν και προσεγγίζει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των ινωδών απορροφητών, υστερεί στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων για χαμηλές συχνότητες, καθώς αυτές ξεφεύγουν από την περιοχή εφαρμογής του. Παρά το γεγονός πως η απορρόφηση σε αυτήν την περιοχή συχνοτήτων είναι χαμηλή, πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να αναπτύξουν βελτιωμένα, ως προς αυτήν την παράμετρο, μαθηματικά μοντέλα [8].

Ένα ελαφρώς διαφοροποιημένο μοντέλο δόθηκε το 1976 από τους **Mechel and Grundmann** σύμφωνα με το οποίο, οι μαθηματικές εξισώσεις είναι βασισμένες σε αναλυτικά μοντέλα

όσον αφορά τη περιοχή χαμηλών συχνοτήτων, ενώ στις υψηλότερες συχνότητες σε προσαρμογή καμπυλών έπειτα από διαδικασία μετρήσεων. Το πορώδες αποτελεί παράμετρο και αυτού του μοντέλου με τιμή γύρω στο 0.95. Οι σχέσεις που δίνουν τα αποτελέσματα σύμφωνα με αυτό το μοντέλο είναι:

$$-j \cdot \frac{k}{k_0} = X^{-1} \cdot \beta_{-1} + X^{\frac{-1}{2}} \cdot \beta_{\frac{-1}{2}} + X^{\frac{1}{2}} \cdot \beta_{\frac{1}{2}} + X_1 + X^{\frac{3}{2}} \cdot \beta_{\frac{3}{2}} \quad (29)$$

$$Z_c = X^{-1} \cdot \beta_{-1} + X^{\frac{-1}{2}} \cdot \beta_{\frac{-1}{2}} + X^{\frac{1}{2}} \cdot \beta_{\frac{1}{2}} + X_1 + X^{\frac{3}{2}} \cdot \beta_{\frac{3}{2}} \quad (30)$$

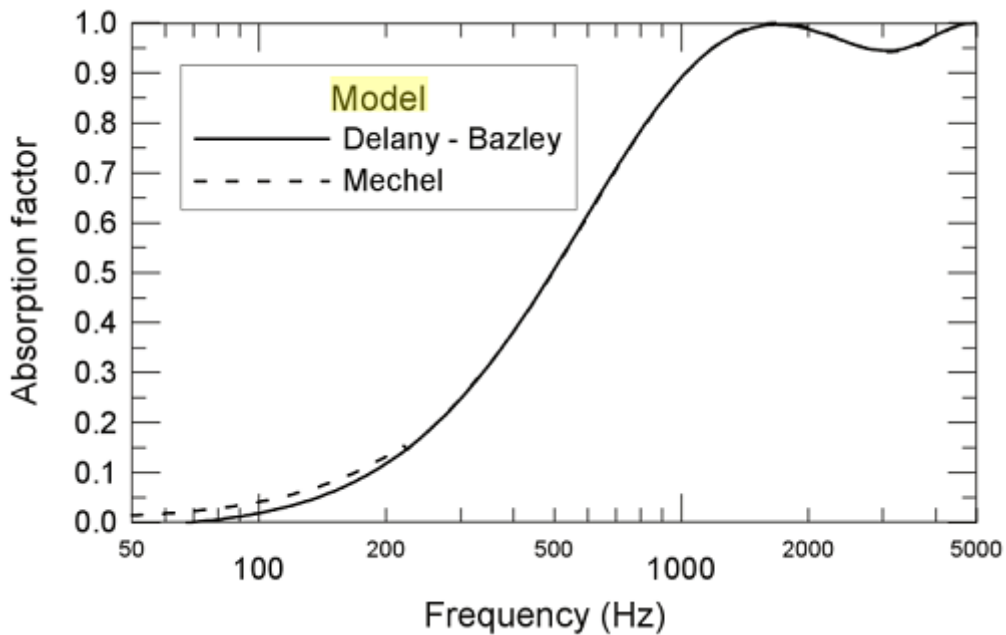
όπου οι συντελεστές β διαφοροποιούνται ανάλογα με το υλικό.

Η περιοχή εφαρμογής αυτής της μεθόδου δίνεται:

$$0.003 < X < 0.4 \quad (31)$$

Οι δύο μέθοδοι υπολογισμού της απορρόφησης που έχουν αναλυθεί παραπάνω διαφοροποιούνται μόνο στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων, με τη δεύτερη μέθοδο να δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα (

Σχήμα 2.4) [5, 8].



Σχήμα 2.4 Σύγκριση μοντέλων ως προς το συντελεστή απορρόφησης για κάθετη πρόσπτωση ήχου σε υλικό πακτωμένο πάχους 50 mm

Είκοσι χρόνια μετά την εμφάνιση του πρώτου εμπειρικού μοντέλου, ο **Miki** (1990) αναπτύσσει ένα νέο μοντέλο που προσφέρει αποτελέσματα σε διευρυμένες περιοχές συχνότητας. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του, στην περίπτωση που ο ινώδης απορροφητής αποτελείται από πολλαπλά στρώματα υλικού, το πραγματικό μέρος της ακουστικής εμπέδησης που υπολογίζεται με βάση το μοντέλο των Delany-Bazley λαμβάνει αρνητικές τιμές σε χαμηλές συχνότητες, υποδεικνύοντας μη φυσικά αποτελέσματα. Προκειμένου να

επεκτείνει τα ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα για την περίπτωση πολυστρωματικών ινωδών υλικών προτίνει τις ακόλουθες μαθηματικές σχέσεις [9].

$$Z_c = \rho_0 \cdot c_0 \cdot [1 + 5.50 \cdot \left(10^3 \cdot \frac{f}{\sigma}\right)^{-0.632} - j \cdot 8.43 \cdot \left(10^3 \cdot \frac{f}{\sigma}\right)^{-0.632}] \quad (32)$$

$$k = \frac{\omega}{c_0} \cdot [1 + 7.81 \cdot \left(10^3 \cdot \frac{f}{\sigma}\right)^{-0.618} - j \cdot 11.41 \cdot \left(10^3 \cdot \frac{f}{\sigma}\right)^{-0.618}] \quad (33)$$

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν καλύπτουν μεγαλύτερη περιοχή συχνοτήτων και πιο συγκεκριμένα

$$\frac{f}{\sigma} < 0.01 \quad (34)$$

Πολλοί ακόμα ερευνητές εισήγαγαν νέα εμπειρικά μοντέλα με στόχο να διευρύνουν είτε την ισχύ των αποτελεσμάτων στις περιοχές συχνοτήτων, είτε την εφαρμοσιμότητα των μοντέλων σε ποικίλλα υλικά. Παρ'όλα αυτά, το πρόβλημα με τα εμπειρικά μοντέλα εντοπίζεται στο ότι δεν δίνουν επαρκείς πληροφορίες σχετικά με το πώς η μικροσκοπική συμπεριφορά των υλικών επηρεάζει την απορρόφηση του ήχου. Αυτό σημαίνει πως η εφαρμογή τους είναι αδύνατη σε ορισμένα πεδία, όπως τη βελτίωση στο σχεδιασμό και στην κατασκευή των πορωδών απορροφητών. Το κενό που δημιουργείται από τη χρήση των εμπειρικών μοντέλων έρχονται να καλύψουν τα φαινομενολογικά θεωρητικά μοντέλα, που λαμβάνουν υπόψιν τους όλες τις ιδιότητες της μικροδομής των απορροφητών.

#### 2.2.1.4 Φαινομενολογικά θεωρητικά μοντέλα

Πολλοί είναι οι ερευνητές που έχουν εμπλακεί στην ανάπτυξη θεωρητικών μοντέλων ανάμεσά τους ο **Attenborough** και ο **Wilson**, οι οποίοι εστίασαν στην προσομοίωση της συμπεριφοράς απορροφητών με πόρους τυχαίου σχήματος. Το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο μοντέλο αυτής της κατηγορίας που εμφανίζεται μεταγενέστερα, το 1991 είναι αυτό των **Johnson-Champoux-Allard (JCA)** το οποίο απαιτεί την γνώση των πέντε βασικών ιδιοτήτων μικροδομής του υλικού δηλαδή, αντίσταση ροής ( $\sigma$ ), πορώδες ( $\epsilon$ ), ελίκωση ( $k_s$ ) και χαρακτηριστικά μήκη ( $\Lambda, \Lambda'$ ), για την αναπαράσταση υλικών με μη ομοιόμορφα σχήματα πόρων. Οι ιδιότητες όγκου των υλικών αυτών δίνονται:

$$\rho_{eff} = k_s \cdot \rho_0 \cdot \left[1 + \frac{\sigma \cdot \epsilon}{j \cdot \omega \cdot \rho_0 \cdot k_s} \cdot \sqrt{1 + \frac{4 \cdot j \cdot k_s^2 \cdot n \cdot \rho_0 \cdot \omega}{\sigma^2 \cdot \Lambda^2 \cdot \epsilon^2}}\right] \quad (35)$$

$$k_{eff} = \frac{\gamma \cdot P_0}{\gamma - (\gamma - 1) / \left(1 + \frac{8 \cdot n}{j \cdot \Lambda'^2 \cdot N_p \cdot \omega \cdot \rho} \cdot \sqrt{1 + \frac{j \cdot \Lambda'^2 \cdot N_p \cdot \omega \cdot \rho}{16 \cdot n}}\right)} \quad (36)$$

Ο υπολογισμός των ζητούμενων ποσοτήτων γίνεται και πάλι μέσω των σχέσεων που ισχύουν και παραπάνω [8].

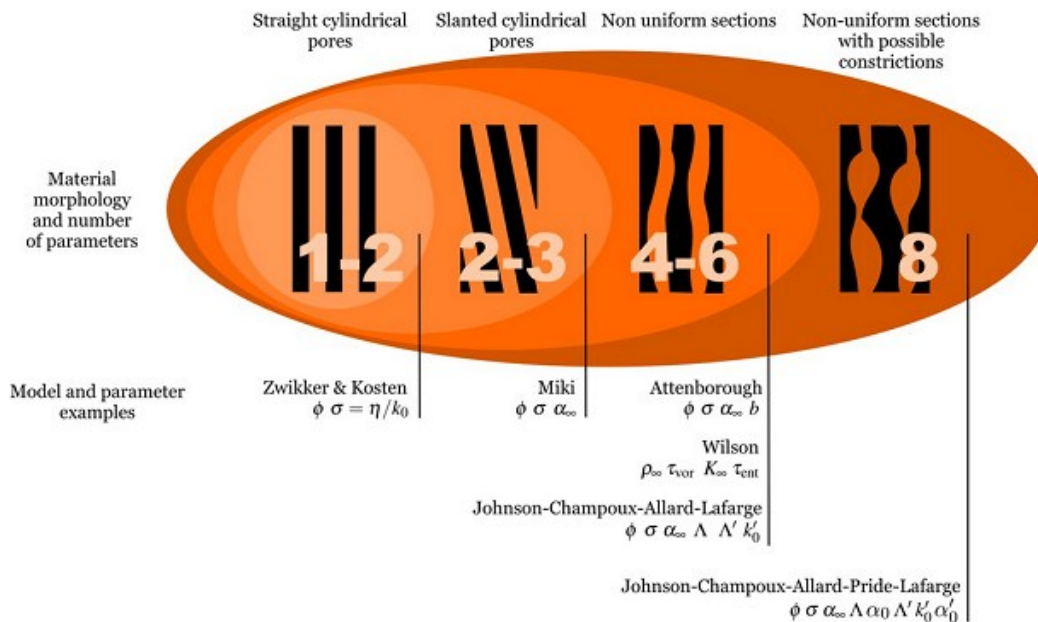


$$Z_c = \sqrt{k_{eff} \cdot \rho_{eff}} \quad (37)$$

$$Z_c = \sqrt{k_{eff} \cdot \rho_{eff}} \quad (38)$$

Έχουν διατυπωθεί βελτιωμένες προτάσεις στηριζόμενες στο μοντέλο JCA από τους **Pride-Lafarge** γνωστές ως JCAL και JCAPL που λαμβάνουν υπόψιν τους την επιρροή της θερμότητας, εισάγοντας νέες παραμέτρους μικροδομής όπως η στατική θερμική διαπερατότητα ( $k'_0$ ), και ως εκ τούτου προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα στις χαμηλές συχνότητες όπου παρατηρούνται και οι αποκλίσεις. Παρ' όλα αυτά η χρήση τους είναι περιορισμένη λόγω των αυξημένων απαιτήσεων στη γνώση των παραμέτρων μικροδομής των υλικών [9].

Για πλήρη κατανόηση της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των μοντέλων διάδοσης που αναλύθηκαν, παρατίθεται μία συγκεντρωτική αναπαράστασή τους (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Σχηματική παράσταση των χαρακτηριστικών των μοντέλων διάδοσης σε έναν πορώδη απορροφητή

### 2.2.2 Διάτρητες επιφάνειες

Μία διάτρητη επιφάνεια διαιρείται σε επιμέρους δομικές μονάδες οι οποίες επαναλαμβάνονται κατά τις δύο κατευθύνσεις. Η κάθε δομική μονάδα συμπεριφέρεται ανεξάρτητα από τις γειτονικές της αλλά ταυτόχρονα δέχεται και επιρροές από αυτές. Πιο συγκεκριμένα, η κάθε δομική μονάδα αναπαριστάται από ένα μηχανικό ανάλογο, το σύστημα ελατηρίου-μάζας. Σαν μάζα νοείται ο αέρας που βρίσκεται στο εσωτερικό των διατρήσεων ενώ το ελατήριο μοντελοποιείται ως ο όγκος του αέρα της κοιλότητας που βρίσκεται πίσω από την διάτρητη επιφάνεια. Με κατάλληλο προσδιορισμό των δύο αυτών παραμέτρων, είναι δυνατός ο έλεγχος της συχνότητας συντονισμού και κατ'επέκταση του μέγιστου συντελεστή απορρόφησης που επιτυγχάνει η διάτρητη επιφάνεια.

Η μάζα του αέρα ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται ως:

$$m = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot t'}{\pi \cdot a^2} \quad (39)$$

όπου  $D$  η επαναλαμβανόμενη απόσταση τοποθέτησης της δομικής μονάδας,  $t'$  το μήκος της μάζας αέρα και  $a$  η ακτίνα των οπών.

Το μήκος του αέρα που βρίσκεται στο εσωτερικό των οπών δεν ισούται με το πάχος της διάτρησης, εξ' αιτίας της αλληλεπίδρασης που παρατηρείται μεταξύ των γειτονικών δομικών μονάδων. Ειδικότερα, ο αέρας που βρίσκεται στο εσωτερικό κάθε οπής, δονείται μέσω της επίδρασης σ' αυτόν του αέρα που τον περιβάλλει. Λαμβάνεται επιπλέον υπόψη, η επίδραση της αντίστασης ακτινοβολίας, στην οποία περιλαμβάνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των γειτονικών δονούμενων μαζών αέρα. Έτσι, η παραπάνω σχέση τροποποιείται ως εξής:

$$m = \frac{\rho \cdot D^2}{\pi \cdot a^2} \cdot \left[ t + 2 \cdot \delta \cdot a + \sqrt{\frac{8 \cdot \nu}{\omega} \cdot \left( 1 + \frac{t}{2 \cdot a} \right)} \right] \quad (40)$$

όπου  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα του αέρα,  $t$  το πάχος της διάτρητης επιφάνειας και  $\delta$  ο συντελεστής διόρθωσης, που οφείλεται στην επίδραση της αντίστασης ακτινοβολίας και η τιμή του κυμαίνεται ανάλογα με το ποσοστό του πορώδους.

Για τον προσδιορισμό της ειδικής ακουστικής εμπέδησης και του συντελεστή απορρόφησης μίας διάτρητης επιφάνειας, είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση των απωλειών που οφείλονται σε φαινόμενα τριβής και συντονισμού, οι οποίες καθορίζονται από τον όρο της αντίστασης:

$$r_m = \frac{\rho \cdot D^2}{\pi \cdot a^2} \cdot \sqrt{8 \cdot \nu \cdot \omega} \cdot \left( 1 + \frac{t}{2 \cdot a} \right) \quad (41)$$

Η ειδική ακουστική εμπέδηση μίας διάτρητης επιφάνειας διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψιν την ακουστική αντίσταση και την μάζα ως εξής [8]:

$$Z_c = r_m + j \cdot \omega \cdot m \quad (42)$$

Όπως είναι προφανές, μία διάτρητη επιφάνεια ανάλογα με τη διατομή των οπών της μοντελοποιείται σύμφωνα με ποικίλλα μαθηματικά μοντέλα, μεταξύ των οποίων το πιο απλό είναι το αναλυτικό μοντέλο των Zwikker and Kosten για διατρήσεις κυκλικής διατομής [8].

### 2.2.3 Μικροδιάτρητες επιφάνειες

Η βασική θεωρία των απορροφητών μικροδιάτρητων επιφανειών προτάθηκε αρχικά από τον Maa (1975-1998). Η κύρια ιδέα του ήταν η θεώρηση της μικροδιάτρητης επιφάνειας σαν μία παράλληλη διασύνδεση διατρήσεων. Οι διατρήσεις αυτές μοντελοποιήθηκαν σαν μικροί και στενοί σωλήνες οι οποίοι τοποθετούνται σε αποστάσεις μεγάλες συγκριτικά με την διάμετρό τους, αλλά μικρές σχετικά με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος.

Η ροή του ήχου στο εσωτερικό ενός στενού κυλίνδρου διατυπώθηκε από τον **Lord Rayleigh**. Η εξίσωση της εναέριας κίνησης στο εσωτερικό ενός τέτοιου σωλήνα υποθέτωντας

ημιτονοειδείς συναρτήσεις του χρόνου και μηδενική ταχύτητα στα τοιχώματα των διατρήσεων δίνεται [10]:

$$Z_1 = \frac{\Delta p}{u} = j \cdot \omega \cdot \rho \cdot t \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot J_1 \cdot (k \cdot \sqrt{-j})}{k \cdot \sqrt{-j} \cdot J_0 \cdot (k \cdot \sqrt{-j})} \right]^{-1} \quad (43)$$

όπου  $\Delta p$  η διαφορά πίεσης στα δύο άκρα του σωλήνα,  $u$  η ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του σωλήνα,  $t$  το πάχος του σωλήνα,  $J_1, J_0$  οι συναρτήσεις Bessel πρώτου είδους και πρώτης και μηδενικής τάξης αντίστοιχα και  $k$  η σταθερά διάτρησης να δίνεται:

$$k = \frac{d}{2} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{\nu}} \quad (44)$$

Μία απλούστερη μορφή για μικρούς κυλίνδρους συγκρινόμενους με το μήκος κύματος του ήχου, δόθηκε από τον **Crandall** ο οποίος πρότινε δύο προσεγγιστικές σχέσεις για μικρές ( $k < 1$ ) και μεγάλες ( $k > 10$ ) τιμές της σταθεράς διάτρησης (10).

- $k < 1$

$$Z_1 = \frac{4}{3} \cdot j \cdot \omega \cdot \rho \cdot t + \frac{32 \cdot \rho \cdot \mu}{d^2} \quad (45)$$

- $k > 10$

$$Z_1 = j \cdot \omega \cdot \rho \cdot t + \frac{4 \cdot \rho \cdot \mu}{d} \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \mu}} \cdot (1 + j) \quad (46)$$

Ο Maa, παρατηρώντας την ασυνέχεια μεταξύ των δύο παραπάνω περιπτώσεων και λαμβάνοντας υπόψιν του τη σημαντικότητα των ενδιάμεσων τιμών του συντελεστή διάτρησης για την συμπεριφορά των μικροδιάτρητων επιφανειών, ανέπτυξε μία προσεγγιστική λύση που καλύπτει όλο το εύρος της σταθεράς διάτρησης.

$$Z_1 = \frac{32 \cdot n \cdot t}{d^2} \cdot \left( 1 + \frac{k^2}{32} \right)^{\frac{1}{2}} + j \cdot \omega \cdot \rho \cdot t \cdot \left( 1 + \left( 3^2 + \frac{k^2}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right) \quad (47)$$

Κατ'αντιστοιχία με τις διάτρητες επιφάνειες, μία πλήρης μαθηματική μοντελοποίηση των μικροδιάτρητων επιφανειών θα πρέπει να περιλαμβάνει και τον όρο που αντιπροσωπεύει την αλληλεπίδραση μεταξύ των οπών. Επομένως, η τελική σχέση που δίνει την ακουστική εμπέδηση μίας μικροδιάτρητης επιφάνειας δίνεται [11]:

$$Z_1 = \frac{32 \cdot n \cdot t}{d^2} \cdot \left( \left( 1 + \frac{k^2}{32} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{\sqrt{2}}{32} \cdot k \cdot \frac{d}{t} \right) + j \cdot \omega \cdot \rho \cdot t \cdot \left( 1 + \left( 3^2 + \frac{k^2}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0.85 \cdot \frac{d}{t} \right) \quad (48)$$

Τέλος, η ειδική ακουστική εμπέδηση για μικροδιατρήσεις δίνεται ως:

$$Z_c = \frac{Z_1}{\varepsilon \cdot \rho_0 \cdot c} \quad (49)$$

### 2.3 Προσδιορισμός βασικών ακουστικών παραμέτρων

Με χρήση των κατάλληλων μαθηματικών δομών είναι δυνατή η μοντελοποίηση κάθε ακουστικού συστήματος. Η γνώση της ειδικής ακουστικής εμπέδησης και του χαρακτηριστικού κυματάριθμου, είναι πληροφορίες που καθιστούν δυνατό τον υπολογισμό της επιφανειακής ακουστικής εμπέδησης και του συντελεστή απορρόφησης για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ακουστικών απορροφητών. Η διαδικασία αυτού του υπολογισμού διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος των ηχητικών απορροφητών [8].

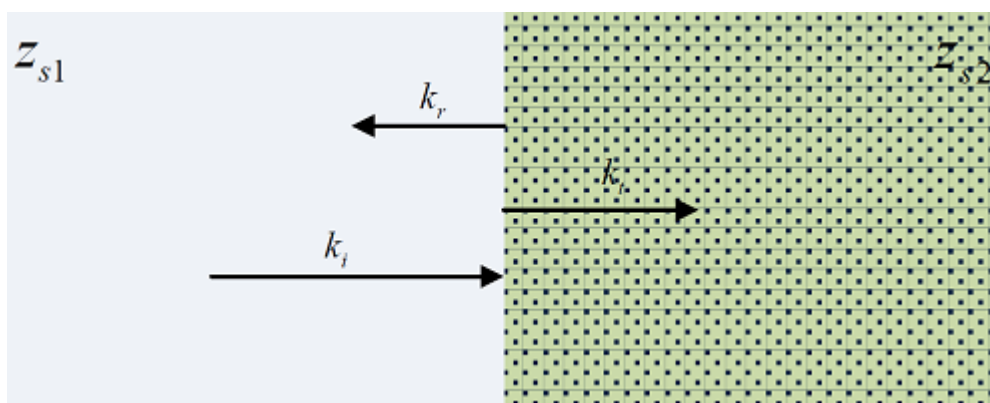
#### 2.3.1 Πορώδεις απορροφητές

Στη περίπτωση ακουστικού συστήματος που αποτελείται από έναν πορώδη απορροφητή πάχους  $d$  τοποθετημένο σε άκαμπτη επιφάνεια και εκτεθειμένο σε κάθετο ρεύμα αέρα, όπως φαίνεται στο σχήμα Σχήμα 2.6, η επιφανειακή εμπέδηση δίνεται ως εξής [2]:

$$Z_n = -j \cdot Z_c \cdot \cot(k_c \cdot d) \quad (50)$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή απορρόφησης είναι απαραίτητος ο ορισμός του συντελεστή ανάκλασης πίεσης  $R$  που ορίζεται ως ο λόγος του ανακλώμενου προς το προσπίπτον πλάτος πίεσης.

$$R = \frac{p_{reflected}}{p_{incident}} \quad (51)$$



Σχήμα 2.6 Διάδοση ηχητικού κύματος κάθετης πρόσπτωσης σε πορώδη απορροφητή

Στην περίπτωση του ακουστικού συστήματος που εξετάζεται για κάθετη πρόσπτωση ηχητικού κύματος, ο συντελεστής ανάκλασης πίεσης δίνεται [2]:

$$R = \frac{\left(\frac{Z_n}{\rho_0 \cdot c_0} - 1\right)}{\left(\frac{Z_n}{\rho_0 \cdot c_0} + 1\right)} \quad (52)$$

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης ενέργειας ισχύει:

$$W_i = W_r + W_t \quad (53)$$

αφού η απορροφούμενη ενέργεια ταυτίζεται με την μεταδιδόμενη, από τη στιγμή που έχει θεωρηθεί μηδενική απορρόφηση στη διεπιφάνεια.

Έτσι, προκύπτει κατ'αντιστοιχία και για τους συντελεστές:

$$W_i = W_r + W_t \quad (54)$$

και αφού  $\alpha_t = \alpha$

$$\alpha = 1 - \alpha_r \quad (55)$$

Τελικά, ο συντελεστής απορρόφησης δίνεται ως [2]:

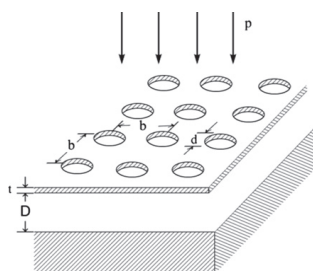
$$\alpha = 1 - |R^2| \quad (56)$$

αφού ισχύει:

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{\frac{p_r^2}{Z_{s1}}}{\frac{p_i^2}{Z_{s2}}} = \frac{p_r^2}{p_i^2} = R^2 \quad (57)$$

### 2.3.2 Διάτρητες επιφάνειες

Στην περίπτωση ακουστικού συστήματος που αποτελείται από μία διάτρητη ή μικροδιάτρητη επιφάνεια ακολουθούμενη από μία κοιλότητα αέρα πάχους  $D$  και έπειτα μία άκαμπτη βάση (Σχήμα 2.7), ο υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης για κάθετη πρόσπτωση ήχου, απαιτεί τη γνώση της ακουστικής αντίστασης  $r_m$  και της αντίστασης μάζας  $x_m$  της επιφάνειας, καθώς και την ακουστική αντίσταση της κοιλότητας [11].



Σχήμα 2.7 Σχηματική αναπαράσταση του ακουστικού συστήματος που μελετάται

Προκύπτει λοιπόν:

$$\alpha = \frac{4 \cdot r}{(1 + r^2) + \left(\omega \cdot m - \cot\left(\omega \cdot \frac{D}{c}\right)\right)^2} \quad (58)$$

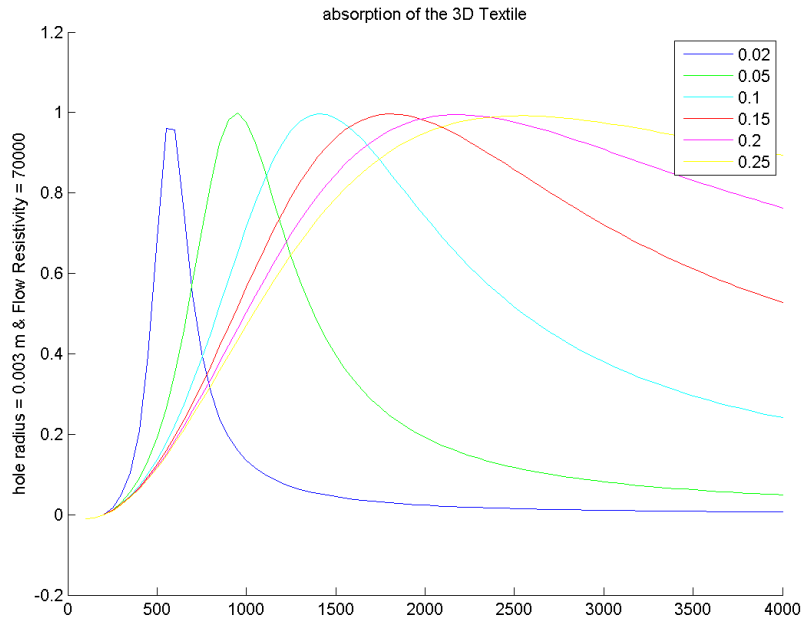
## 2.4 Ακουστικό σύστημα προς διερεύνηση

Στην **παρούσα μελέτη** θα εξεταστεί η συμπεριφορά ηχητικών κυμάτων, που διαδίδονται μέσα σε αέριο μέσο όπως είναι ο αέρας, και έπειτα προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια στερεών σωμάτων με απορροφητικές ιδιότητες. Πηγή εκπομπής θεωρείται σημειακή πηγή τοποθετημένη σε πολύ μεγάλη (θεωρητικά άπειρη) απόσταση από το σημείο πρόσπτωσης. Οι απορροφητές που θα διερευνηθούν ως προς τα απορροφητικά τους χαρακτηριστικά στη μελέτη αυτή είναι δύο ειδών. Ο πρώτος αποτελείται από μία διάτρητη επιφάνεια που υποστηρίζεται από έναν πορώδη απορροφητή και ολόκληρη η δομή προσαρμόζεται πάνω σε ένα άκαμπτο τοίχωμα. Ενώ η δεύτερη δομή προς εξέταση, είναι πανομοιότυπη με τη πρώτη με τη μόνη διαφορά πως η πάνω επιφάνεια αντικαθίσταται από μία μικροδιάτρητη επιφάνεια.

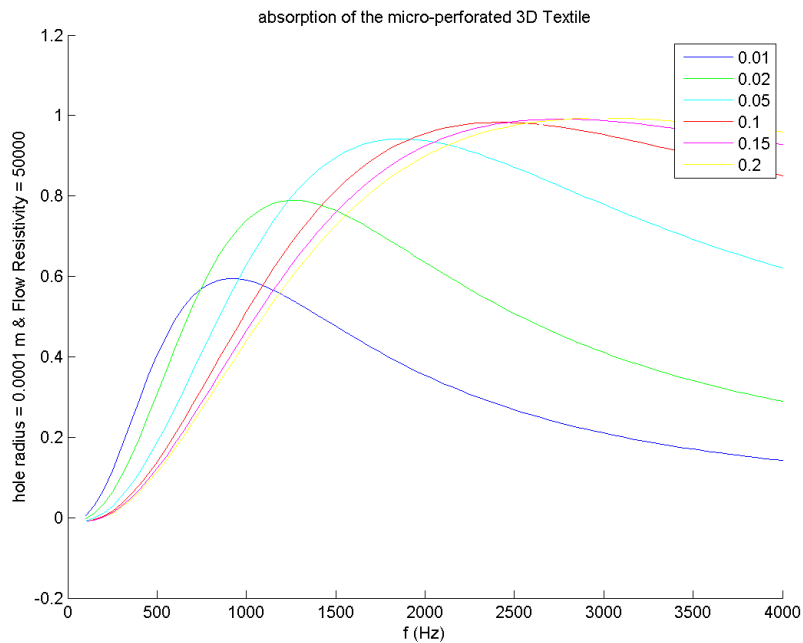
Σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν παραπάνω για τη μαθηματική μοντελοποίηση των εκάστοτε απορροφητών, θα παρατεθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις δύο δομές που εξετάζονται, έπειτα από εφαρμογή των κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, οι διάτρητες και μικροδιάτρητες επιφάνειες που μοντελοποιούνται, ποικίλλουν ως προς το ποσοστό διάτρησης με κατάλληλο έλεγχο της ακτίνας και του αριθμού των οπών. Ο πορώδης απορροφητής μοντελοποιείται σύμφωνα με τη θεωρία που ανέπτυξαν οι Delany and Bazley, και εξετάζεται η συμπεριφορά του για διαφορετικές τιμές αντίστασης ροής.

Η διάτρητη ή μικροδιάτρητη επιφάνεια πάχους 1 mm, εξετάζεται για τιμές ακτίνας οπών [0.0005, 0.001, 0.0015, 0.002, 0.003] στη περίπτωση διάτρησης και [0.0001, 0.0002, 0.0005, 0.001, 0.002] στη περίπτωση μικροδιάτρησης, και ποσοστού διάτρησης [0.02, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25]. Ο πορώδης απορροφητής πάχους 17 mm εξετάζεται για τιμές αντίστασης ροής [20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000]. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά τη μαθηματική μοντελοποίηση που περιγράφηκε.

Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται ο συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας για διάτρητη επιφάνεια ακτίνας 3 mm και πορώδη απορροφητή αντίστασης ροής 70000 rayl/m. Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζεται ο συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας για διάτρητη επιφάνεια ακτίνας 0.1 mm και πορώδη απορροφητή αντίστασης ροής 50000 rayl/m.



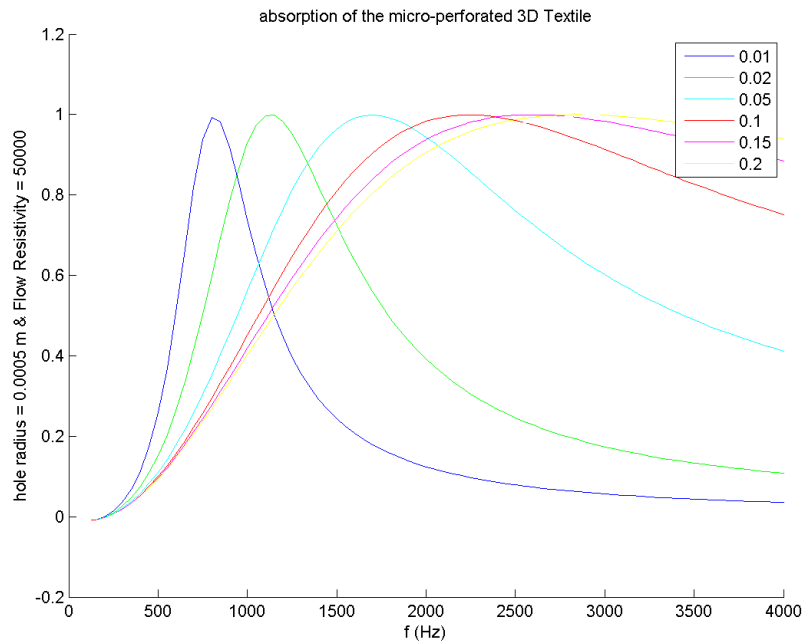
Σχήμα 2.8 Συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει συχνότητας για διάτρητη επιφάνεια ακτίνας 3 mm και πορώδη απορροφητή αντίστασης ροής 70000 rayl/m



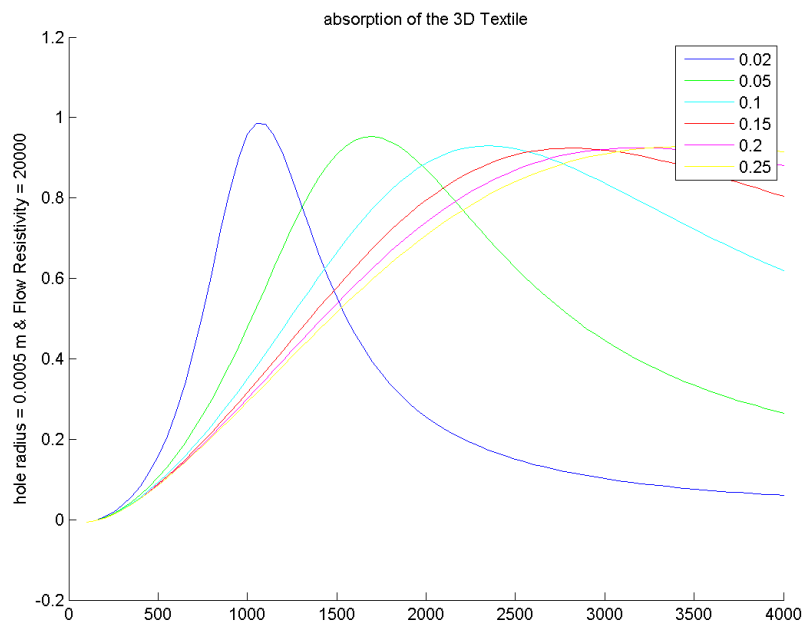
Σχήμα 2.9 Συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει συχνότητας για διάτρητη επιφάνεια ακτίνας 0.1 mm και πορώδη απορροφητή αντίστασης ροής 50000 rayl/m

Στο Σχήμα 2.10 φαίνεται ο συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας για διάτρητη επιφάνεια ακτίνας 0.5 mm και πορώδη απορροφητή αντίστασης ροής 50000

rayl/m, ενώ στο Σχήμα 2.11 ο συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας για την ίδια διάτρητη επιφάνεια και πορώδη απορροφητή αντίστασης ροής 20000 rayl/m.



**Σχήμα 2.10** Συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει συχνότητας για διάτρητη επιφάνεια ακτίνας 0.5 mm και πορώδη απορροφητή αντίστασης ροής 50000 rayl/m



**Σχήμα 2.11** Συντελεστής απορρόφησης συναρτήσει συχνότητας για διάτρητη επιφάνεια ακτίνας 0.5 mm και πορώδη απορροφητή αντίστασης ροής 20000 rayl/m



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ**



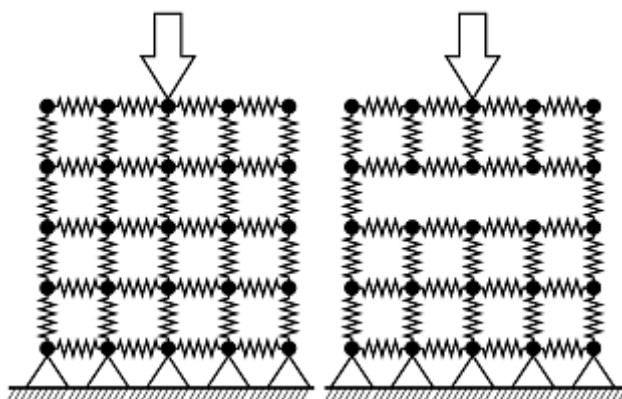
### 3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

#### 3.1.1 Βασικές έννοιες της μεθόδου

Ο σχεδιασμός ενός βιομηχανικού προϊόντος δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί χωρίς το πρωταρχικό στάδιο της μοντελοποίησης. Στο στάδιο αυτό επιλέγονται οι ιδιότητες της πρώτης ύλης και τα δομικά χαρακτηριστικά του υπό κατασκευή προϊόντος, σύμφωνα με την επιθυμητή συμπεριφορά του στην εκάστοτε εφαρμογή. Όσον αφορά τον τομέα της μοντελοποίησης, έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στα σχεδιαστικά (computer aided design - CAD) και υπολογιστικά (computer aided engineering - CAE) λογισμικά, και κατ'επέκταση στη διαδικασία σχεδιασμού βιομηχανικών προϊόντων αφού με χρήση αυτών, γίνεται εφικτή η προσομοίωση και η μελέτη της συμπεριφοράς του προϊόντος έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Μεταξύ των πλέον διαδεδομένων μεθόδων ανάλυσης συμπεριλαμβάνεται η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method - FEM), που επιτρέπει τη στατική και δυναμική μηχανική ανάλυση, τη ρευστομηχανική και αεροδυναμική ανάλυση, τη θερμική ανάλυση, την ακουστική ανάλυση, την κατανομή μαγνητικού πεδίου και άλλων πεδίων.

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε για να διευκολύνει τον μηχανικό στον υπολογισμό σύνθετων προβλημάτων περίπλοκων γεωμετριών, αφού συχνά η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και οι γεωμετρικές δομές είναι απλές. Πρόκειται για μία εξέλιξη των μητρικών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Πιο συγκεκριμένα, η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, είναι, όπως και στη μητρική ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η προσομοίωση πραγματοποιείται μέσω της μελέτης της συμπεριφοράς ενός πεπερασμένου αριθμού διακριτών μεταβλητών, τις μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και τις παραγώγους τους. Το συνολικό πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους [12].

Ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από διασυνδεδεμένα στοιχεία και κόμβους. Μία απλή αναλογία που περιγράφει ιδανικά το μοντέλο αποτελείται από ελατήρια και μάζες (Σχήμα 3.1). Τα ελατήρια αντιστοιχούν στα επιμέρους στοιχεία ενώ οι μάζες στους κόμβους του μοντέλου. Εφαρμόζονται διαφόρων ειδών διεγέρσεις οι οποίες απεικονίζονται ως δυνάμεις στο ισοδύναμο σύστημα, ενώ οι περιορισμοί που επιβάλλονται σ' αυτό αντιστοιχούν στις οριακές συνθήκες του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Όπως είναι κατανοητό, ο τρόπος διασύνδεσης των ελατηρίων, η ύπαρξη ή μη όλων των μαζών, το σημείο εφαρμογής της διέγερσης και οι περιορισμοί που τίθενται, επιφέρουν μεταβολές στη συμπεριφορά της κατασκευής. Γίνεται, λοιπόν, με αυτόν τον τρόπο φανερό, πώς ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να προσομοιώσει οποιοδήποτε φυσικό πρόβλημα [13].

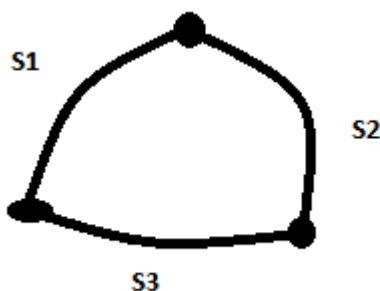


Σχήμα 3.1 Ισοδύναμο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

### 3.1.2 Πεπερασμένα στοιχεία στην ακουστική

Η μελέτη της διάδοσης του ήχου διαμέσου ενός όγκου απαιτεί τη γνώση της ακουστικής συμπεριφοράς του ρευστού στο εσωτερικό κοιλοτήτων που περιέχονται στον όγκο. Η πολυπλοκότητα του σχήματος των κοιλοτήτων καθιστά αναγκαία την υπολογιστική αντιμετώπιση του προβλήματος, για το λόγο αυτό είναι ιδανική η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Θεωρείται μία κοιλότητα όγκου  $V$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 που ακολουθεί, της οποίας η οριακή επιφάνεια  $S$  αποτελείται από τμήματα επιφανειών με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Το πρώτο τμήμα επιφάνειας  $S_1$  θεωρείται αδιαπέραστη από τον ήχο, το δεύτερο τμήμα  $S_2$  έχει ταχύτητα  $v_p$  και το τρίτο τμήμα  $S_3$  αντιπροσωπεύει μία πλήρως απορροφητική επιφάνεια.



Σχήμα 3.2 Κοιλότητα όγκου  $V$  με τμήματα επιφανειών διαφορετικών οριακών συνθηκών

Η ομογενής εξίσωση κύματος στον τριδιάστατο χώρο δίνεται:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (59)$$

η οποία με την υπόθεση ότι η διακύμανση της ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό της κοιλότητας είναι αρμονική, γίνεται:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (60)$$

και είναι γνωστή ως εξίσωση Helmholtz.

Προκειμένου να προκύψουν διαφορετικές διατυπώσεις της κυματικής εξίσωσης αναλόγως του προβλήματος που εξετάζεται, θεωρείται σκόπιμο η παραπάνω εξίσωση να πολλαπλασιαστεί με μία συνάρτηση βάρους, η οποία προσδιορίζει το προς εξέταση περιβάλλον, και να ολοκληρωθεί σε όλο τον όγκο της κοιλότητας που μελετάται. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η σταθμισμένη ολοκληρωτική μορφή

$$\int \left( w(x, y, z) \cdot \nabla^2 p + \frac{\omega^2}{c^2} \cdot p \cdot w(x, y, z) \right) \cdot dV = 0 \quad (61)$$

η οποία τροποποιείται μετά την εφαρμογή του θεωρήματος Green-Gauss ως εξής:

$$\int w \cdot \nabla p \cdot \vec{n} \cdot dS - \int \nabla w \cdot \nabla p \cdot dV + \int \frac{\omega^2}{c^2} \cdot p \cdot w \cdot dV = 0 \quad (62)$$

Θεωρώντας την συνάρτηση βάρους σαν μία μεταβολή στην ακουστική πίεση, η εξίσωση κύματος καταλήγει να έχει τη μορφή:

$$\int \delta p \cdot \nabla p \cdot \vec{n} \cdot dS - \int \nabla(\delta p) \cdot \nabla p \cdot dV + \int \frac{\omega^2}{c^2} \cdot p \cdot \delta p \cdot dV = 0 \quad (63)$$

Στο σημείο αυτό είναι εύκολη η εφαρμογή της κυματικής εξίσωσης σε κάθε μία από τις προς εξέταση περιπτώσεις οριακών επιφανειών που έχουν αναφερθεί νωρίτερα, εισάγοντας τις οριακές συνθήκες που ισχύουν ανά περίπτωση.

- Επιφάνεια  $S_1$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (64)$$

- Επιφάνεια  $S_2$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_0 \cdot j \cdot \omega \cdot v_p \quad (65)$$

- Επιφάνεια  $S_3$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_0 \cdot j \cdot \omega \cdot \frac{p}{z_a} \quad (66)$$

Το ολοκλήρωμα της συνολικής επιφάνειας που αντιπροσωπεύει ο πρώτος όρος της κυματικής εξίσωσης, διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} & \int \delta p \cdot \nabla p \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (67) \\ & = \delta \left( \int p \cdot (-\rho_0 \cdot j \cdot \omega \cdot v_p) \cdot dS \right) \\ & + \delta \left( \int \left( -\rho_0 \cdot j \cdot \omega \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{z_a} \right) \cdot dS \right) \end{aligned}$$

Τελικά, η κυματική εξίσωση μετά την εισαγωγή σε αυτήν των οριακών συνθηκών γίνεται:

$$\delta \left[ \int \frac{1}{2} \cdot \left( (\nabla p)^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \cdot p^2 \right) \cdot dV + \int p \cdot \rho_0 \cdot j \cdot \omega \cdot v_p \cdot dS + \int \rho_0 \cdot j \cdot \omega \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{z_a} \cdot dS \right] = 0 \quad (68)$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η κοιλότητα όγκου V διακριτοποιείται σε επιμέρους στοιχεία των οποίων μελετάται η συμπεριφορά. Η πίεση του κάθε στοιχείου δίνεται:

$$p_x = [N(x, y, z)] \cdot \{p_n\} \quad (69)$$

όπου  $N(x, y, z)$  οι συναρτήσεις μορφής ανά πεπερασμένο στοιχείο.

Η κυματική εξίσωση για κάθε επιμέρους στοιχείο διατυπώνεται ως εξής:

$$\delta \left[ \frac{1}{2} \cdot \{p_n\}^T \cdot [k_e] \cdot \{p_n\} - \omega^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \{p_n\}^T \cdot [m_e] \cdot \{p_n\} + \rho_0 \cdot j \cdot \omega \cdot \{p_n\}^T \cdot [s_e] \cdot \{v_{np}\} + \frac{1}{2} \cdot j \cdot \omega \cdot \{p_n\}^T \cdot [d_e] \cdot \{p_n\} \right] = 0 \quad (70)$$

Με τη συμβολή όλων των επιμέρους πεπερασμένων στοιχείων που την αποτελούν προκύπτει η κυματική εξίσωση της συνολικής επιφάνειας και δίνεται:

$$[k_g] \cdot \{p_g\} - \omega^2 \cdot [m_g] \cdot \{p_g\} + j \cdot \omega \cdot [d_g] \cdot \{p_g\} = -\rho_0 \cdot j \cdot \omega \cdot [g] \cdot \{v_{gp}\} \quad (71)$$

Πιο απλά, η τελική μορφή της κυματικής εξίσωσης γράφεται:

$$[M_f] \cdot \{\ddot{p}\} + [D_f] \cdot \{\dot{p}\} + [K_f] \cdot \{p\} = -\rho_0 \cdot [S] \cdot \{\ddot{U}\} + \{F_f\} \quad (72)$$

όπου  $[M_f]$  το μητρώο μάζας,  $[D_f]$  το μητρώο απόσβεσης,  $[K_f]$  το μητρώο ακαμψίας του ρευστού,  $\{\ddot{U}\}$  η επιτάχυνση της οριακής επιφάνειας και  $\{F_f\}$  η δομική ή ακουστική διέγερση. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, οι εξισώσεις που διατυπώθηκαν αποτελούν τις εξισώσεις πεπερασμένων στοιχείων σύμφωνα με τις οποίες υπολογίζεται, η ακουστική απόκριση μίας μάζας ρευστού που βρίσκεται στο εσωτερικό κοιλότητας όγκου V στερεού σώματος, μετά την επιβολή μίας δομικής ή ακουστικής διέγερσης. Μπορούν επιπλέον να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των ιδιοτιμών και ιδιοσυχνοτήτων της μάζας ρευστού όταν η διέγερση είναι μηδενική. Παρ' όλα αυτά, στις εξισώσεις που προηγήθηκαν θεωρείται πως το στερεό σώμα παραμένει ανεπηρέαστο από την ακουστική απόκριση του ρευστού στο εσωτερικό της κοιλότητας. Τα τοιχώματα της κοιλότητας ωστόσο, αντιδρούν στη ακουστική πίεση που υφίστανται και δονούνται. Με αυτό το τρόπο, παρατηρείται μία αλληλεπίδραση μεταξύ της εύκαμπτης δομής και των ηχητικών κυμάτων. Στην περίπτωση αυτή, οι εξισώσεις πεπερασμένων στοιχείων που δίνουν την απόκριση του στερεού σώματος διατυπώνονται ως εξής:

$$[M_s] \cdot \{\ddot{U}\} + [C_s] \cdot \{\dot{U}\} + [K_s] \cdot \{U\} = [A] \cdot \{P\} + \{F_s\} \quad (73)$$

όπου  $[M_s]$  το μητρώο μάζας,  $[C_s]$  το μητρώο απόσβεσης,  $[K_s]$  το μητρώο ακαμψίας του στερεού σώματος,  $\{U\}$  το διάνυσμα της μετατόπισης,  $[A]$  το μητρώο σύνδεσης ρευστού-στερεού και  $\{F_s\}$  η δομική ή ακουστική διέγερση.

Η σύνθεση των δύο παραπάνω εξισώσεων που προέκυψαν, δίνει μία ταυτόχρονη λύση για το ρευστό και το στερεό σώμα, και χρησιμοποιείται για την εύρεση της ακουστικής και δομικής απόκρισης του συστήματος σωμάτων, όταν αυτά υπόκεινται σε οποιοδήποτε είδος διέγερσης [14].

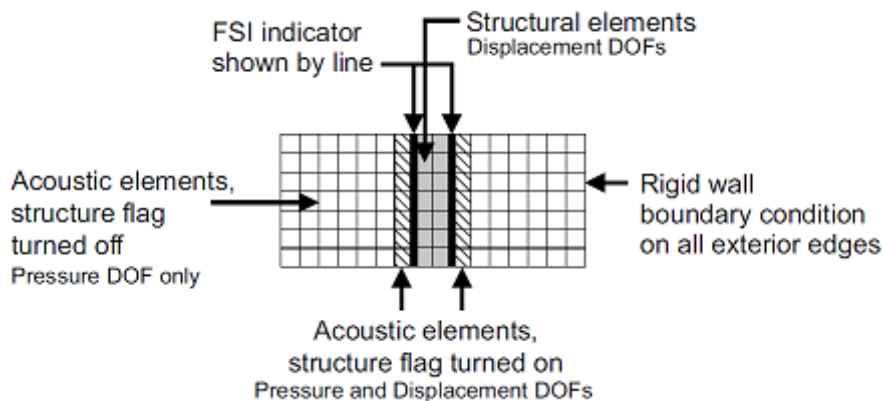
$$\begin{bmatrix} [M_s] & 0 \\ \rho_0 \cdot [S] & [M_f] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & 0 \\ 0 & [D_f] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & -[A] \\ 0 & [K_f] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_f \end{Bmatrix} \quad (74)$$

### 3.1.3 Πεπερασμένα στοιχεία στην ακουστική με χρήση του λογισμικού Ansys

Η χρήση του λογισμικού Ansys επιτρέπει την ταχεία ανάπτυξη των φυσικών μοντέλων, την άμεση εφαρμογή των μοντέλων ανάλυσης και τον έλεγχο της διαδικασίας επίλυσης του συστήματος.

Όπως αναλύθηκε προηγούμενα, η μελέτη ενός ακουστικού προβλήματος περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση ρευστού και στερεού σώματος. Στα πλαίσια του λογισμικού Ansys, χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που αναλύθηκε προηγούμενα για τη μοντελοποίηση ενός τέτοιου συστήματος. Το λογισμικό αυτό, προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης δύο ειδών πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση ακουστικών προβλημάτων: στοιχεία με βαθμούς ελευθερίας πίεση και μετατόπιση.

Κατά τη δημιουργία του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων το οποίο εξετάζει την αμφίδρομη συμπεριφορά ενός συστήματος ρευστού – στερεού σώματος, είναι σημαντικό να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην ακριβή αναπαράσταση του φυσικού μοντέλου, ώστε να παρασταθεί σωστά η διεπαφή μεταξύ ρευστού και στερεού σώματος. Εξετάζοντας το απλό παράδειγμα του φυσικού μοντέλου που απεικονίζεται παρακάτω (Σχήμα 3.3) και αποτελείται από έναν ακουστικό αγωγό με ένα στερεό χώρισμα στο μέσον του, θα γίνει κατανοητή η σωστή επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων ανά περίπτωση.



Σχήμα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με αλληλεπίδραση ρευστού-στερεού σώματος

Η περιοχή που αντιστοιχεί στον όγκο του ρευστού αναπαρίσταται με πεπερασμένα στοιχεία που έχουν ως βαθμό ελευθερίας την πίεση, ενώ τα στερεά σώματα διακριτοποιούνται με χρήση δομικών πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή στοιχείων που έχουν ως βαθμό ελευθερίας τη μετατόπιση. Στη διεπιφάνεια των δύο σωμάτων χρησιμοποιούνται στοιχεία που έχουν βαθμούς ελευθερίας τόσο την πίεση όσο και τη μετατόπιση καθώς χάρις σ' αυτά είναι δυνατή η μοντελοποίηση της αμφίδρομης σχέσης που παρουσιάζεται μεταξύ της δόνησης του στερεού σώματος και της απόκρισης της πίεσης του ρευστού.

Το παραπάνω μοντέλο θα μπορούσε να διαφέρει ως προς τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση του ρευστού, και αυτά να αντικατασταθούν από στοιχεία με βαθμούς ελευθερίας τη μετατόπιση. Στη περίπτωση αυτή, τέτοια στοιχεία θα συνέθεταν και τη διεπιφάνεια. Τα συστήματα αυτά μοντελοποιούνται ορίζοντας διαφορετικούς κόμβους για το ρευστό και το στερεό σώμα οι οποίοι συμπίπτουν στη διεπαφή. Στη συνέχεια, είναι απαραίτητος ο ορισμός μαθηματικών σχέσεων για τη σύζευξη των κομβικών μετατοπίσεων που είναι κάθετες στην διεπιφάνεια ρευστού – στερεού σώματος.

Το ζήτημα που τίθεται είναι ποιος από τους παραπάνω τρόπους μοντελοποίησης είναι προτιμότερος και γιατί. Κατά τη σύγκριση αυτή προκύπτει πως, ένα τρισδιάστατο ακουστικό στοιχείο μετατόπισης έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας μετατόπισης ενώ ένα τρισδιάστατο ακουστικό στοιχείο πίεσης έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας μετατόπισης και έναν βαθμό ελευθερίας πίεσης. Επιπλέον, τα ακουστικά στοιχεία με βαθμούς ελευθερίας τη μετατόπιση συμπεριφέρονται ως δομικά πεπερασμένα στοιχεία τα οποία μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους με τέτοιο τρόπο ώστε να αντικατοπτρίζουν τη συμπεριφορά ενός ρευστού. Κάτι τέτοιο συμβαίνει, μηδενίζοντας τους όρους δυσκαμψίας που σχετίζονται με τις διατμητικές τάσεις και θέτοντας το μέτρο ελαστικότητας Young ίσο με το συντελεστή όγκου του ρευστού. Αυτό σημαίνει πως το πεπερασμένο στοιχείο δεν έχει την ικανότητα να αντισταθεί στις διατμητικές τάσεις και τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε ορισμένες περιπτώσεις δεν έχουν φυσική σημασία. Τέλος, η ύπαρξη βαθμών ελευθερίας πίεσης επιτρέπει τη σύνδεση αυτών με τη συνολική ακουστική πίεση της κατασκευής, ενώ στην αντίθετη περίπτωση η ακουστική πίεση σε κάποιο σημείο του ρευστού δεν μπορεί να συσχετισθεί με κάποια προσπίπτουσα ή διασκορπόμενη ακουστική πίεση της κατασκευής. Όπως γίνεται φανερό, η χρήση πεπερασμένων στοιχείων πίεσης για τη διακριτοποίηση του όγκου ρευστού είναι πιο ασφαλής καθώς εκμηδενίζονται οι πιθανότητες να προκύψουν παραπλανητικά αποτελέσματα και δίνονται μεγαλύτερες δυνατότητες αξιοποίησης αυτών [13].

## **3.2 Περιγραφή και μοντελοποίηση του φυσικού προβλήματος**

### **3.2.1 Περιγραφή του φυσικού προβλήματος**

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το δείγμα που μελετάται ανήκει στην κατηγορία των υφασμάτων διατήρησης απόστασης (spacer fabrics) και αποτελείται από δύο



εξωτερικές επιφάνειες υφασμάτων οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο πλέξιμο μονόινων νημάτων (spacer yarns).

Πιο αναλυτικά, η επάνω επιφάνεια είναι διάτρητη και οι ακτίνες των οπών στις οποίες εξετάζεται η συμπεριφορά της ποικίλλουν ως προς το μέγεθος, καλύπτοντας και τη μελέτη μικροδιάτρησης. Η κάτω επιφάνεια είναι πανομοιότυπη με την πρώτη με τη διαφορά πως δεν υπάρχουν διατρήσεις και έτσι λειτουργεί κατά κάποιο τρόπο σαν ένα άκαμπτο τοίχωμα. Οι δύο εξωτερικές επιφάνειες συνδέονται μέσω κάθετων νημάτων που πλέκονται διαμέσου τους και τα συγκρατούν σε μία δομή sandwich. Τα νήματα στο μεσαίο στρώμα διανέμονται και προσανατολίζονται στο εσωτερικό του κατά τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν γωνία  $30^\circ$  με την επάνω επιφάνεια. Το ενδιάμεσο τμήμα της δομής λοιπόν, αποτελείται από τα νήματα που προαναφέρθηκαν και από σχισμές που περιέχουν αέρα, προσομοιώνοντας με αυτόν τον τρόπο έναν πορώδη απορροφητή.

Η δομή που περιγράφηκε θα εξετασθεί σε ποικίλλες παραλλαγές, με σκοπό να διερευνηθεί η συμπεριφορά της και να προσδιοριστεί ο ιδανικός συνδυασμός παραμέτρων που οδηγεί στο βέλτιστο αποτέλεσμα. Οι παράμετροι που μεταβάλλονται στη παρούσα μελέτη είναι τρεις:

- Ακτίνα διάτρησης
- Ποσοστό κενού χώρου διάτρητης επιφάνειας
- Αντίσταση ροής πορώδη απορροφητή

Η πρώτη παράμετρος καθορίζει το αν η επιφάνεια αποτελείται από οπές ακτίνας λίγων χιλιοστών ή μεγαλύτερες, δηλαδή αν πρόκειται για διάτρηση ή μικροδιάτρηση. Για διάτρηση, οι ακτίνες που θα μελετηθούν είναι [0.0005, 0.001, 0.0015, 0.002, 0.003] ενώ για μικροδιάτρηση [0.0001, 0.0002, 0.0005, 0.001, 0.002]. Η δεύτερη παράμετρος συνδέεται στενά με τη πρώτη, καθώς κατάλληλος συνδυασμός των δύο, καθορίζει τον αριθμό των οπών που θα φέρει η επιφάνεια και την απόσταση αυτών. Η μελέτη εστιάζει σε τιμές ποσοστού κενού χώρου διάτρητης επιφάνειας [0.02, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25]. Τέλος, η τρίτη παράμετρος προσδιορίζει την αντίσταση ροής του πορώδη απορροφητή και το εύρος τιμών που θα μελετηθεί είναι [20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000].

Τα λοιπά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής αποτελούν το πάχος της καθώς και η γεωμετρία των ινών που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη στα υφάσματα διατήρησης απόστασης. Το πάχος των εξωτερικών επιφανειών είναι 1 mm ενώ του πορώδη απορροφητή 18 mm. Οι ίνες που χρησιμοποιούνται έχουν κυκλική διατομή με ακτίνα 0.1 mm.

Σύμφωνα με αναφορές που έχουν προηγηθεί, η παραπάνω δομή εξετάζεται ως προς την ακουστική της συμπεριφορά. Πιο αναλυτικά, η δομή θεωρείται πακτωμένη σε στερεό τοίχωμα και εκτείνεται σε ρεύμα αέρα που μεταφέρει ακουστικά κύματα εκπεμπόμενα από ακουστική πηγή τοποθετημένη σε άπειρη θεωρητικά απόσταση από το δείγμα προς εξέταση. Το κύμα προσπίπτει κάθετα στη διάτρητη επιφάνεια της δομής, η οποία θεωρείται πλήρως απορροφητική, περνάει στο αμέσως επόμενο στρώμα, τον πορώδη απορροφητή και τέλος

προχωράει προς το τελευταίο συστατικό στοιχείο της δομής, την ανένδοτη επιφάνεια. Στην πορεία του το ρευστό χάνει μέρος της αρχικής του ενέργειας, με αποτέλεσμα τα ακουστικά κύματα που φθάνουν στο κάτω άκρο της δομής να είναι εξασθενημένα. Η διερεύνηση που θα πραγματοποιηθεί έχει στόχο να προσδιορίσει το καλύτερο δυνατό συνδυασμό παραμέτρων για τη δομή, ώστε αυτή να επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή ακουστική απορρόφηση.

### 3.2.2 Μοντελοποίηση του φυσικού προβλήματος

#### 3.2.2.1 Χρήση του υπολογιστικού πακέτου Ansys

Το Ansys προσφέρει στο χρήστη τη δυνατότητα να εκτελέσει οποιαδήποτε μηχανική δοκιμή επιθυμεί σε δύο γραφικά περιβάλλοντα, το Ansys Workbench και το Ansys Mechanical APDL. Η απόφαση για το ποιο από τα δύο περιβάλλοντα ενδείκνυται για την κάθε περίπτωση εξαρτάται, τόσο από το ίδιο το λογισμικό, καθώς δεν είναι όλες οι μηχανικές δοκιμές διαθέσιμες και στα δύο γραφικά περιβάλλοντα, όσο και από τις ικανότητες του χρήστη, καθώς στο Ansys Mechanical APDL απαιτούνται γνώσεις προγραμματισμού αλλά και η εκμάθηση των εντολών που εκτελεί το πρόγραμμα. Μέχρι σήμερα, μία ακουστική ανάλυση μπορούσε να πραγματοποιηθεί με κατάλληλο προγραμματισμό μέσω εντολών APDL. Το Ansys 2015 όμως εισάγει ένα σύνολο εργαλείων παραμετροποιημένων εφαρμογών (Application Customization Toolkit – ACT) των εντολών APDL. Μεταξύ άλλων, στα πακέτα αυτά είναι διαθέσιμη και η ακουστική δοκιμή η οποία μπορεί πλέον να πραγματοποιηθεί στο περιβάλλον Ansys Workbench.

Στο περιβάλλον αυτό, είναι διαθέσιμα ποικίλα συστήματα ανάλυσης ιδανικά για διαφορετικές ανάγκες προσομοίωσης. Ένα ακουστικό σύστημα είναι εύκολο να προσομοιωθεί εκτελώντας μία δοκιμή αρμονικής απόκρισης (Harmonic Response Analysis). Κάθε κυκλικό φορτίο που εφαρμόζεται σε ένα σύστημα, προκαλεί σ' αυτό μία συνεχή κυκλική αντίδραση, δηλαδή μία αρμονική απόκριση. Η δοκιμή αυτή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη, να προβλέψει τη δυναμική συμπεριφορά της δομής του, επιτρέποντάς του έτσι να εξακριβώσει κατά πόσο ή όχι η κατασκευή του θα αντιμετωπίσει με επιτυχία φαινόμενα όπως συντονισμό, κόπωση ή άλλες επιβλαβείς επιπτώσεις από την εξέλιξη του φαινομένου. Ειδικότερα, η ανάλυση υπολογίζει, τη κατανομή της πίεσης στο ρευστό εξ' αιτίας της επιβολής ενός αρμονικού, ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενου, φορτίου. Ορίζοντας ένα φάσμα συχνοτήτων για το φορτίο, γίνεται δυνατή η παρατήρηση της κατανομής της πίεσης, και κατ' επέκταση και άλλων βασικών ακουστικών παραμέτρων, σε διάφορες συχνότητες [15]

Στη μελέτη αυτή, μία σημειακή πηγή εκπέμπει ακουστικά κύματα σε ένα εύρος συχνοτήτων, τα οποία προσπίπτουν στη δομή που εξετάζεται ως προς τα απορροφητικά της χαρακτηριστικά. Η ανάλυση του προβλήματος αυτού στο υπολογιστικό πακέτο Ansys, όπως γίνεται φανερό, πραγματοποιείται με χρήση της ακουστικής επέκτασης (Acoustics ACT 15) στο περιβάλλον Workbench και την εκτέλεση μίας δοκιμής αρμονικής απόκρισης. Σαν τρόπος επίλυσης χρησιμοποιείται η πλήρης μέθοδος (Full Method) στην οποία τα μητρώα μάζας,

απόσβεσης και δυσκαμψίας που εισάγονται είναι πλήρη και μπορεί να είναι είτε συμμετρικά είτε ασύμμετρα. Αυτός ο τρόπος επίλυσης, δίνει μεγαλύτερη ελευθερία στην επιβολή φορτίσεων και οριακών συνθηκών κατά το στήσιμο του υπολογιστικού μοντέλου, με αποτέλεσμα να καλύπτει μεγαλύτερο φάσμα ακουστικών προβλημάτων.

Η διαδικασία διεξαγωγής μίας πλήρους δοκιμής αρμονικής απόκρισης περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια:

- Γεωμετρική απεικόνιση του υπολογιστικού μοντέλου
- Επιβολή φορτίων και οριακών συνθηκών και απόκτηση λύσης
- Εξέταση των αποτελεσμάτων

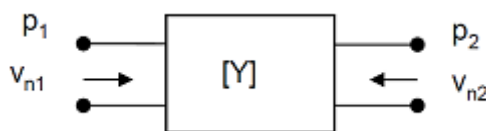
### 3.2.2.2 Αναπαράσταση δομής υπολογιστικού μοντέλου

Το πρώτο και καθοριστικό βήμα κατά την διεξαγωγή μίας αρμονικής ανάλυσης είναι η αναπαράσταση της γεωμετρίας του φυσικού μοντέλου. Σύμφωνα με την περιγραφή που έχει προηγηθεί, η δομή που εξετάζεται αποτελείται από μία διάτρητη επιφάνεια, ακολουθούμενη από έναν πορώδη απορροφητή με προσανατολισμό ινών  $30^\circ$  και μία ανένδοτη επιφάνεια. Μελετώντας τις δυνατότητες που δίνονται από τη χρήση της ακουστικής επέκτασης, γίνεται φανερό πως ο ορισμός διάτρητων επιφανειών και πορωδών απορροφητών μπορεί να επιτευχθεί όχι μόνο με ακριβή σχεδίαση αυτών αλλά και με επιβολή κατάλληλων ενσωματωμένων στο πρόγραμμα μοντέλων.

Στην ακουστική ανάλυση υπάρχει η δυνατότητα ορισμού ενός σώματος ως ακουστικό σώμα (acoustic body), πράγμα που σημαίνει πως το σώμα αυτό αντιπροσωπεύει μία ακουστική περιοχή, δηλαδή ένα ρευστό. Ένα ακουστικό σώμα μπορεί να προσομοιώσει οποιοδήποτε ρευστό με διαφορετικές ιδιότητες ανά θερμοκρασία, με κατάλληλο ορισμό παραμέτρων όπως πυκνότητα, ταχύτητα του ήχου, δυναμικό ιξώδες, θερμική αγωγιμότητα, συντελεστή ειδικής θερμότητας σε σταθερό όγκο και σε σταθερή πίεση που μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

Πέρα από τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη φύση και τις ιδιότητες του ρευστού, είναι δυνατόν ένα ακουστικό σώμα να προσομοιώσει τη συμπεριφορά διάτρητων υλικών με τη μέθοδο του ισοδύναμου ρευστού. Ο όρος διάτρητα υλικά (Perforated Material) που χρησιμοποιεί το Ansys δεν αναφέρεται σε κομμάτια διάτρητων μεταλλικών φύλλων, αλλά χρησιμοποιείται στα πλαίσια του μέσου που απορροφά τα προσπίπτοντα σε αυτό ηχητικά κύματα. Αν ένα διάτρητο υλικό έχει μία ακαμψία, ή βάρος, τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από εκείνη του αέρα, και διεγείρεται από ακουστικό φορτίο με συχνότητα πολύ μεγαλύτερη από τη συχνότητα συντονισμού του, ο σκελετός του υλικού μπορεί να θεωρηθεί ως άκαμπτος και ακίνητος. Αυτή ακριβώς είναι η έννοια του ισοδύναμου ρευστού. Η μοντελοποίηση τέτοιων σωμάτων πραγματοποιείται σύμφωνα με όσα έχουν αναλυθεί στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, με χρήση μαθηματικών μοντέλων κατάλληλων για τη προσομοίωση είτε πορωδών απορροφητών είτε διάτρητων επιφανειών.

Ένα σημαντικό σημείο σε οποιαδήποτε ανάλυση πραγματοποιείται είναι η προσπάθεια για ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους. Οι διάτρητες επιφάνειες είναι αρκετά πολύπλοκες κατά την ανάπτυξη πλέγματος για το λόγο αυτό η μοντελοποίησή τους με εισαγωγή ενός  $2 \times 2$  μεταβατικού πίνακα αγωγιμότητας (Transfer Admittance Matrix) απλοποιεί τη μελέτη.



Σχήμα 3.4 Σχηματικό διάγραμμα μεθόδου

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η ακουστική σχέση ανάμεσα σε δύο αντίστοιχους κόμβους, ο ένας τοποθετημένος στη μία πλευρά της διάτρητης επιφάνειας και ο άλλος στην αντίθετη (Σχήμα 3.4), περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{Bmatrix} v_{n1} \\ v_{n2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} \quad (75)$$

όπου  $v_{ni}$  οι κανονικές ταχύτητες των σωματιδίων του μέσου σε κάθε κόμβο,  $p_i$  οι σύνθετες τιμές της πίεσης σε κάθε κόμβο και  $a_i$  σταθερά που ισούται με  $a_i = \frac{1}{Y_i}$ . Το  $Y_{ii}$  είναι συνάρτηση της αγωγιμότητας και της αντίστασης και δίνεται:

$$Y = \frac{1}{(R_p + j \cdot X_p)} \quad (76)$$

όπου

$$R_p = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \sqrt{16 \cdot \pi \cdot f \cdot n \cdot \rho_0} \cdot \left(1 + \frac{l}{2 \cdot r}\right) \quad (77)$$

$$X_p = \frac{2}{\varepsilon} \cdot \pi \cdot f \cdot \rho_0 \cdot (l + 2 \cdot \Delta l) \quad (78)$$

$$\Delta l = \begin{cases} 0.85 \cdot r \cdot \left(1 - 2.34 \cdot \frac{r}{d}\right) & 0 < \frac{r}{d} < 0.25 \\ 0.668 \cdot r \cdot \left(1 - 1.90 \cdot \frac{r}{d}\right) & 0.25 < \frac{r}{d} < 0.5 \end{cases} \quad (79)$$

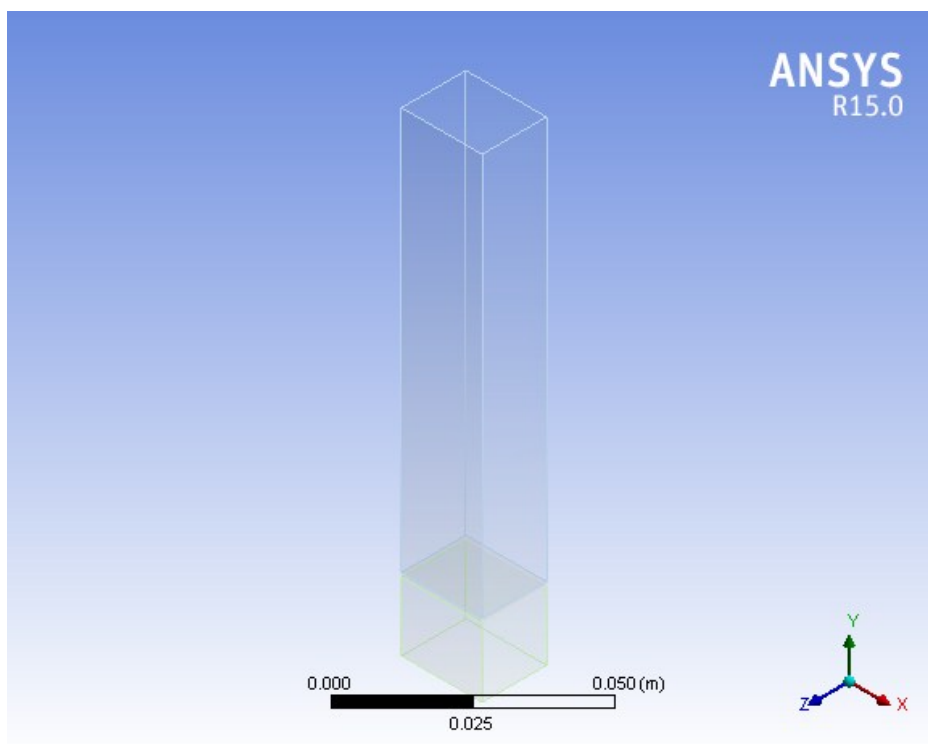
όπου  $f$  η συχνότητα,  $n$  το κινηματικό ιξώδες,  $\rho_0$  η πυκνότητα του αέρα,  $r$  η ακτίνα διάτρησης,  $\varepsilon$  το ποσοστό του κενού χώρου,  $d$  η απόσταση των οπών,  $l$  το πάχος της επιφάνειας και  $\Delta l$  ο συντελεστής διόρθωσης. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης μίας διάτρητης επιφάνειας με ποικίλους τρόπους, και στη παρούσα μελέτη επιλέγεται η χρήση τετραγωνικού πλέγματος διατρήσεων. Η προσέγγιση αυτή απαιτεί την εισαγωγή των βασικών παραμέτρων της διάτρητης δομής όπως, την ακτίνα διάτρησης, τη περίοδο του πλέγματος, το πάχος της επιφάνειας, τη πυκνότητα και το κινηματικό ιξώδες του ισοδύναμου ρευστού και τέλος το λόγο εσωτερικής και εξωτερικής ακτίνας μίας κυλινδρικής δομής.

Για τη μοντελοποίηση ενός πορώδη απορροφητή είναι διαθέσιμα ποικίλα μοντέλα ισοδύναμου ρευστού είτε μακροσκοπικά εμπειρικά είτε φαινομενολογικά θεωρητικά. Ανάλογα, λοιπόν, με τα διαθέσιμα χαρακτηριστικά του εκάστοτε απορροφητή επιλέγεται και το κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο. Στα πλαίσια της μελέτης που πραγματοποιείται, το μοντέλο του Miki περιγράφει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του πορώδη απορροφητή από όλες τις απόψεις. Από γεωμετρικής άποψης το μοντέλο αυτό αναπαριστά πιστά την πραγματική δομή του φυσικού προβλήματος που εξετάζεται. Επιπλέον, το μοναδικό χαρακτηριστικό που απαιτείται για χρήση του μοντέλου είναι ο προσδιορισμός της αντίστασης ροής του υλικού. Τέλος, η χρήση του είναι εφικτή μόνο στη περίπτωση που ισχύει ο εξής περιορισμός:

$$\frac{f}{\sigma} < 1 \quad (80)$$

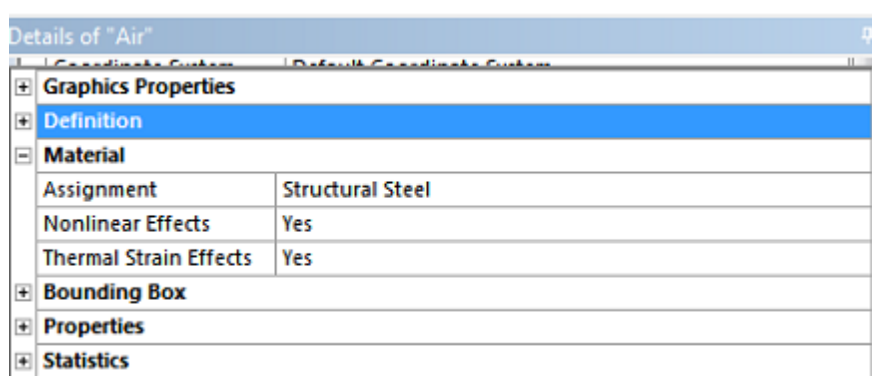
σχέση που επαληθεύεται για όλες τις περιπτώσεις συνδυασμού συχνότητας – αντίστασης ροής που θα μελετηθούν.

Σύμφωνα με την ανάλυση που έχει προηγηθεί σχετικά με τις δυνατότητες μαθηματικής μοντελοποίησης που προσφέρει το Ansys καθώς και με τα μοντέλα που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση του φυσικού προβλήματος που έχει παρουσιασθεί, γίνεται ένας πρωταρχικός σχεδιασμός της δομής. Τόσο η διάτρητη επιφάνεια όσο και ο πορώδης απορροφητής, σχεδιάζονται ως πλάκες διάστασης  $20 \times 16 \text{ mm}$  και πάχους  $1 \text{ mm}$  και  $17 \text{ mm}$  αντίστοιχα. Τα δύο σώματα εφάπτονται στη μία τους επιφάνεια σχηματίζοντας μία δομή sandwich, και είναι εκτεθειμένα σε ρεύμα αέρα, το οποίο σχεδιάζεται και αυτό ως μία πλάκα ίδιας διάστασης με τη δομή και πάχους  $100 \text{ mm}$ . Η κάτω επιφάνεια του σώματος αυτού εφάπτεται με την πάνω πλευρά της διάτρητης επιφάνειας αναπαριστώντας με τον τρόπο αυτό, την κάθετη πρόσπτωση. Παρακάτω στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται η δομή που περιγράφεται.



Σχήμα 3.5 Αναπαράσταση δομής sandwich

Κατά το σχεδιασμό των παραπάνω δομών, το λογισμικό ζητάει τον ορισμό του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα σώματα προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αρμονική ανάλυση. Σύμφωνα με προηγούμενη αναφορά, διευκρινίστηκε πως η χρήση της ακουστικής επέκτασης (ACT 15), δίνει τη δυνατότητα ορισμού των σωμάτων ως ακουστικά σώματα, δηλαδή ως ρευστά. Παρ'όλα αυτά στο σημείο του σχεδιασμού, δεν έχει ανατεθεί ακόμα στα σώματα η ιδιότητα των ακουστικών σωμάτων, με αποτέλεσμα το πρόγραμμα να απαιτεί την ανάθεση υλικού. Κάτι τέτοιο δεν αποτελεί ουσιαστικό πρόβλημα καθώς, κατά την εισαγωγή της ρύθμισης των ακουστικών σωμάτων η πληροφορία αυτή δε θα χρησιμοποιηθεί, όπως φαίνεται από τις εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα. Στα πλαίσια αυτής της ανάλυσης επιλέγεται ως αρχικό υλικό ο χάλυβας (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6 Ανάθεση υλικού

Το **ρεύμα αέρα** που μεταφέρει τα ηχητικά κύματα ορίζεται ως ακουστικό σώμα με χαρακτηριστικά αέρα σε θερμοκρασία 20° C.

$$\rho_0 = 1.2040 \frac{kg}{m^3} \quad (81)$$

$$c = 343.24 \text{ m/sec} \quad (82)$$

$$n = 1.785 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{sec} \quad (83)$$

$$n = 1.096 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{sec} \quad (84)$$

$$\kappa = 0.0257 \frac{W}{m \cdot C} \quad (85)$$

$$C_p = 1.005 \frac{J}{kg \cdot C} \quad (86)$$

$$C_v = 0.718 \frac{J}{kg \cdot C} \quad (87)$$

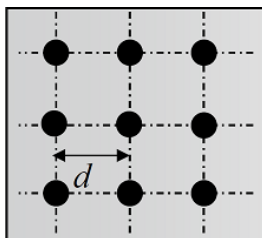
Παρατίθεται στο σημείο αυτό, μία απεικόνιση του γραφικού περιβάλλοντος Ansys όπου εισάγονται οι μεταβλητές εισόδου για την μοντελοποίηση του ρεύματος ρευστού (Σχήμα 3.7).

Details of "Incoming_Air"	
[-] <b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] <b>Definition</b>	
Temperature Dependency	No
Frequency Dependency	No
Mass Density	1.2041 [kg m <sup>-3</sup> ]
Sound Speed	343.24 [m sec <sup>-1</sup> ]
Dynamic Viscosity	1.783E-05 [Pa sec]
Bulk Viscosity	1.096E-05 [Pa sec]
Thermal Conductivity	0.0257 [W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Specific Heat Cp	1.005 [J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Specific Heat Cv	0.718 [J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Equivalent Fluid of Perforated Material	No
Low Reduced Frequency Model	No
Reference Pressure	2E-05 [Pa]
Reference Static Pressure	101325 [Pa]
Acoustic-Structural Coupled Body Options	Uncoupled
Perfectly Matched Layers (PML)	Off

Σχήμα 3.7 Ορισμός ρευστού και χαρακτηριστικών του

Η **διάτρητη επιφάνεια** (Σχήμα 3.8) έχει τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

- Ακτίνα διάτρησης  $r = 3 \text{ mm}$
- Ποσοστό κενού χώρου διάτρητης επιφάνειας 15 %



Σχήμα 3.8 Σχηματική αναπαράσταση τετραγωνικού πλέγματος διάτρησης

Με γνώση των δύο αυτών χαρακτηριστικών καθορίζεται η απόσταση των κέντρων των οπών δηλαδή η περίοδος του πλέγματος η οποία για τετραγωνικό πλέγμα καθορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$C_v = 0.718 \frac{J}{kg \cdot C} \quad (88)$$

$$d = \sqrt{\frac{78.54 \cdot D^2}{open\ area(\%)}} \quad (89)$$

και η τιμή της υπολογίζεται:

$$d = 13.73\ mm \quad (90)$$

Ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα κυλινδρικής δομής λαμβάνεται ίσος με μηδέν αφού πρόκειται για τετραγωνική επίπεδη επιφάνεια. Επιπλέον, οι τιμές για την πυκνότητα και το κινηματικό ιξώδες του ισοδύναμου ρευστού λαμβάνουν τις τιμές αέρα σε θερμοκρασία 20° C, δηλαδή, είναι, αντίστοιχα:

$$\rho_0 = 1.2041\ kg/m^3 \quad (91)$$

$$n = 1.783 \times 10^{-5}\ Pa \cdot sec \quad (92)$$

Τα στοιχεία της διάτρητης επιφάνειας όπως εισάγονται στο λογισμικό φαίνονται στο Σχήμα 3.9.



Details of "PPerforated"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
<b>Definition</b>	
Temperature Dependency	No
Frequency Dependency	No
Mass Density	1.2041 [kg m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]
Sound Speed	343.24 [m sec <sup>-1</sup> ]
Dynamic Viscosity	1.785E-05 [Pa sec]
Bulk Viscosity	1.096E-05 [Pa sec]
Thermal Conductivity	0.0257 [W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Specific Heat Cp	1.005 [J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Specific Heat Cv	0.718 [J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Equivalent Fluid of Perforated Material	SGYM_HGYM
Grid Type	Square Grid Structure
Hole Radius	0.003 [m]
Grid Period	0.013729385 [m]
Structure Thickness	0.001 [m]
Mass Density Of The Fluid	1.2041 [kg m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]
Dynamic Viscosity Of The Fluid	1.783E-05 [Pa sec]
Ratio Of Inner And Outer Radius	0
Low Reduced Frequency Model	No
Reference Pressure	2E-05 [Pa]
Reference Static Pressure	101325 [Pa]
Acoustic-Structural Coupled Body Options	Uncoupled
Perfectly Matched Layers (PML)	Off

Σχήμα 3.9 Ορισμός διάτρητης επιφάνειας – Εισαγωγή παραμέτρων μικροδομής

Ο **πορώδης απορροφητής** όπως έχει ήδη αναφερθεί, απαιτεί τον ορισμό της αντίστασης ροής καθώς το μοντέλο του Miki δεν απαιτεί άλλο χαρακτηριστικό της μικροδομής του απορροφητή για τη μοντελοποίηση (Σχήμα 3.10). Ορίζεται λοιπόν,

$$flow\ resistivity = 70000\ rayl/m \quad (93)$$

Details of "Porous_Medium"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
<b>Definition</b>	
Temperature Dependency	No
Frequency Dependency	No
Mass Density	1.2041 [kg m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]
Sound Speed	343.24 [m sec <sup>-1</sup> ]
Dynamic Viscosity	1.783E-05 [Pa sec]
Bulk Viscosity	1.096E-05 [Pa sec]
Thermal Conductivity	0.0257 [W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Specific Heat Cp	1.005 [J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Specific Heat Cv	0.718 [J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Equivalent Fluid of Perforated Material	MIKI
Fluid Resistivity	70000 [N sec m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]
Low Reduced Frequency Model	No
Reference Pressure	2E-05 [Pa]
Reference Static Pressure	101325 [Pa]
Acoustic-Structural Coupled Body Options	Uncoupled
Perfectly Matched Layers (PML)	Off

Σχήμα 3.10 Ορισμός πορώδη απορροφητή – Εισαγωγή παραμέτρων μικροδομής

Τέλος, η **ανένδοτη επιφάνεια** δεν αναπαρίσταται με κάποιο ισοδύναμο μοντέλο ρευστού, αλλά προσομοιώνεται από τα γεωμετρικά σύνορα του πορώδη απορροφητή.

Τα σώματα που συνθέτουν την συνολική δομή προς εξέταση, είναι όλα ορισμένα ως ακουστικά σώματα και για το λόγο αυτό δεν απαιτείται ο ορισμός των επιφανειών επαφής τους, καθώς η ρύθμιση αυτή αφορά την αλληλεπίδραση στερεών σωμάτων. Στο αντίστοιχο μενού των συνδέσεων (Connections) λοιπόν, οι επαφές που έχουν αυτόματα οριστεί από το πρόγραμμα σβήνονται, γιατί διαφορετικά δεν θα είναι δυνατόν να προκύψουν αποτελέσματα (Σχήμα 3.11).

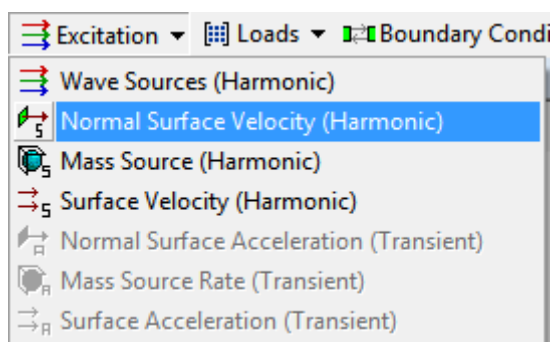


Σχήμα 3.11 Ρύθμιση επιφανειών επαφής

### 3.2.2.3 Καθορισμός φορτίων και οριακών συνθηκών υπολογιστικού μοντέλου

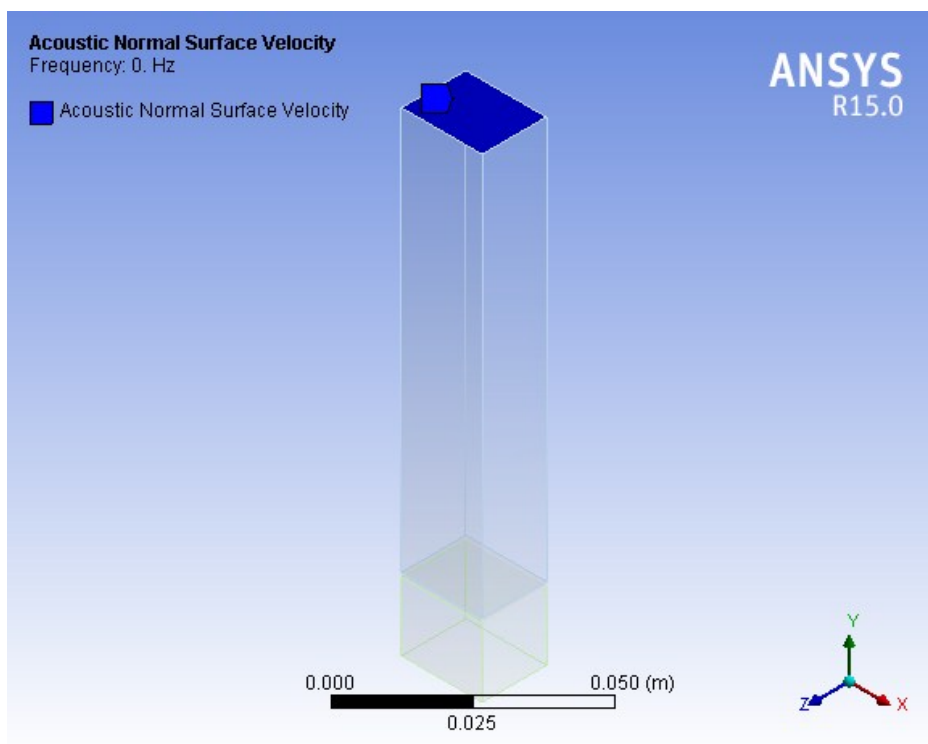
Η ηχητική πηγή που διεγείρει το μοντέλο προς εξέταση θεωρείται σημειακή και τοποθετείται σε πολύ μεγάλη, θεωρητικά άπειρη, απόσταση από αυτό έτσι ώστε οι σφαιρικές επιφάνειες του κύματος που εκπέμπεται από αυτήν να εκφυλίζονται σε επίπεδες όταν προσεγγίζουν την επιφάνεια του μοντέλου. Με το τρόπο αυτό τα ηχητικά κύματα που φθάνουν στον μοντέλο θεωρούνται επίπεδα κύματα.

Μία σημειακή πηγή μπορεί να προσομοιωθεί στο λογισμικό Ansys, εφαρμόζοντας μία ταχύτητα κάθετα σε μία εξωτερική επιφάνεια ενός ακουστικού τομέα. Η αρχή λειτουργίας αυτής της ρύθμισης στηρίζεται στον ήχο που παράγεται από την δόνηση της επιφάνειας. Πιο αναλυτικά, η δονούμενη επιφάνεια προκαλεί τα παρακείμενα στην επιφάνεια ακουστικά σωματίδια να κινηθούν και ως εκ τούτου να δημιουργηθεί μία ακουστική πίεση. Η επιβολή αυτού του τύπου της διέγερσης γίνεται με επιλογή του στοιχείου Κάθετη Επιφανειακή Ταχύτητα (Normal Surface Velocity) που είναι διαθέσιμο στο μενού Διέγερσης (Excitation) (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12 Ορισμός τύπου διέγερσης υπολογιστικού μοντέλο

Πρωταρχικό βήμα κατά τον ορισμό της διέγερσης είναι η επιλογή της επιφάνειας στην οποία αυτή εφαρμόζεται. Στην περίπτωση που εξετάζεται, θεωρείται πως η σημειακή πηγή βρίσκεται τοποθετημένη στην επάνω επιφάνεια του ρεύματος αέρα (Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13 Ορισμός επιφάνειας εφαρμογής της διέγερσης

Η ταχύτητα του ακουστικού κύματος λαμβάνει τέτοια τιμή ώστε να προσομοιώνεται η ηχητική στάθμη που δημιουργεί μία μέση κυκλοφορία σε δρόμο. Η στάθμη της ηχητικής πίεσης για θερμοκρασία αναφοράς 20° C (Σχήμα 3.14) δίνεται:

$$p = 1 \text{ Pa} \quad (94)$$

Σε αυτήν την περίπτωση το μέτρο της ακουστικής ταχύτητας είναι:

$$v = 0.00242 \text{ m/s} \quad (95)$$

Το πρόσημό της όμως, ορίζει τη κατεύθυνση εφαρμογής της ως προς το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στο υπολογιστικό μοντέλο, για το λόγο αυτό λαμβάνεται ως αρνητικό.

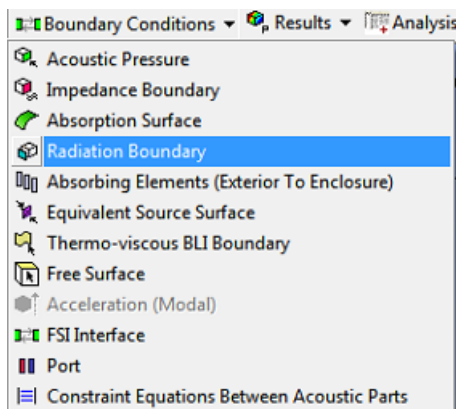
Επιπλέον, η μελέτη της κάθετης πρόσπτωσης του ηχητικού κύματος στο μοντέλο προς εξέταση, επιβάλλει τον ορισμό της φάσης της ταχύτητας ως μηδενική.

Details of "Acoustic Normal Surface Velocity"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
<b>Definition</b>	
Frequency Dependency	No
Amplitude Of Normal Velocity	-0.00242 [m sec <sup>-1</sup> ]
Phase Angle	0 [°]
Structural Surface Vibration	No
Port Number	1

Σχήμα 3.14 Ορισμός χαρακτηριστικών διέγερσης υπολογιστικού μοντέλου

Στη συνέχεια, προκειμένου να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια το φυσικό πρόβλημα που εξετάζεται καθίσταται απαραίτητη η επιβολή κατάλληλων οριακών συνθηκών.

Μία βασική πτυχή της προσομοίωσης που πραγματοποιείται είναι η απαίτηση τα προσπίπτοντα στην επιφάνεια ηχητικά κύματα να απορροφώνται πλήρως από αυτήν και να μην ανακλώνται. Κάτι τέτοιο γίνεται εφικτό με επιβολή της οριακής συνθήκης ακτινοβολίας (Radiation Boundary), γνωστή και ως συνθήκη Robin, η οποία εφαρμόζεται στην εξωτερική επιφάνεια ακουστικών σωμάτων και την καθιστά απορροφητική ως προς τα εξερχόμενα ακουστικά κύματα (Σχήμα 3.15).

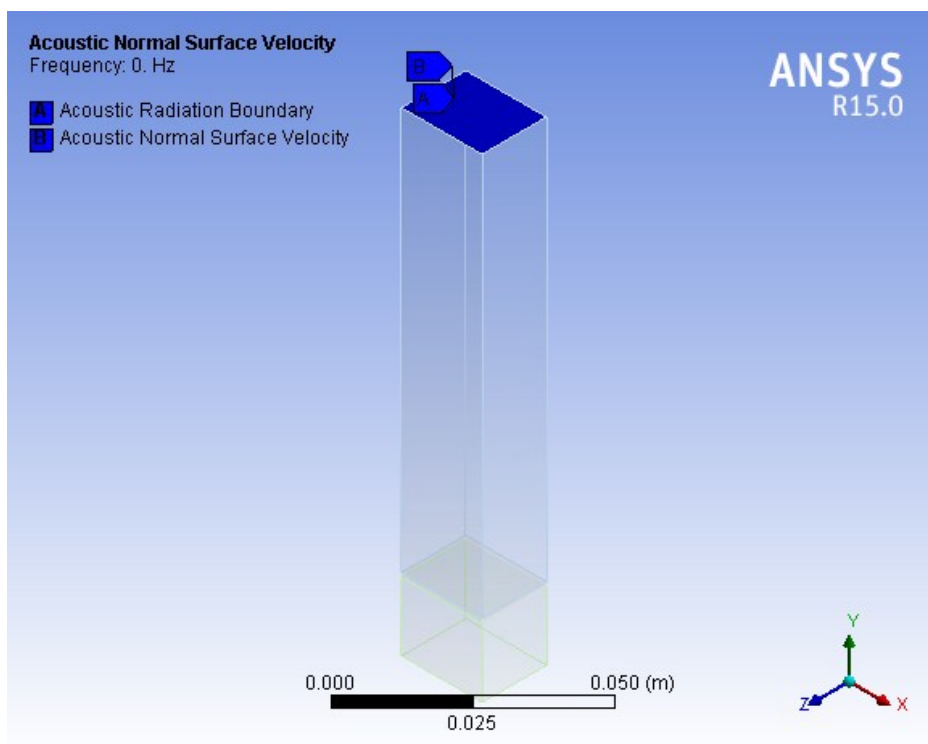


Σχήμα 3.15 Επιβολή 1<sup>ης</sup> οριακής συνθήκης

Ειδικότερα, η συνθήκη Robin αποτελεί μία καθορισμένη τιμή ορίου ακουστικής εμπέδησης (Impedance Boundary) με τιμή για την επιφανειακή εμπέδηση που δίνεται:

$$Z_0 = \rho_0 \cdot c_0 \quad (96)$$

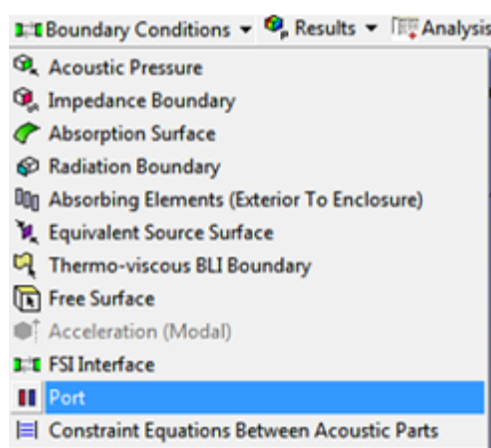
Πρακτικά, η έκφραση αυτή σημαίνει πως αυτή η τιμή της εμπέδησης στην εξωτερική επιφάνεια του ακουστικού σώματος, θα εξασφαλίσει την απορρόφηση των κάθετων στην επιφάνεια εξωτερικών κυμάτων αποτρέποντας την ανάκλασή τους πίσω στον ακουστικό τομέα.



Σχήμα 3.16 Ορισμός επιφάνειας επιβολής οριακής συνθήκης ακτινοβολίας

Η μόνη ρύθμιση η οποία απαιτείται ως προς τον ορισμό της συγκεκριμένης οριακής συνθήκης είναι η επιλογή των κατάλληλων επιφανειών που θα φέρουν τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν παραπάνω. Στη δεδομένη μελέτη, η επάνω επιφάνεια του ρεύματος αέρα πρέπει να είναι απορροφητική προκειμένου να απορροφούνται πλήρως τα ηχητικά κύματα που εκπέμπονται από την σημειακή πηγή (Σχήμα 3.16).

Προκειμένου για τον εντοπισμό ακουστικών περιοχών, είναι δυνατός ο ορισμός τους μέσω της οριακής συνθήκης Port (Σχήμα 3.17).



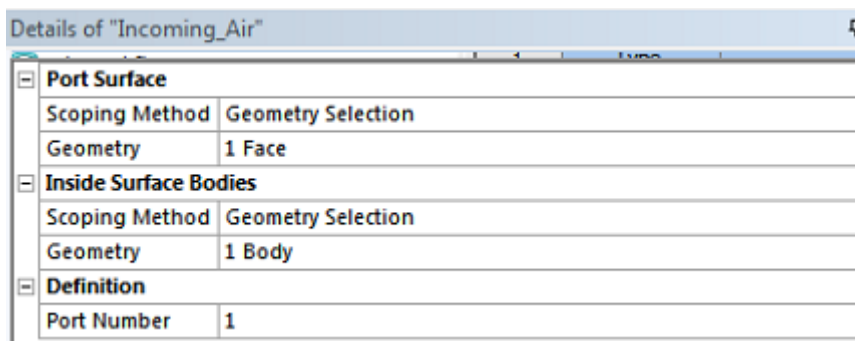
Σχήμα 3.17 Επιβολή 2<sup>ης</sup> οριακής συνθήκης

Η ρύθμιση αυτή είναι απαραίτητη προκειμένου:

- Να καθορισθούν οι δύο ακουστικές επιφάνειες μεταξύ των οποίων ορίζεται ο μεταβατικός πίνακας αγωγιμότητας (Transfer Admittance Matrix).

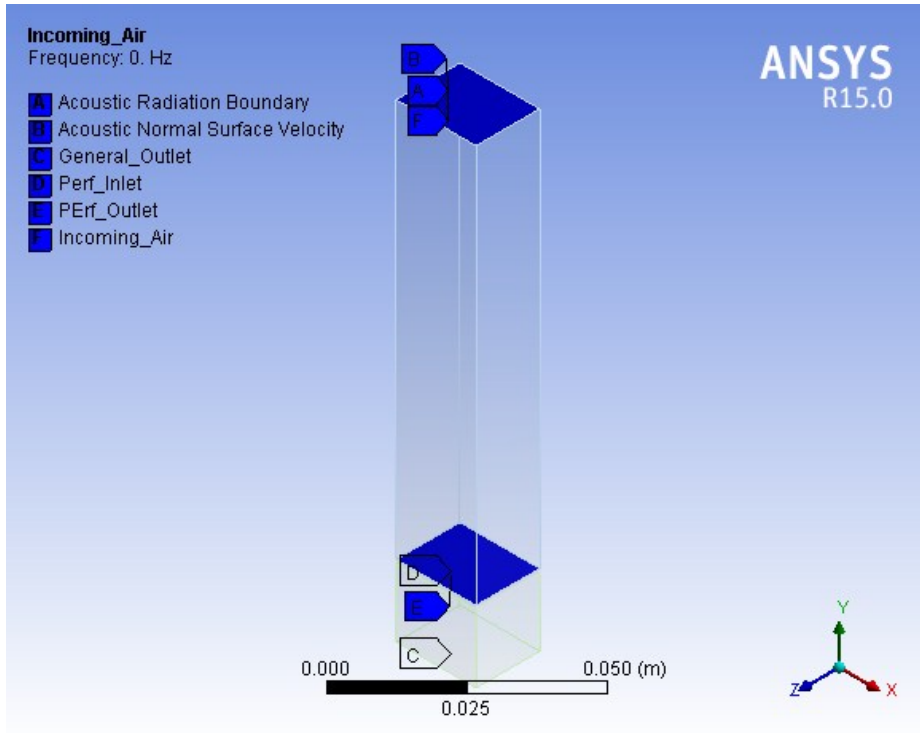
- Να υπολογισθούν τα αποτελέσματα ηχητικής ισχύος.

Με κατάλληλη επιλογή της επιφάνειας αφετηρίας ή τερματισμού του ακουστικού τομέα και του σώματος που τον αποτελεί και έπειτα από διαδοχική αρίθμηση ανά ακουστική περιοχή, εισάγεται η συγκεκριμένη οριακή συνθήκη (Σχήμα 3.18).



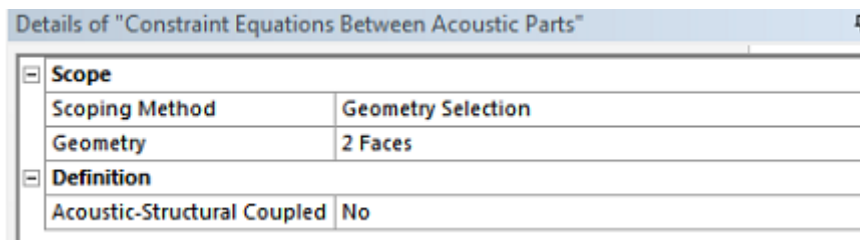
Σχήμα 3.18 Ορισμός χαρακτηριστικών οριακής συνθήκης ορισμού ακουστικής περιοχής

Στη μελέτη που πραγματοποιείται είναι απαραίτητος ο ορισμός τεσσάρων ακουστικών περιοχών (Σχήμα 3.19) στις οποίες περιλαμβάνονται το ρεύμα αέρα, οι δύο επιφάνειες της διάτρητης επιφάνειας και το συνολικό μοντέλο. Ο ορισμός της πρώτης και της τελευταίας ακουστικής περιοχής είναι αναγκαίος προκειμένου να υπολογισθούν μεγέθη σχετικά με την ηχητική ισχύ, τα οποία απαιτούν γνώση της ενεργειακής κατανομής σε όλη την πορεία του ηχητικού κύματος. Όσον αφορά στον προσδιορισμό των δύο επιφανειών της διάτρητης επιφάνειας, χωρίς την επιβολή αυτών των οριακών συνθηκών δεν είναι δυνατή η αναπαράστασή της με τη μέθοδο του ισοδύναμου ρευστού. Αυτό συμβαίνει γιατί όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο μεταβατικός πίνακας αγωγιμότητας  $[Y]$  υπολογίζεται μεταξύ των δύο ακραίων επιφανειών της διάτρητης δομής οι οποίες ορίζονται μέσω της συγκεκριμένης οριακής συνθήκης. Χωρίς αυτήν, το πρόγραμμα αδυνατεί να δώσει λύση που να αντιπροσωπεύει το φυσικό πρόβλημα που έχει περιγραφεί.



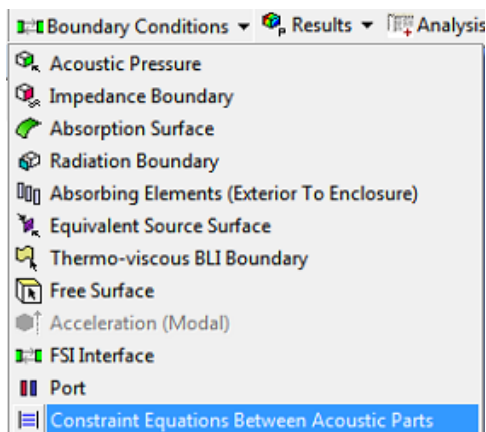
Σχήμα 3.19 Ορισμός επιφανειών επιβολής οριακών συνθηκών ορισμού ακουστικών περιοχών

Ένα σημείο που χρήζει προσοχής είναι ο επαρκής περιορισμός του μοντέλου που εξετάζεται. Στην επιφάνεια επαφής των ακουστικών σωμάτων είναι απαραίτητος ο ορισμός της αντίστοιχης οριακής συνθήκης (Constraint Equations Between Acoustic Parts) (Σχήμα 3.20) με χρήση της οποίας, οι κόμβοι των πεπερασμένων στοιχείων που βρίσκονται στη διεπιφάνεια των σωμάτων δεν έχουν τη δυνατότητα περιστροφής αλλά μόνο την κάθετη και οριζόντια μετακίνηση.

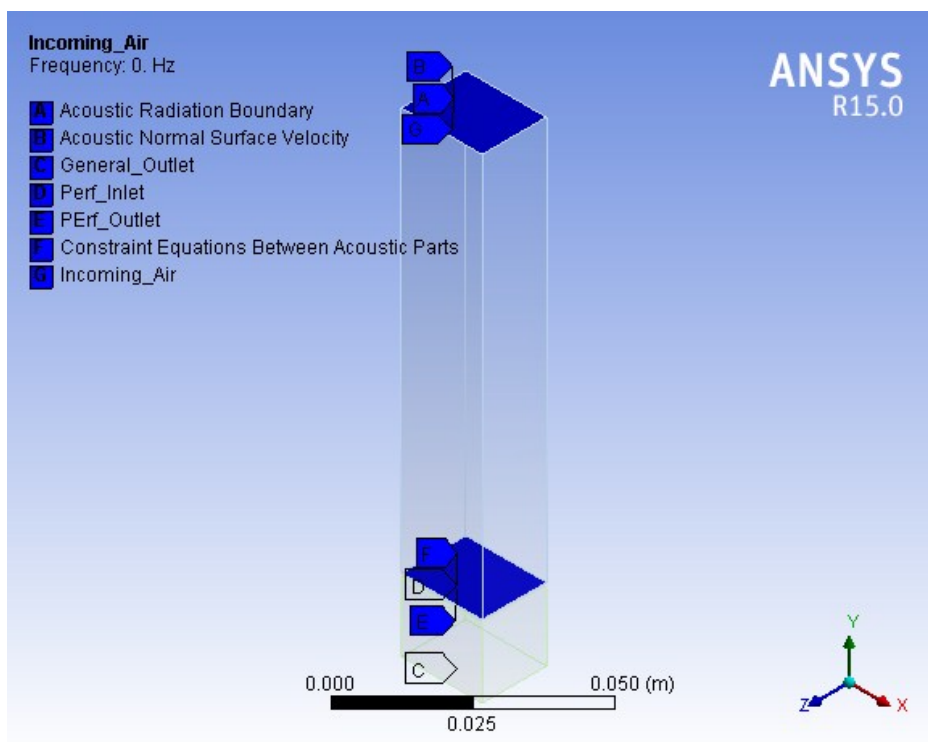


Σχήμα 3.20 Ορισμός χαρακτηριστικών οριακής συνθήκης περιορισμού του υπολογιστικού μοντέλου

Για την επιβολή αυτής της οριακής συνθήκης (Σχήμα 3.21) είναι απαραίτητος μόνο ο προσδιορισμός των διεπιφανειών (Σχήμα 3.22).



Σχήμα 3.21 Επιβολή 3<sup>ης</sup> οριακής συνθήκης



Σχήμα 3.22 Ορισμός επιφανειών επιβολής οριακών συνθηκών περιορισμού του υπολογιστικού μοντέλου

### 3.3 Δημιουργία πλέγματος

Έπειτα από τη γεωμετρική απεικόνιση του υπολογιστικού μοντέλου και τον καθορισμό των οριακών συνθηκών που είναι υπεύθυνες για την αναπαράσταση του φυσικού προβλήματος, ακολουθεί το στάδιο της πλεγματοποίησης, δηλαδή της διακριτοποίησης του ακουστικού τομέα σε πεπερασμένα στοιχεία και κόμβους. Όπως έχει ήδη εξηγηθεί παραπάνω, τα πεπερασμένα στοιχεία που ενδείκνυνται στην ανάλυση ακουστικών προβλημάτων είναι εκείνα που έχουν ως βαθμό ελευθερίας την πίεση.

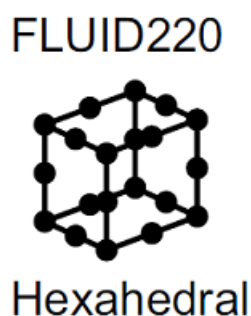
Η ακουστική πίεση σε κάθε κόμβο ενός πεπερασμένου στοιχείου δίνεται:



$$p = \sum_{i=1}^m N_i \cdot p_i \quad (97)$$

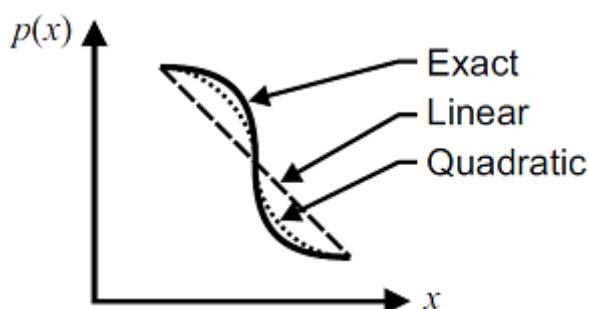
όπου  $N_i$  ένα σύνολο γραμμικών συναρτήσεων σχήματος,  $p_i$  η ακουστική πίεση στον κόμβο  $i$  και  $m$  ο αριθμός των κόμβων που συνθέτουν το πεπερασμένο στοιχείο.

Το λογισμικό Ansys προσφέρει τέσσερις τύπους πεπερασμένων στοιχείων με βαθμούς ελευθερίας την πίεση, που διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς την γεωμετρική τους αναπαράσταση και τον αριθμό των κόμβων που διαθέτουν. Στη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιείται το τριδιάστατο ακουστικό στοιχείο ρευστού FLUID220 εξαεδρικού σχήματος με 20 κόμβους (Σχήμα 3.23).



Σχήμα 3.23 Σχηματική αναπαράσταση πεπερασμένου στοιχείου FLUID220

Το στοιχείο αυτό διαθέτει τετραγωνική συνάρτηση μορφής, γεγονός που σημαίνει πως η πίεσή του περιγράφεται από μία τετραγωνική διατύπωση. Επιδιώκοντας να συγκριθεί η ακρίβεια προσέγγισης της κατανομής πίεσης κατά μήκος μίας διάστασης, πεπερασμένων στοιχείων με γραμμική και τετραγωνική συνάρτηση σχήματος, παρατηρείται η υπεροχή στην ακρίβεια του δεύτερου τύπου στοιχείου (Σχήμα 3.24).

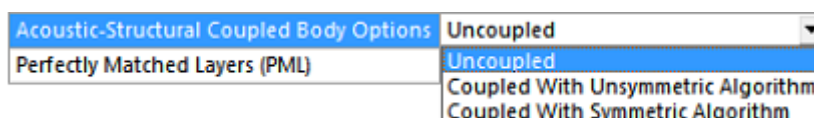


Σχήμα 3.24 Σύγκριση ακρίβειας γραμμικής ή τετραγωνικής συνάρτησης σχήματος σε μία κατανομή πίεσης

Αυτό το σημαντικότατο πλεονέκτημα παρ'όλα αυτά αντισταθμίζεται από το γεγονός πως, η επίλυση ενός μοντέλου με μεγάλο αριθμό κόμβων και κατ'επέκταση μεγάλο αριθμό βαθμών ελευθερίας, έχει υψηλές απαιτήσεις υπολογιστικού χρόνου. Προκειμένου να περιοριστεί η επιρροή αυτής της παραμέτρου αλλά ταυτόχρονα να διασφαλιστεί η απόκτηση αξιόπιστων αποτελεσμάτων, το Ansys προτείνει τη χρήση το λιγότερο έξι πεπερασμένων στοιχείων ανά μήκος κύματος.

Στο στάδιο της αναπαράστασης της δομής του υπολογιστικού μοντέλου διευκρινίστηκε πως η ακουστική ανάλυση στο Ansys δίνει τη δυνατότητα ορισμού ενός σώματος ως ακουστικό σώμα, πράγμα που σημαίνει πως αυτό σχεδιάζεται ως στερεό σώμα αλλά αντιπροσωπεύει μία ακουστική περιοχή, δηλαδή ένα ρευστό. Σε αυτήν την περίπτωση η δημιουργία πλέγματος έχει ως εξής: το Ansys Workbench, ως προεπιλογή, δημιουργεί πλέγμα δομικών πεπερασμένων στοιχείων και η ρύθμιση του ακουστικού σώματος (Acoustic Body Option) θα μετατρέψει αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία σε ακουστικά στοιχεία ρευστού. Ειδικότερα, στη παρούσα ανάλυση, τα στερεά στοιχεία SOLID186 μετατρέπονται σε ακουστικά στοιχεία FLUID220.

Ένα σημείο που σκόπιμα έχει παραληφθεί να σχολιασθεί παραπάνω κατά τον προσδιορισμό των δυνατοτήτων που δίνει η θεώρηση ενός σώματος ως ακουστικό σώμα, είναι η επιλογή ακουστικής – δομικής σύζευξης σωμάτων (Acoustic – Structural Coupled Body Option) (Σχήμα 3.25). Αυτό συνέβει γιατί, η ρύθμιση αυτή χαρακτηρίζει το πλέγμα που αναπτύσσεται για το εκάστοτε ακουστικό σώμα, ζήτημα που δεν είχε ακόμα εισαχθεί.



Σχήμα 3.25 Επιλογές σύζευξης σωμάτων

Οι τρεις επιλογές που δίνονται σχετίζονται με το αν τα πεπερασμένα στοιχεία ρευστού, που χρησιμοποιούνται κατά την μοντελοποίηση, έχουν βαθμούς ελευθερίας πίεσης ή μετατόπισης στους κόμβους τους και αν οι εξισώσεις αλληλεπίδρασης ρευστού – στερεού σώματος διατυπώνονται με χρήση συμμετρικών ή όχι μητρώων. Σύμφωνα με τον τρόπο προσέγγισης του φυσικού προβλήματος, έχει γίνει κατανοητό πως δεν σημειώνεται αλληλεπίδραση ρευστού με στερεό σώμα καθώς όλα τα στερεά σώματα αναπαρίστανται με ορισμό ισοδύναμων ρευστών. Επιπλέον, έχει ήδη εξηγηθεί ο λόγος χρήσης στοιχείων με βαθμούς ελευθερίας πίεσης. Είναι φανερό λοιπόν, πως για την ανάλυση αυτή επιλέγονται αποζευγμένα σώματα (Uncoupled).

Για την ανάπτυξη πλέγματος που εξασφαλίζει την απόκτηση αποτελεσμάτων ακριβείας, καθίσταται απαραίτητη η ρύθμιση ειδικών παραμέτρων σε κάθε ακουστικό σώμα ξεχωριστά. Όσον αφορά το μέγεθος του ρεύματος αέρα, αυτό επηρεάζεται από το μήκος κύματος του μέσου διάδοσης. Η τιμή του μήκους κύματος εκφράζεται συναρτήσει, της ταχύτητας του ήχου στο μέσο διάδοσης και της συχνότητας της διέγερσης ως εξής:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (98)$$

Ο υπολογισμός της τιμής του πραγματοποιείται για την χαμηλότερη συχνότητα διέγερσης που εξετάζεται στην ανάλυση, δηλαδή για 500 Hz και δίνεται:

$$\lambda = \frac{343}{500} = 686 \text{ mm} \quad (99)$$

Το υπολογιστικό πακέτο Ansys προτείνει, το σχεδιασμό του πάχους σώματος που αντιπροσωπεύει τον αέρα, ως το ένα τέταρτο του μήκους κύματος προκειμένου να επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια.

$$\frac{\lambda}{4} = 172 \text{ mm} \quad (100)$$

Το αρχικό σχέδιο που περιλάμβανε το ρεύμα αέρα με ύψος  $100 \text{ mm}$ , δεν λαμβάνει υπόψη του αυτήν την παράμετρο του πλέγματος και για το λόγο αυτό θα τροποποιηθεί στη συνέχεια, με νέο σχεδιασμό του ρεύματος αέρα με ύψος  $180 \text{ mm}$ .

Η αναπαράσταση της διάτρητης επιφάνειας με ορισμό ισοδύναμου ρευστού εισάγει στη διαδικασία της πλεγματοποίησης έναν βασικότατο περιορισμό, ο οποίος δεν σχετίζεται με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλά με την απόκτηση αυτών. Όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, ο υπολογισμός των ζητούμενων μεγεθών πραγματοποιείται με χρήση του μεταβατικού πίνακα αγωγιμότητας ο οποίος προκύπτει μεταξύ των δύο ακραίων θέσεων της διάτρητης δομής. Οι δύο αυτές ακραίες θέσεις προσδιορίζονται από δύο αντίστοιχους κόμβους τοποθετημένους αντιδιαμετρικά στις εξωτερικές επιφάνειες της διάτρητης δομής. Προκειμένου να υπολογισθεί ο πίνακας αγωγιμότητας θα πρέπει οι κόμβοι αυτοί να ανήκουν στις επιφάνειες στις οποίες έχει εφαρμοστεί η οριακή συνθήκη Port.

Στην περίπτωση που η διάτρητη επιφάνεια μοντελοποιηθεί με χρήση περισσότερων από ένα πεπερασμένων στοιχείων, ο παραπάνω περιορισμός υποχρεώνει την εφαρμογή της οριακής συνθήκης Port στις αντισυμμετρικές επιφάνειες όλων των στρωμάτων των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό συμβαίνει γιατί διαφορετικά το πρόγραμμα δεν διαθέτει όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται για τον υπολογισμό του πίνακα αγωγιμότητας. Στην περίπτωση που εξετάζεται, η διάτρητη επιφάνεια έχει πάχος  $1 \text{ mm}$  και επομένως είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για τη διακριτοποίησή της ένα πεπερασμένο στοιχείο καθ' ύψος, προκειμένου να αποφευχθεί η πολυάριθμη χρήση της απαιτούμενης οριακής συνθήκης.

Ένας επιπλέον κανόνας που διευκρινίζεται από το λογισμικό, είναι πως τα ακουστικά μοντέλα θα πρέπει να διαθέτουν το λιγότερο έξι πεπερασμένα στοιχεία ανά μήκος κύματος, για ικανοποιητική ακρίβεια. Όπως γίνεται φανερό, η συνθήκη αυτή θα μπορούσε να έρχεται σε αντίθεση με την παραπάνω παραδοχή που έγινε, δηλαδή την μοντελοποίηση της διάτρητης επιφάνειας με ένα πεπερασμένο στοιχείο. Για το σκοπό αυτό, θα υπολογιστεί το μέγιστο ύψος πεπερασμένου στοιχείου που επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα ανάλυση και αντιστοιχεί στο μικρότερο μήκος κύματος που παρουσιάζεται, δηλαδή για συχνότητα διέγερσης  $4000 \text{ Hz}$ .

$$\lambda = \frac{c_0}{f} = 85.81 \text{ mm} \quad (101)$$

$$\frac{\lambda}{6} = 14.3 \text{ mm} \quad (102)$$

Επομένως όπως γίνεται κατανοητό, ένα πεπερασμένο στοιχείο ύψους 1 mm δεν αντιβαίνει στον παραπάνω περιορισμό.

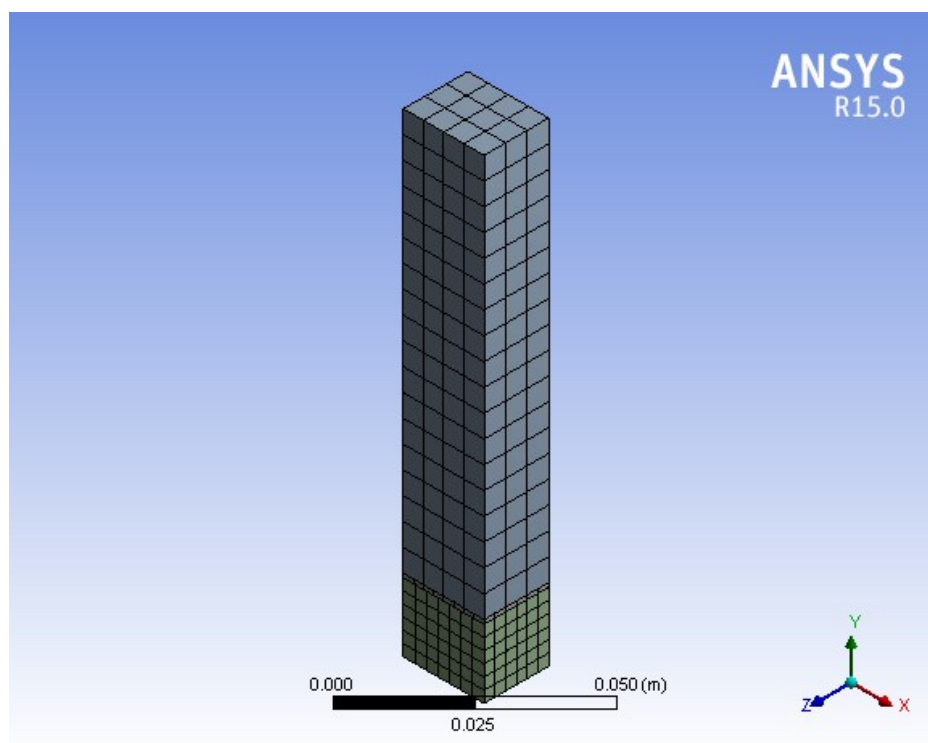
Τέλος, σε ότι αφορά την ανένδοτη επιφάνεια, όπως ήδη έχει αναφερθεί, εκείνη προσομοιώνεται από τα γεωμετρικά σύνορα του πορώδη απορροφητή, γεγονός που στα πλαίσια της πλεγματοποίησης σημαίνει πως δεν ορίζονται ακουστικά στοιχεία στην εξωτερική επιφάνεια του μοντέλου.

Ένα τελευταίο σημείο που χρήζει διευκρίνησης, σχετίζεται με τον ορισμό του πλέγματος. Στον πρωταρχικό σχεδιασμό που πραγματοποιείται στο σημείο αυτό, το πλέγμα που αναπτύσσεται, παράγεται αυτόματα από το ίδιο το λογισμικό χωρίς επιπλέον ρυθμίσεις του χρήστη (Σχήμα 3.26 , Πίνακας 3.1).

**Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά του αυτόματου πλέγματος που διακριτοποιεί την υπολογιστική δομή**

Object Name	Mesh
State	Solved
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
<b>Sizing</b>	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1.e-003 m
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Patch Conforming Options</b>	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
<b>Patch Independent Options</b>	
Topology Checking	Yes
<b>Advanced</b>	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled

Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
<b>Defeaturing</b>	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
<b>Statistics</b>	
Nodes	1662
Elements	235
Mesh Metric	None



Σχήμα 3.26 Γραφική αναπαράσταση πλεγματοποιημένης δομής

### 3.4 Αποτελέσματα πρωταρχικού σχεδιασμού

Το μοντέλο που καταστρώθηκε μέχρι αυτό το σημείο υποβάλλεται σε ακουστική αρμονική ανάλυση, με στόχο να αξιολογηθούν οι ηχοαπορροφητικές δυνατότητες του υλικού που μοντελοποιήθηκε. Προκειμένου να ξεκινήσει η υπολογιστική επίλυση, εισάγονται στο πρόγραμμα, στο μενού των ρυθμίσεων της ανάλυσης (Analysis Settings), οι συχνότητες

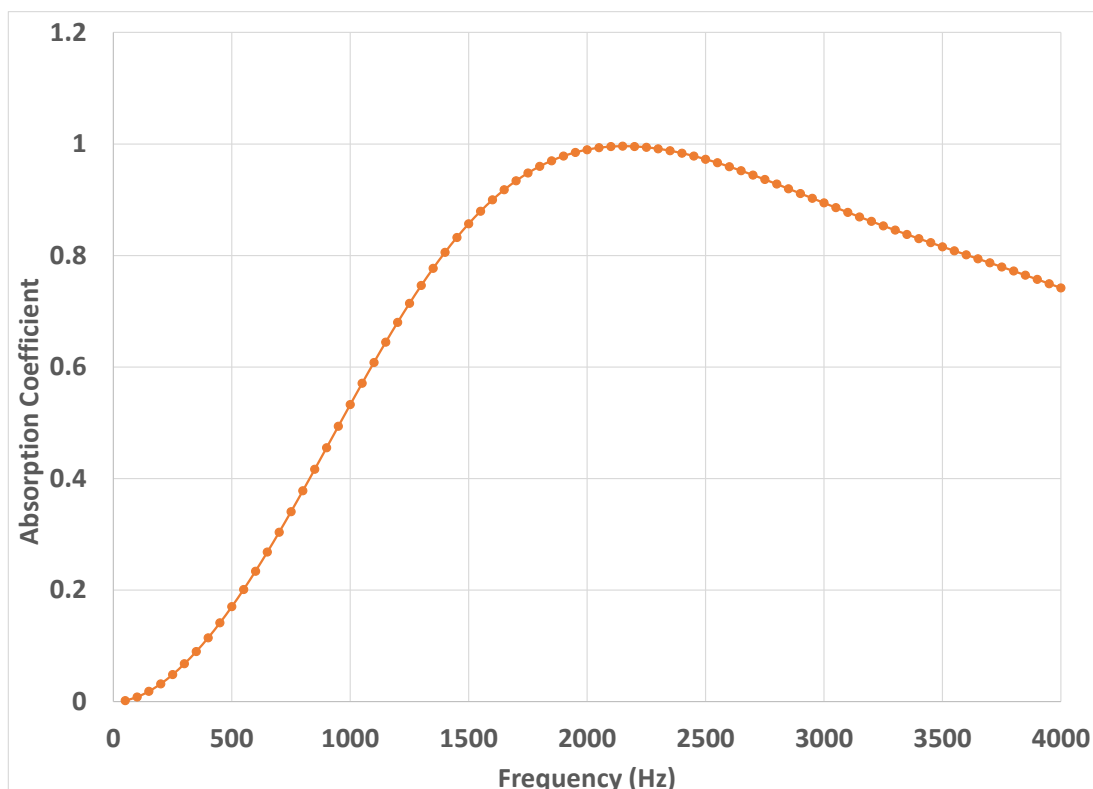
διέγερσης στις οποίες υποβάλλεται το μοντέλο (Σχήμα 1.1, Σχήμα 3.27). Η ανάλυση πραγματοποιείται σε εύρος συχνοτήτων 0 – 4000 Hz με διάστημα 80 βημάτων για ακριβέστερη σύγκλιση αποτελεσμάτων.

Details of "Analysis Settings"	
[-] <b>Options</b>	
Range Minimum	0. Hz
Range Maximum	4000. Hz
Solution Intervals	80
Solution Method	Full
Variational Technology	Program Controlled
[+] <b>Output Controls</b>	
[+] <b>Damping Controls</b>	
[+] <b>Analysis Data Management</b>	

Σχήμα 3.27 Ρυθμίσεις υπολογιστικής ανάλυσης

Τα αποτελέσματα που ζητούνται από το μενού επίλυσης (Solution) του προγράμματος, είναι η ακουστική πίεση (Acoustic Pressure), η στάθμη ηχητικής πίεσης (Acoustic Sound Pressure Level) και ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης που εισάγεται από το μενού Διαγράμματα αποτελεσμάτων ισχύος (Acoustic Power Result Plot).

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί μόνο το διάγραμμα του συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης, καθώς αυτό αποτελεί το βασικό μέγεθος ως προς το οποίο εξετάζεται η συμπεριφορά του μοντέλου που παρουσιάστηκε (Σχήμα 3.28). Στη συνέχεια, θα γίνει προσπάθεια να καταστρωθούν βελτιωμένα μοντέλα, τα οποία θα συγκριθούν με το μοντέλο του πρωταρχικού σχεδιασμού ως προς την αποδοτικότητα της ηχοαπορρόφησης τους. Σκοπός της ανάλυσης είναι να καθορισθεί το υπολογιστικό μοντέλο, το οποίο προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη συμπεριφορά ενός πορώδη απορροφητή με τα χαρακτηριστικά που έχουν ορισθεί.



Σχήμα 3.28 Γραφική απεικόνιση της μεταβολής του συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης για το μοντέλο πρωταρχικού σχεδιασμού

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υπολογιστική ανάλυση, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μαθηματικής μοντελοποίησης που παρουσιάστηκε εκτενώς στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία, η οποία αναμένεται να βελτιωθεί, έπειτα από παραμετρική διερεύνηση των ιδιοτήτων των μοντέλων και αναβάθμιση αυτών.

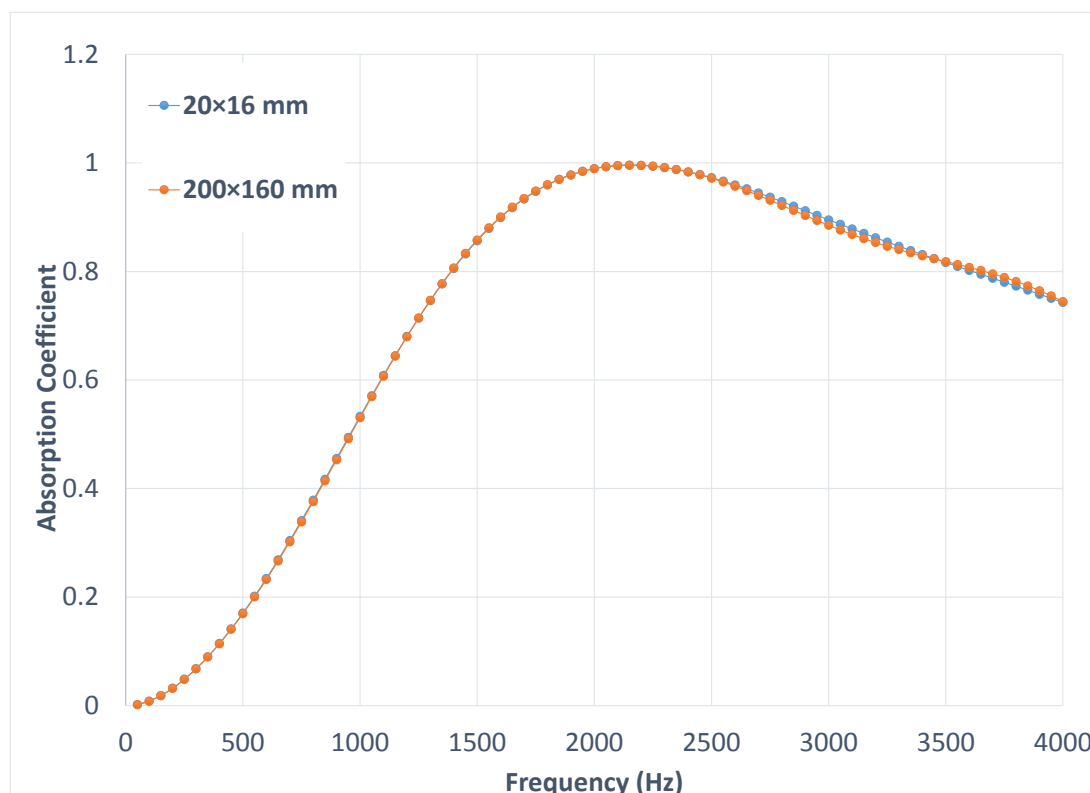
### 3.5 Ανάλυση ευαισθησίας

Η διερεύνηση των ιδιοτήτων του μοντέλου που καταστρώθηκε κατά τον πρωταρχικό σχεδιασμό καθίσταται απαραίτητη, προκειμένου να καταστρωθεί ένα πλήρως παραμετροποιημένο μοντέλο που θα παρουσιάζει την βέλτιστη συμπεριφορά. Προς αυτήν την κατεύθυνση, μελετάται η απόκλιση των αποτελεσμάτων από τα αρχικά, με σταδιακή μεταβολή βασικών γεωμετρικών και υπολογιστικών παραμέτρων του μοντέλου.

#### 3.5.1 Διαστάσεις πλάκας

Στο στάδιο του πρωταρχικού σχεδιασμού, η διάσταση της διάτρητης επιφάνειας και κατ'επέκταση του ρεύματος αέρα και του πορώδη απορροφητή έχει ληφθεί  $20 \times 16 \text{ mm}$ . Στα πλαίσια της μελέτης που πραγματοποιείται, είναι επιθυμητή η μοντελοποίηση μίας διάτρητης επιφάνειας απείρων διαστάσεων. Αυτό σημαίνει πως οι διαστάσεις της επιφάνειας δεν θα πρέπει να είναι συγκρίσιμες με τη διάμετρο διάτρησης. Για την εύρεση της κατάλληλης σχέσης των δύο παραμέτρων, πραγματοποιούνται οι αντίστοιχες αναλύσεις και συγκρίνονται τα τελικά αποτελέσματα.

Το πρόβλημα του αρχικού σχεδίου έχει να κάνει με τις συγκρίσιμες τιμές των μεγεθών που προαναφέρθηκαν, καθώς η επιφάνεια διάστασης  $20 \times 16 \text{ mm}$  φέρει οπές διαμέτρου  $3 \text{ mm}$ .



Σχήμα 3.29 Ανάλυση ευαισθησίας διάστασης πλάκας μοντέλου

Σε δεύτερο στάδιο, θα μελετηθεί η συμπεριφορά μίας πλάκας διάστασης δεκαπλάσιας από την αρχική δηλαδή  $200 \times 160 \text{ mm}$ , με σταθερή τιμή διαμέτρου διάτρησης. Η ανάλυση αυτή έχει σκοπό να διευκρινήσει εάν η απαίτηση που υπάρχει για επιφάνειες απείρων διαστάσεων ικανοποιείται και σε ποια από τις δύο περιπτώσεις.

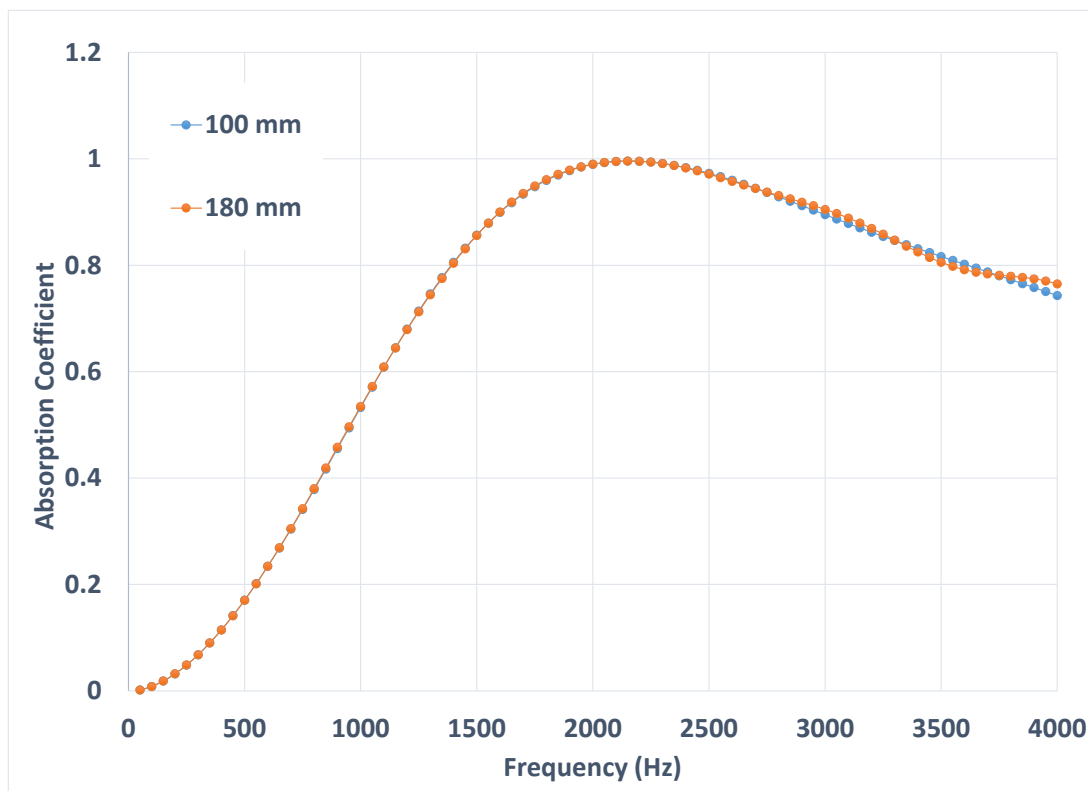
Έπειτα από επισκόπηση των αποτελεσμάτων (Σχήμα 3.29), παρατηρείται πως η απαίτηση πλάκας απείρων διαστάσεων ικανοποιείται και στις δύο σχεδιαστικές περιπτώσεις, καθώς τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από τις δύο μοντελοποιήσεις, δεν διαφέρουν ουσιαστικά καθόλου. Με δεδομένο πως ο δεκαπλασιασμός της διάστασης του αρχικού μοντέλου είναι αρκετός προκειμένου να θεωρηθούν μη συγκρίσιμες οι δύο παραπάνω τιμές παραμέτρων, προκύπτει πως η αρχική διαστασιολόγηση της πλάκας ικανοποιεί την απαίτηση του φυσικού μοντέλου. Για τους παραπάνω λόγους και επιπλέον για τις μικρότερες απαιτήσεις σε υπολογιστικό κόστος, προτιμάται η πραγματοποίηση της προσομοίωσης με την πλάκα μικρότερων διαστάσεων  $20 \times 16 \text{ mm}$ .

### 3.5.2 Ύψος ρεύματος αέρα

Ο πρωταρχικός σχεδιασμός έχει πραγματοποιηθεί με ύψος αέρα  $100 \text{ mm}$ , όμως μετά την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που προηγήθηκε έγινε φανερό πως απαιτείται αλλαγή

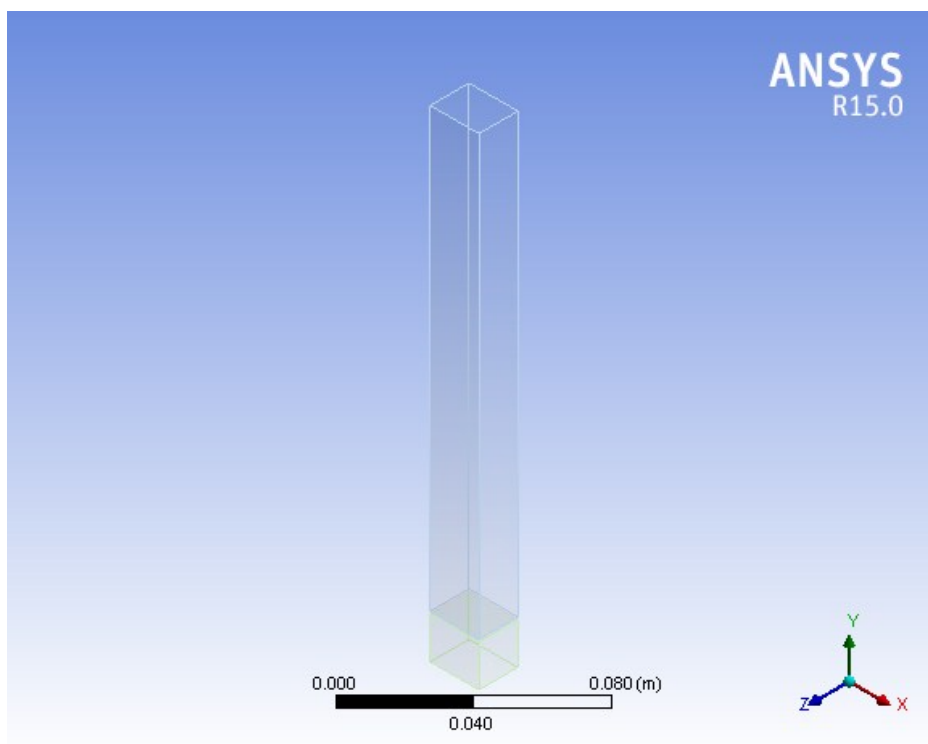


της διάστασης αυτής για την απόκτηση αποτελεσμάτων ακριβείας. Μελετάται λοιπόν, η απόκλιση των αποτελεσμάτων που προκύπτει με βελτίωση του σχεδιασμού (Σχήμα 3.30).



Σχήμα 3.30 Ανάλυση ευαισθησίας ύψους ρεύματος αέρα μοντέλου

Όπως παρατηρείται, οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις δεν εμφανίζουν ουσιαστικές διαφορές, γεγονός που σημαίνει πως ούτε το ύψος του αέρα αποτελεί παράμετρο η οποία επηρεάζει τη συμπεριφορά του υπολογιστικού μοντέλου. Προκειμένου όμως να ικανοποιείται η απαίτηση αναπαράστασης του τομέα που αντιπροσωπεύει τον αέρα με το  $\frac{1}{4}$  του μήκους κύματος για την μικρότερη συχνότητα διέγερσης, η ανάλυση που θα ακολουθήσει θα πραγματοποιηθεί με χρήση του μοντέλου με το μεγαλύτερο μήκος ρεύματος ρευστού, δηλαδή 180 mm. Το ζήτημα της ακρίβειας αφορά τις μικρότερες συχνότητες που εξετάζονται, και για το λόγο αυτό προτιμάται η προσομοίωση του μεγαλύτερου σε ύψος υπολογιστικού μοντέλου (Σχήμα 3.31).



**Σχήμα 3.31** Βελτιωμένο υπολογιστικό μοντέλο έπειτα από ανάλυση ευαισθησίας του ύψους του ρεύματος αέρα

### 3.5.3 Διερεύνηση χαρακτηριστικών πλέγματος

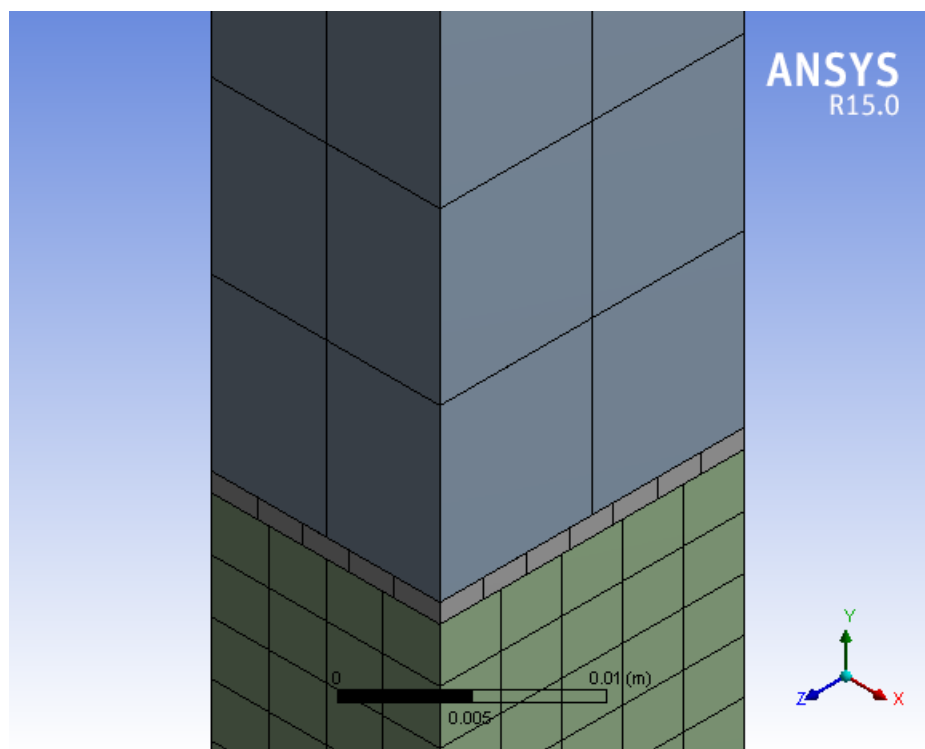
Το πλέγμα που αναπτύχθηκε κατά τη φάση του πρωταρχικού σχεδιασμού, όπως αναφέρθηκε, παράγεται αυτόματα από το πρόγραμμα χωρίς αυτό να λαμβάνει υπόψιν του τυχόν ιδιομορφίες και ειδικές απαιτήσεις του μοντέλου προς εξέταση (Πίνακας 3.2 , Σχήμα 3.32). Προκειμένου να αποκτηθεί μία αρχική λύση μειωμένης ακρίβειας, η χρήση του είναι αποδεκτή, καθώς καθίσταται εύκολη και γρήγορη η αξιολόγηση της ορθότητας των αποτελεσμάτων μίας πρώιμης ανάλυσης. Ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις μοντελοποίησης, καθίσταται αναγκαία η βελτίωση του αρχικού πλέγματος με ρυθμίσεις ειδικά προσαρμοσμένες στις ανάγκες του εκάστοτε μοντέλου.

**Πίνακας 3.2** Χαρακτηριστικά πρωταρχικού πλέγματος

Statistics		
Nodes		2004
Elements		299
Mesh Metric		None

Στα πλαίσια της ανάλυσης που πραγματοποιείται, το αρχικά ανεπτυγμένο πλέγμα παρουσιάζει κάποιες ατέλειες που θα μπορούσαν σε ένα βαθμό να επηρεάσουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Οι ατέλειες αυτές αφορούν την ποιότητα του πλέγματος. Η αξιολόγηση της ποιότητάς του είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων ανάμεσα στις οποίες είναι, η πυκνότητα του πλέγματος, δηλαδή ο συνδυασμός του πλήθους των πεπερασμένων στοιχείων και του μεγέθους αυτών, η λεπτομερής πλεγματοποίηση στα σημεία του μοντέλου

όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια ή ειδικές ρυθμίσεις λόγω γεωμετρίας, καθώς και η αντιστοίχιση και συσχετισμός των στοιχείων του πλέγματος που ανήκουν σε διαφορετικά σώματα.



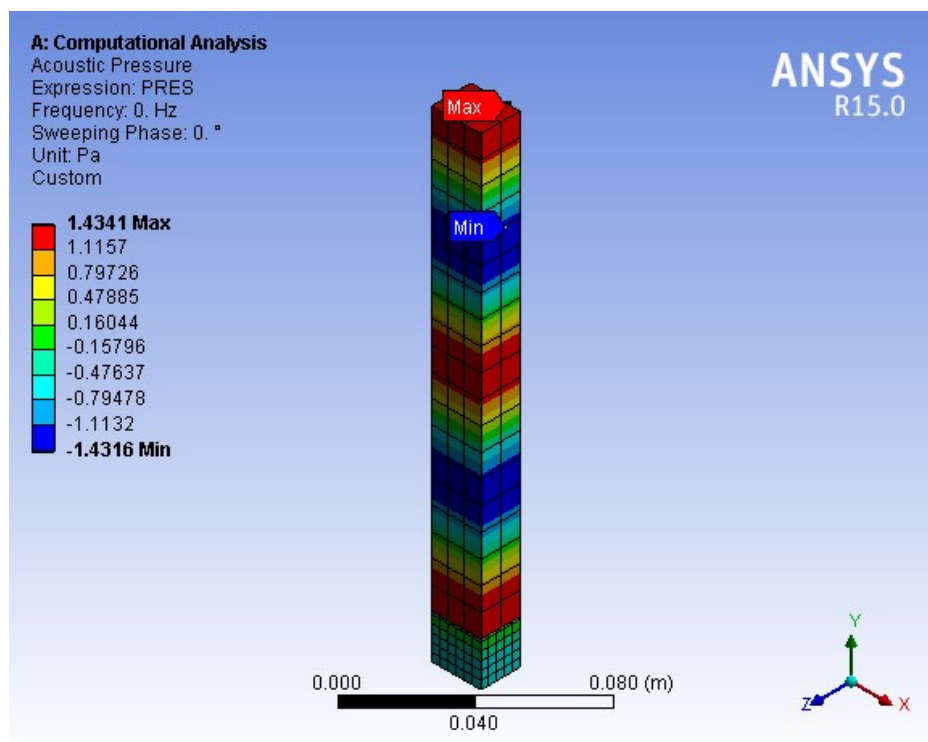
Σχήμα 3.32 Ατέλειες πλέγματος πρωταρχικού σχεδιασμού

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, όπως είναι φανερό, η ποιότητα του αρχικού πλέγματος αμφισβητείται και για το λόγο αυτό θα γίνει προσπάθεια βελτίωσής του (.

Στο σημείο αυτό, σε αντίθεση με τη μέχρι τώρα αντιμετώπιση, η σύγκριση των μοντέλων διαφορετικής πυκνότητας πλεγματος, θα γίνει με βάση τα αποτελέσματα της ακουστικής πίεσης που προκύπτουν από τον εκάστοτε σχεδιασμό. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την προσπάθεια βελτίωσης του υπολογιστικού μοντέλου, μελετάται το ίδιο ακριβώς πρόβλημα. Αν το κριτήριο σύγκλισης του πλέγματος παρέμενε και εδώ το διάγραμμα της ηχοαπορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας, δεν θα παρατηρούνταν διαφορές καθώς η τιμή της ενέργειας παραμένει σταθερή λόγω του ότι αποτελεί συνάρτηση της πίεσης και της ταχύτητας των μορίων του μέσου.

$$\alpha_{\alpha} = \frac{I_{\alpha}}{I_i} = \frac{p_{\alpha} \cdot v_{\alpha}}{p_i \cdot v_i} \quad (103)$$

Αντίθετα, η εξέταση των αποτελεσμάτων της ακουστικής πίεσης (Σχήμα 3.33) θα δώσει μία σαφή εικόνα για την ποιότητα του πλέγματος και κατ'έπекταση την ακρίβεια που επιτυγχάνεται στον υπολογισμό.



Σχήμα 3.33 Αποτελέσματα ακουστικής πίεσης πρωταρχικού πλέγματος

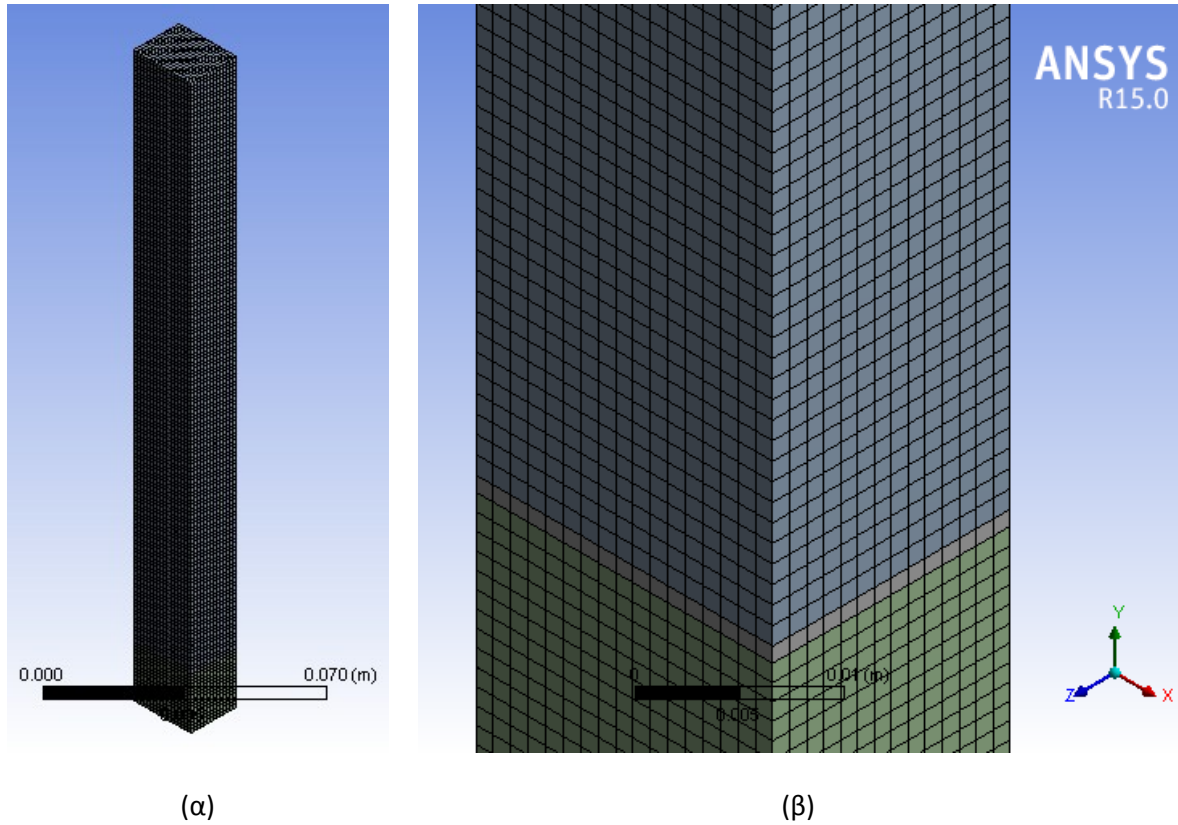
Πρώτη ρύθμιση που εισάγεται στο μενού πλέγματος (Mesh) είναι ο έλεγχος του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων ανά σώμα (Body Sizing). Το πρόγραμμα μέσω αυτής της επιλογής δίνει τη δυνατότητα ορισμού του σώματος του οποίου το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί ρύθμιση. Στο σημείο αυτό, καθορίζεται ενιαίο μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων και στα τρία σώματα από τα οποία αποτελείται το συνολικό μοντέλο. Η τιμή του ορίζεται λαμβάνοντας υπόψιν δύο βασικούς περιορισμούς που έχουν αναφερθεί παραπάνω και είναι οι εξής:

- Το μέγεθος του στοιχείου που θα διακριτοποιήσει την διάτρητη επιφάνεια θα πρέπει να είναι ίσο με το πάχος της δηλαδή  $1\text{ mm}$ , προκειμένου να αποφευχθεί η χρήση αλλεπάλληλων οριακών συνθηκών ορισμού επιφανειών εισόδου και εξόδου ηχητικής ενέργειας (Port).
- Σε διάστημα ενός μήκους κύματος που αντιστοιχεί στην υψηλότερη συχνότητα, θα πρέπει να περιλαμβάνονται τουλάχιστον έξι πεπερασμένα στοιχεία, από όπου προκύπτει ο περιορισμός πως το στοιχείο θα πρέπει να έχει μέγιστο μέγεθος πλευράς  $14.3\text{ mm}$ .

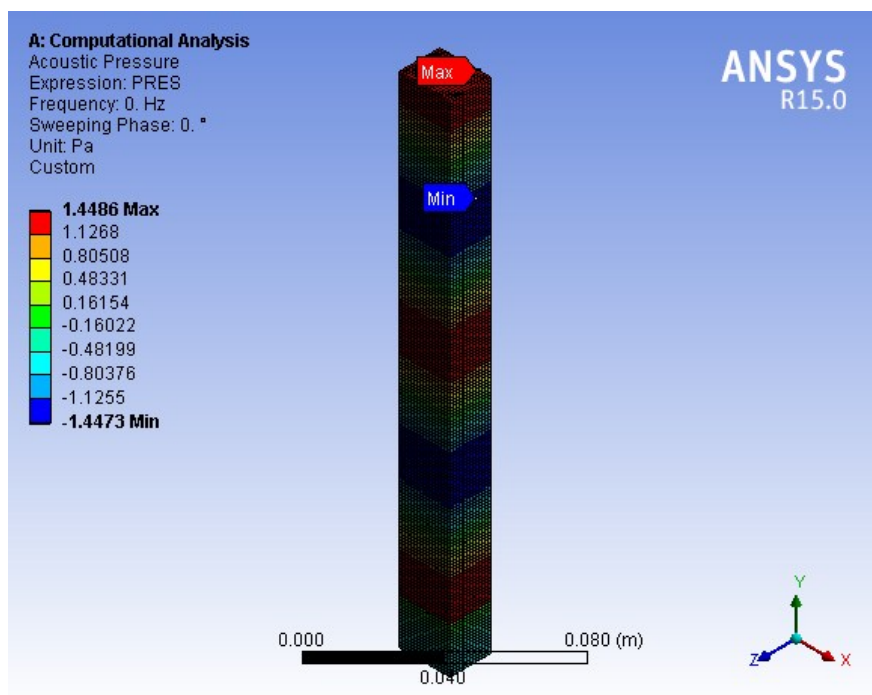
Έπειτα από συνδυασμό των δύο παραπάνω περιορισμών χρησιμοποιούνται πεπερασμένα στοιχεία μεγέθους  $1\text{ mm}$ . Η ποιότητα του πλέγματος βελτιώνεται σημαντικά μετά την εισαγωγή του παραπάνω ελέγχου μεγέθους στοιχείων και τα χαρακτηριστικά του νέου πλέγματος παρουσιάζονται στη συνέχεια (Πίνακας 3.3 , Σχήμα 3.34).

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά 1ου βελτιωμένου πλέγματος

Statistics		
Nodes	176133	
Elements	39508	
Mesh Metric	None	



Σχήμα 3.34 Αναπαράσταση (α) πλέγματος 1<sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου και (β) λεπτομέρεια



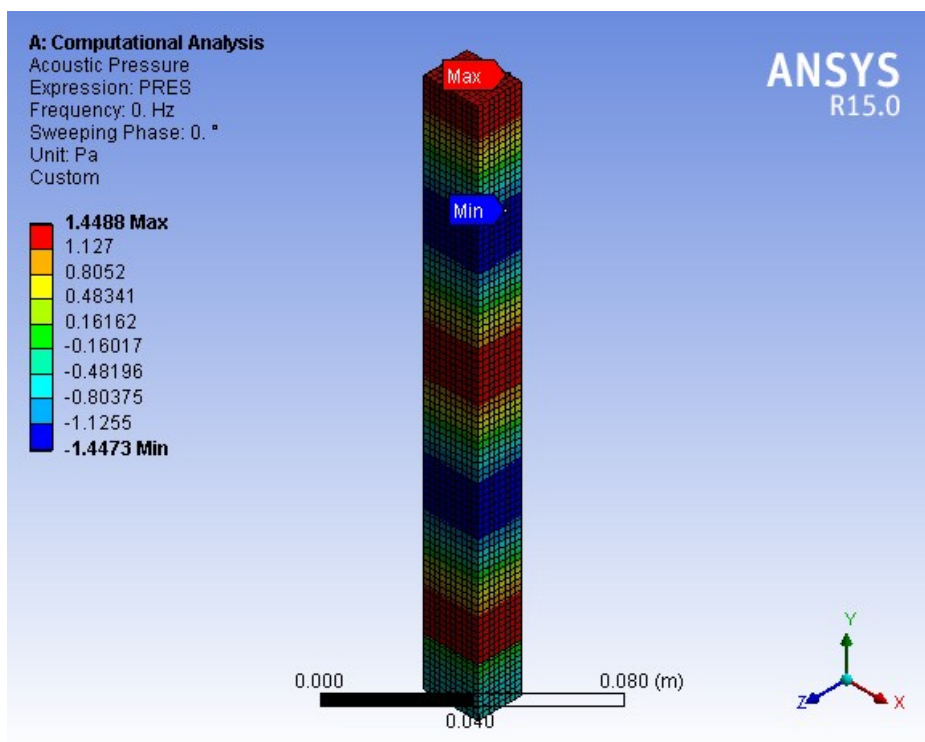
Σχήμα 3.35 Αποτελέσματα ακουστικής πίεσης 1<sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα δύο ακραία (Σχήμα 3.35), ως προς την ποιότητα πλεγματοποίησης, μοντέλα, επιβεβαιώνεται η αρχική αμφιβολία για την ακρίβεια του μοντέλου πρωταρχικού σχεδιασμού. Ακολουθεί λοιπόν διερεύνηση της σύγκλισης του πλέγματος, έτσι ώστε να παρατηρείται μηδενική απόκλιση στα αποτελέσματα. Έπειτα από την βελτίωση της ποιότητας του πλέγματος, προκύπτει το πρόβλημα της ύπαρξης ενός υπολογιστικού μοντέλου που παρουσιάζει μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο. Προς αυτήν την κατεύθυνση, γίνεται προσπάθεια να μειωθεί ταυτόχρονα, ο αριθμός των στοιχείων που συνθέτουν το πλέγμα.

Πίνακας 3.4 Χαρακτηριστικά 2<sup>ου</sup> βελτιωμένου πλέγματος

Statistics		
Nodes		165867
Elements		36864
Mesh Metric		None

Εισάγεται η εντολή `Multizone` που ορίζει τον τμηματικό σχηματισμό του πλέγματος σε πολλαπλές ζώνες, οι οποίες προσδιορίζονται από τις επιφάνειες των σωμάτων. Η τετραγωνική διατομή των επιμέρους σωμάτων βοηθά τον ομοιόμορφο σχηματισμό του πλέγματος. Η εισαγωγή αυτής της συνθήκης, παρά το γεγονός ότι δεν επιφέρει καμία αλλαγή στη μορφή του πλέγματος, μειώνει σε ένα βαθμό τον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων που συνθέτουν το υπολογιστικό μοντέλο (Πίνακας 3.4), καθώς η κατανομή τους σε αυτό γίνεται με διαφορετικό τρόπο απ’ ότι προηγουμένως.



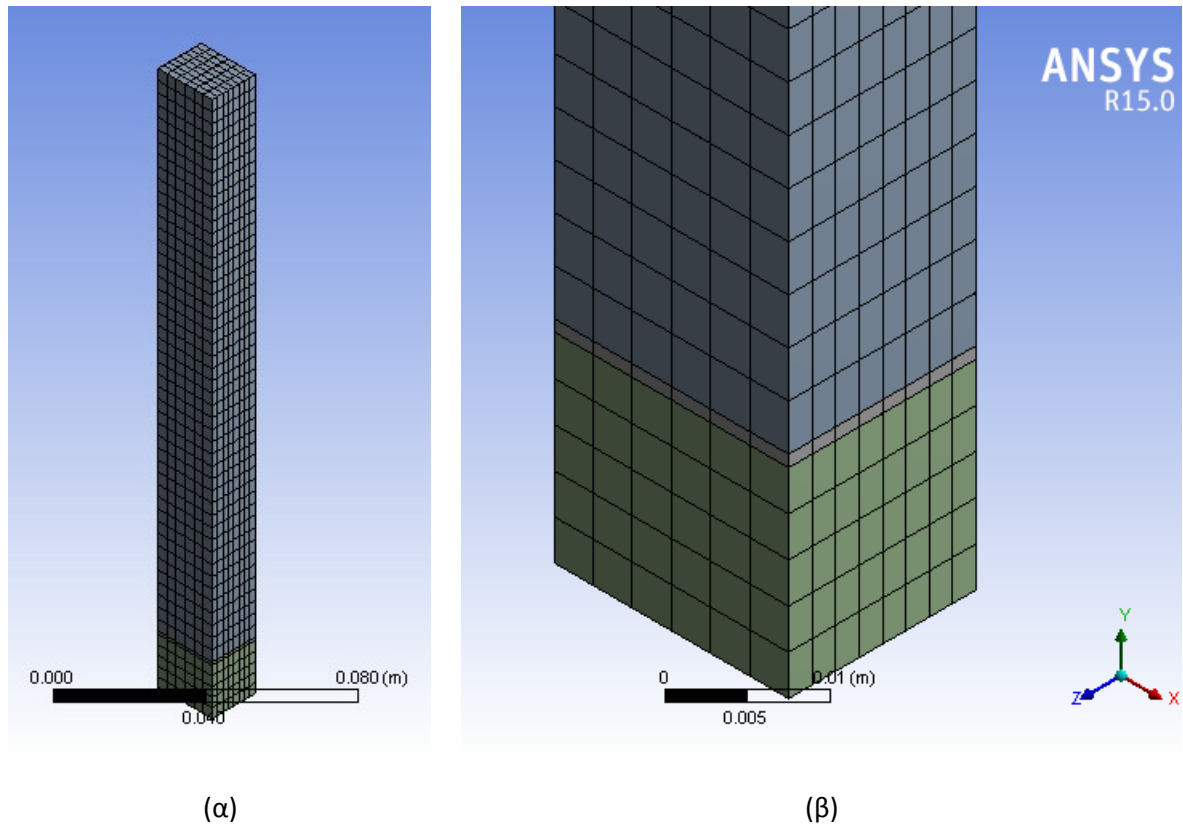
Σχήμα 3.36 Αποτελέσματα ακουστικής πίεσης 2<sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου

Αν και τα αποτελέσματα παραμένουν σταθερά (Σχήμα 3.36), παρ'όλα αυτά, μία μείωση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων κατά 3% δεν είναι αρκετή ώστε να επέλθει σημαντική βελτίωση στο υπολογιστικό κόστος. Για το λόγο αυτό θα ακολουθήσει μία ανάλυση ευαισθησίας πλέγματος, προκειμένου να βρεθεί ο κατάλληλος αριθμός πεπερασμένων στοιχείων που μοντελοποιεί με ικανοποιητική ακρίβεια και ταχύτητα το υπό εξέταση μοντέλο.

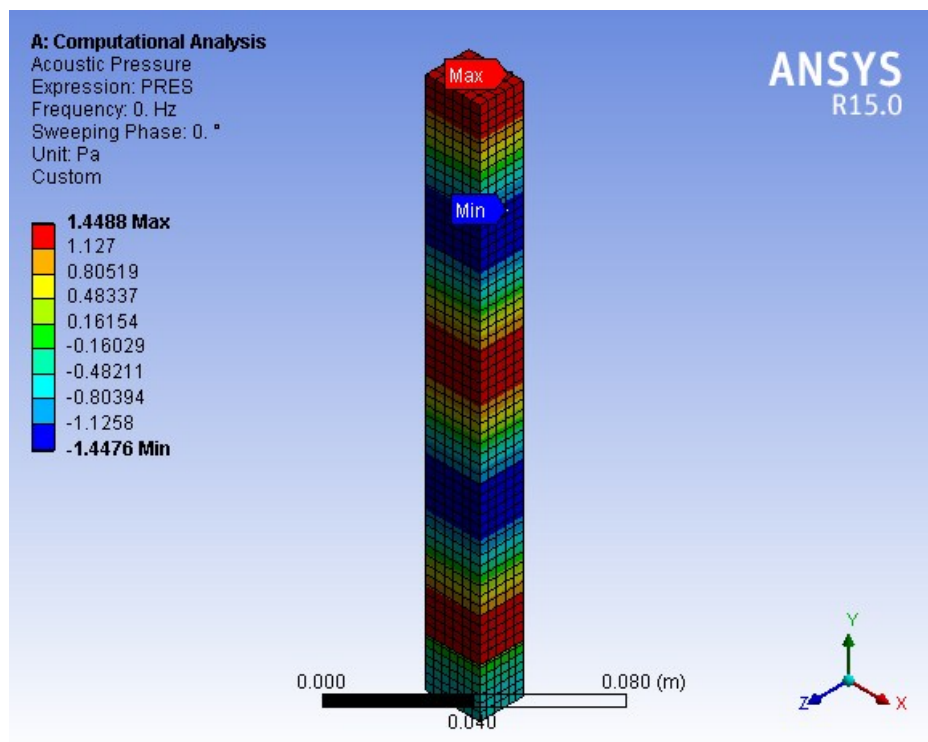
Το επόμενο μοντέλο, περιέχει περισσότερες ρυθμίσεις προκειμένου να ελεγχθεί ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που απαιτούνται. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το  $\frac{1}{4}$  των πεπερασμένων στοιχείων που συνέθεσαν το 1<sup>ο</sup> βελτιωμένο μοντέλο. Προφανώς, προκειμένου να ικανοποιούνται οι βασικές απαιτήσεις για την ανάπτυξη πλέγματος, τα πεπερασμένα στοιχεία υποτετραπλασιάζονται μόνο στα σώματα που αναπαριστούν το ρεύμα αέρα και τον πορώδη απορροφητή (Πίνακας 3.5 , Σχήμα 3.37).

Πίνακας 3.5 Χαρακτηριστικά 3<sup>ου</sup> βελτιωμένου μοντέλου

Statistics	
Nodes	12791
Elements	2496
Mesh Metric	None



Σχήμα 3.37 Αναπαράσταση (α) πλέγματος 3<sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου και (β) λεπτομέρεια



Σχήμα 3.38 Αποτελέσματα ακουστικής πίεσης 3<sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου

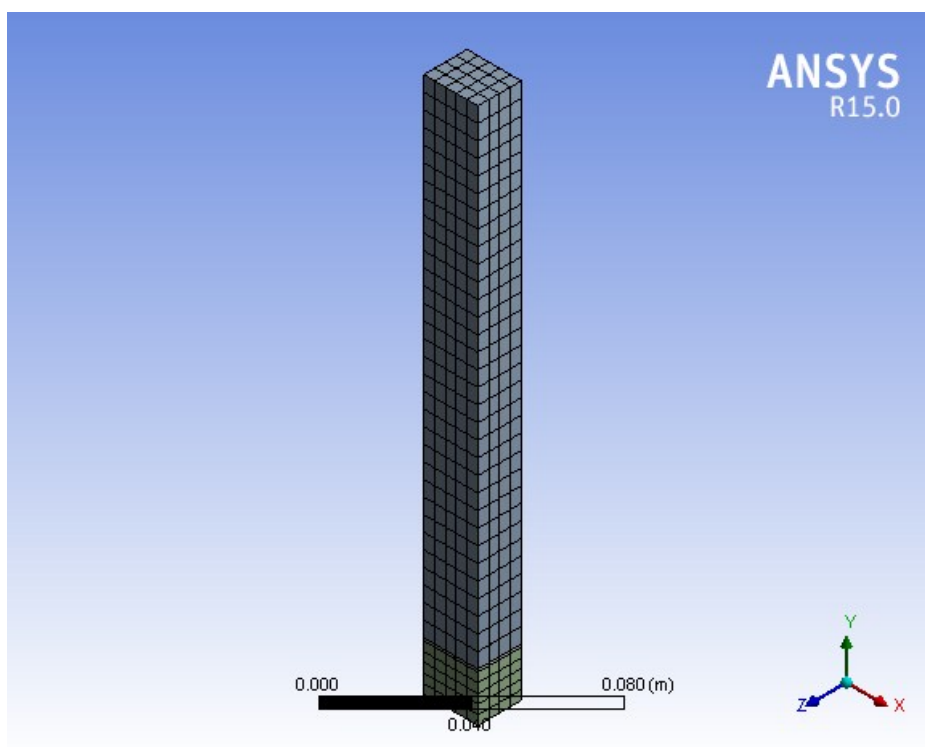


Παρατηρώντας τα νέα αποτελέσματα (Σχήμα 3.38), είναι φανερό πως μία μείωση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων κατά 93.5 % δεν μειώνει την ακρίβεια του υπολογιστικού μοντέλου και ταυτόχρονα μειώνει κατά πολύ τον χρόνο προσομοίωσης.

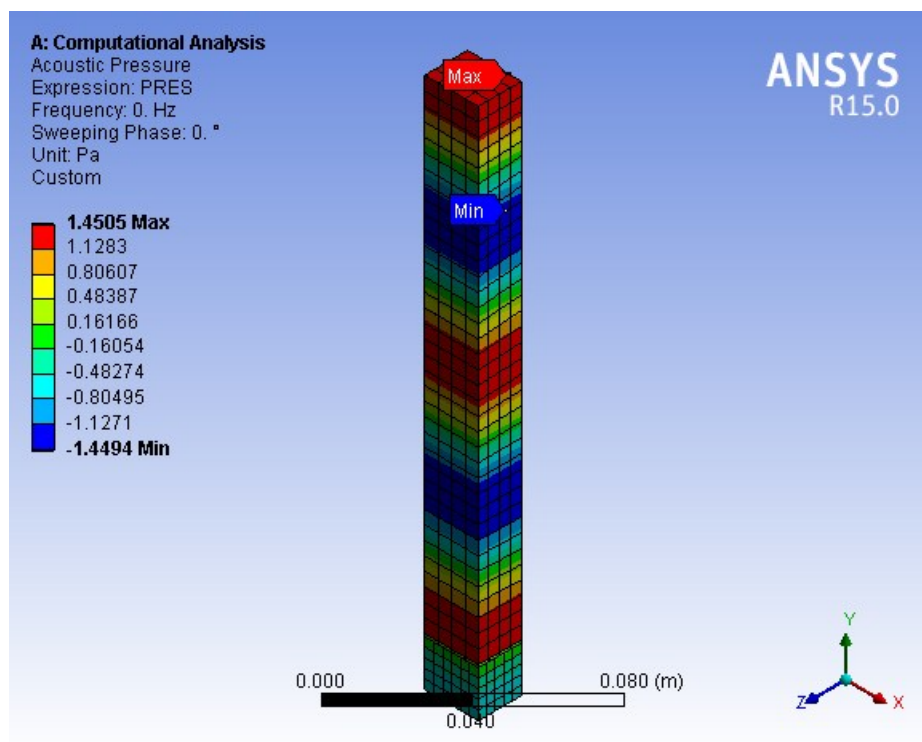
Καταστρώνεται ένα επιπλέον υπολογιστικό μοντέλο, με ποσοστό μείωσης πεπερασμένων στοιχείων 97.7 % (Πίνακας 3.6 , Σχήμα 3.39). Το μοντέλο αυτό, όπως φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 3.40), παύει να είναι ακριβές καθώς τα αποτελέσματα της ακουστικής πίεσης που προκύπτουν αποκλίνουν σημαντικά από τα πραγματικά.

Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά 4<sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου

Statistics		
Nodes		4379
Elements		760
Mesh Metric		None



Σχήμα 3.39 Λεπτομερής αναπαράσταση 4<sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου

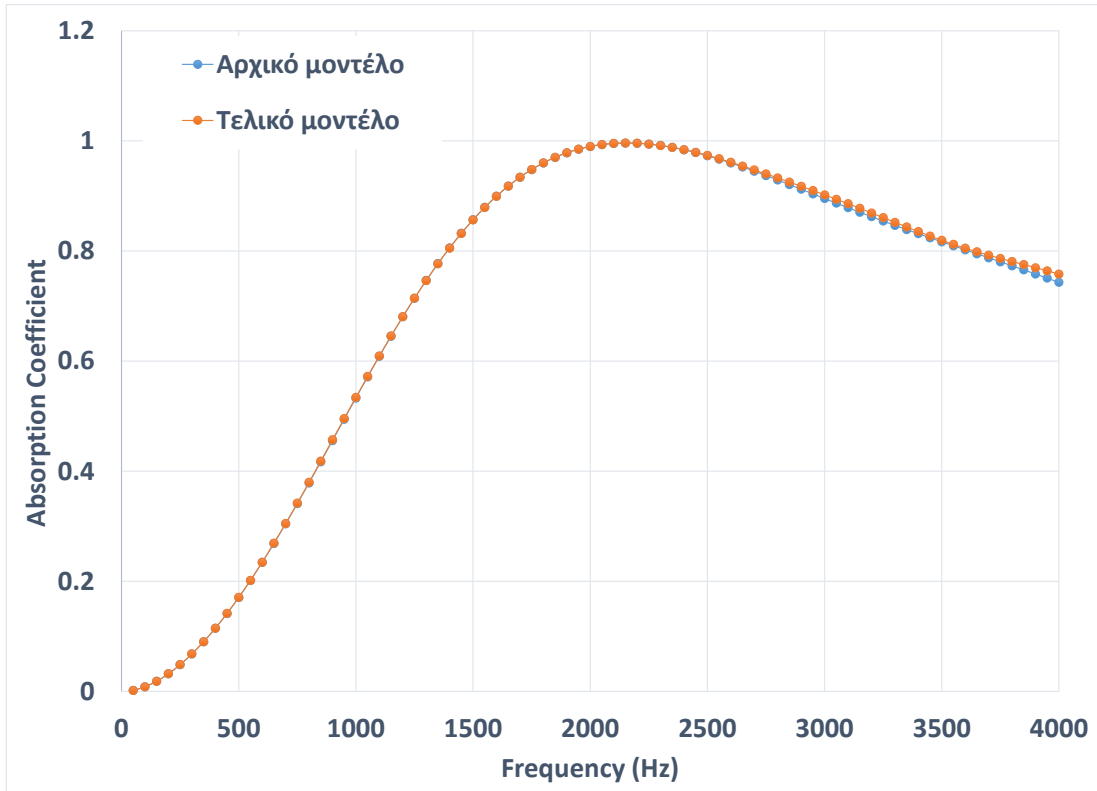


Σχήμα 3.40 Αποτελέσματα ακουστικής πίεσης 4<sup>ου</sup> βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου

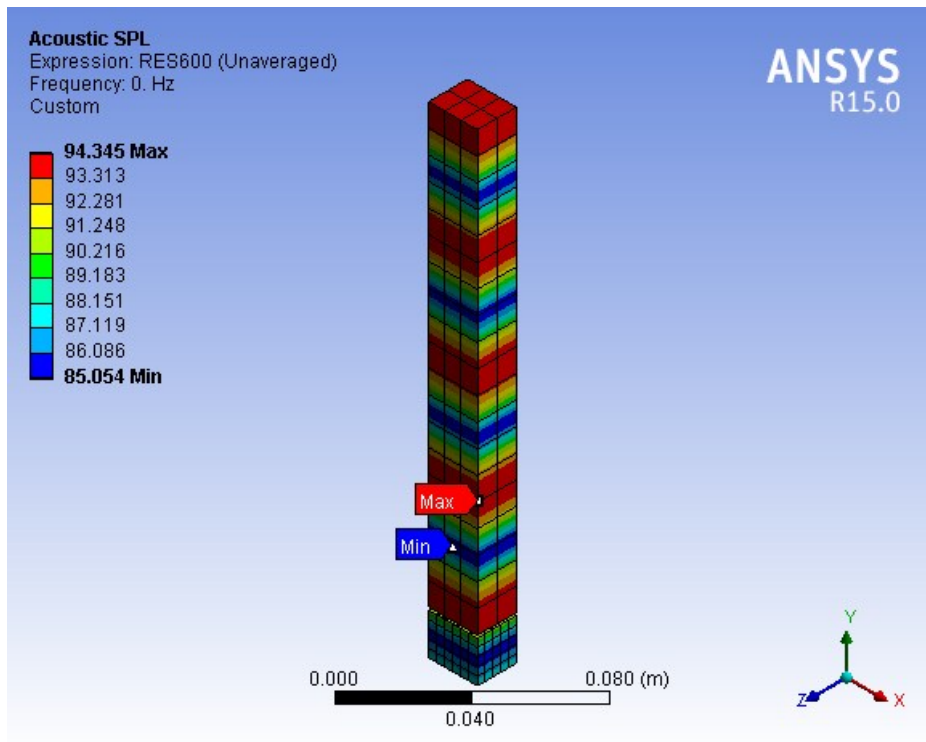
Επομένως, έπειτα από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, το 3<sup>ο</sup> βελτιωμένο υπολογιστικό μοντέλο είναι αυτό που συνδυάζει όλα τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για μία προσομοίωση με ακρίβεια και μειωμένο υπολογιστικό κόστος. Σημειώνεται ότι ο χρόνος που απαιτήθηκε για την απόκτηση αποτελεσμάτων μειώθηκε κατά 60 % μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> υπολογιστικού μοντέλου.

### 3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων αρχικού και τελικού σχεδιασμού

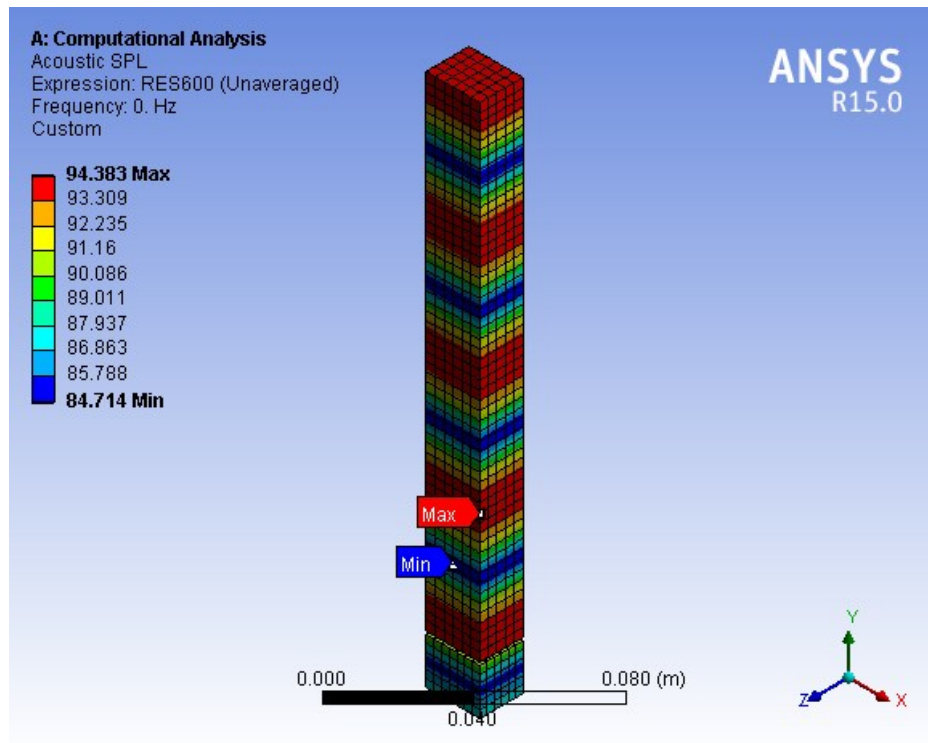
Σύμφωνα με όσα έχουν προηγηθεί, αναμένεται τα αποτελέσματα της ηχοαπορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας να μην αλλάξουν σημαντικά μεταξύ αρχικού και τελικού υπολογιστικού μοντέλου (Σχήμα 3.41), καθώς η ακουστική ενέργεια παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την ποιότητα του πλέγματος που αναπτύσσεται. Οι διαφορές που έχουν εντοπιστεί μετά τη διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας αφορούν την ακουστική πίεση των μορίων των σωμάτων, που παρουσιάστηκε νωρίτερα, και τη στάθμη ηχητικής πίεσης, που ακολουθεί (Σχήμα 3.42 , Σχήμα 3.43).



Σχήμα 3.41 Σύγκριση ηχοαπορροφητικής συμπεριφοράς πρωταρχικού και βελτιωμένου υπολογιστικού μοντέλου



Σχήμα 3.42 Στάθμη ηχητικής πίεσης πρωταρχικού υπολογιστικού μοντέλου



Σχήμα 3.43 Στάθμη ηχητικής πίεσης τελικού υπολογιστικού μοντέλου

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟ**



Έως το σημείο αυτό, έχουν παρουσιασθεί δύο μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της ακουστικής συμπεριφοράς τριδιάστατων δομών. Το πρώτο είναι το μοντέλο αρχικού σχεδιασμού και το δεύτερο το τελικό, που προέκυψε έπειτα από ανάλυση ευαισθησίας, τόσο των γεωμετρικών παραμέτρων του μοντέλου όσο και των χαρακτηριστικών του πλέγματός του. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, η οποία εστιάζει αρχικά στην ακριβή μοντελοποίηση και στη συνέχεια στην εύρεση εκείνης της δομής που επιτυγχάνει μέγιστη ακουστική απορρόφηση, είναι καίριας σημασίας η διερεύνηση της συμπεριφοράς της δομής για ποικίλλες τιμές των παραμέτρων που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά των επιμέρους σωμάτων που την αποτελούν. Σύμφωνα με προηγούμενες αναφορές, οι παράμετροι αυτοί είναι τρεις:

- Ακτίνα διάτρησης και
- Ποσοστό κενού χώρου διάτρητης επιφάνειας καθώς και
- Αντίσταση ροής πορώδη απορροφητή

Σκοπός είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης της κάθε παραμέτρου στη συμπεριφορά του συνολικού μοντέλου, καθώς και ο ιδανικός συνδυασμός τους για βέλτιστο αποτέλεσμα ηχοαπορρόφησης.

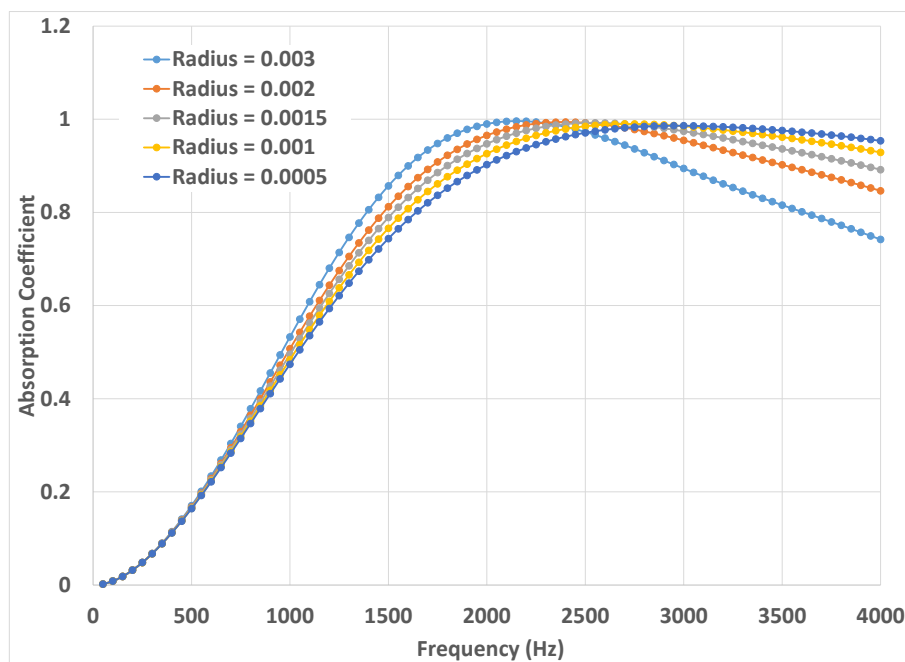
#### **4.1 Επίδραση ιδιοτήτων μικροδομής διάτρητης επιφάνειας**

Τα χαρακτηριστικά της διάτρητης επιφάνειας καθορίζονται με προσδιορισμό των τιμών των δύο πρώτων παραμέτρων, της ακτίνας διάτρησης σε συνδυασμό με το ποσοστό κενού χώρου διάτρησης. Ακολουθεί διερεύνηση του συντελεστή ηχοαπορρόφησης, για μεταβολή της κάθε παραμέτρου ξεχωριστά.

##### 4.1.1 Ακτίνα διάτρησης

Οι τιμές που μελετώνται για την ακτίνα των οπών, καλύπτουν φάσμα διάτρησης και μικροδιάτρησης και είναι αντίστοιχα οι εξής: [0.0005, 0.001, 0.0015, 0.002, 0.003], [0.0001, 0.0002, 0.0005, 0.001, 0.002] [m]. Η διερεύνηση, σε πρώτο στάδιο, θα πραγματοποιηθεί για ποσοστό κενού χώρου 15% και αντίσταση ροής πορώδη απορροφητή 70000 *rayl/m*.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.1) παρατηρείται η μεταβολή της συμπεριφοράς στην ηχοαπορρόφηση της διάτρητης επιφάνειας, καθώς μεταβάλλονται οι ακτίνες διάτρησης για σταθερό ποσοστό κενού χώρου, ίσο με 15%.



Σχήμα 4.1 Διερεύνηση συμπεριφοράς με μεταβολή της ακτίνας διάτρησης για ποσοστό κενού χώρου 15%

Όπως είναι φανερό, η συμπεριφορά του διάτρητου απορροφητή διαφοροποιείται εξαρτώμενη, τόσο από την ακτίνα διάτρησης όσο και από τις τιμές της συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται τρεις περιοχές συχνοτήτων στις οποίες η αύξηση της ακτίνας διάτρησης, επιφέρει παρόμοια ακουστική συμπεριφορά στον απορροφητή.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, οι τρεις περιοχές συχνοτήτων είναι:

- [0,500]
- [550,2500]
- [2550,4000]

Στην πρώτη περιοχή, ο διάτρητος απορροφητής παρουσιάζει τον ίδιο συντελεστή απορρόφησης ανεξάρτητα από την μεταβολή της ακτίνας των οπών.

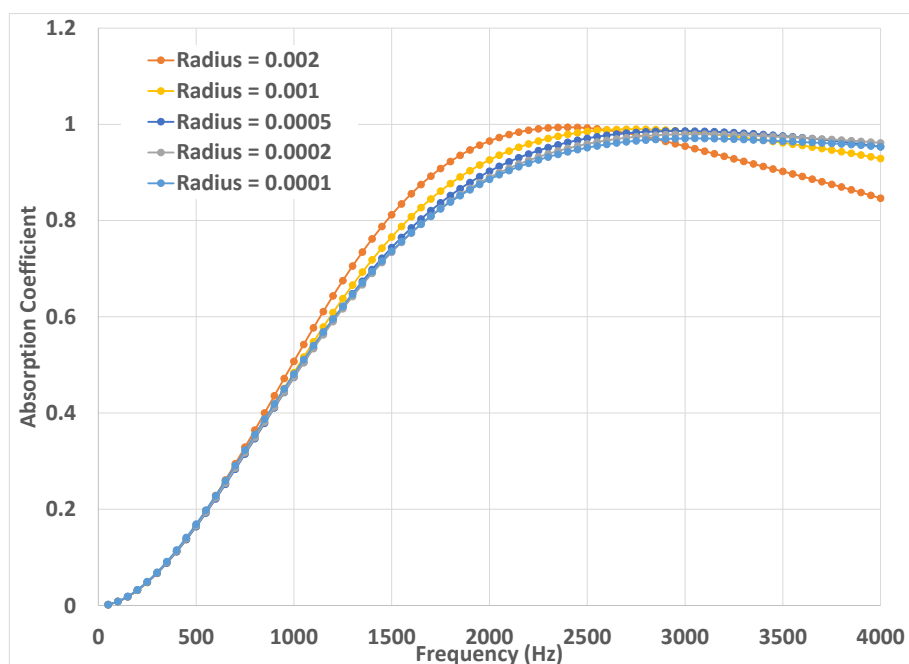
Στη δεύτερη περιοχή συχνοτήτων, παρατηρείται πως μεγαλύτερο συντελεστή απορρόφησης παρουσιάζει η επιφάνεια με τις μεγαλύτερες ακτίνες οπών.

Ενώ στην τελευταία περιοχή, η συμπεριφορά του απορροφητή αντιστρέφεται, και αποτελεσματικότερος καθίσταται αυτός με την μικρότερη ακτίνα διάτρησης.

Στην περίπτωση μικροδιάτρησης, όπως προκύπτει από το σχετικό διάγραμμα (Σχήμα 4.2), οι παραπάνω τρεις περιοχές παρουσιάζονται ελαφρώς μετατοπισμένες. Πιο συγκεκριμένα, τα νέα εύρη τιμών διαμορφώνονται ως εξής:

- [0,750]
- [800,2750]
- [2800,4000]





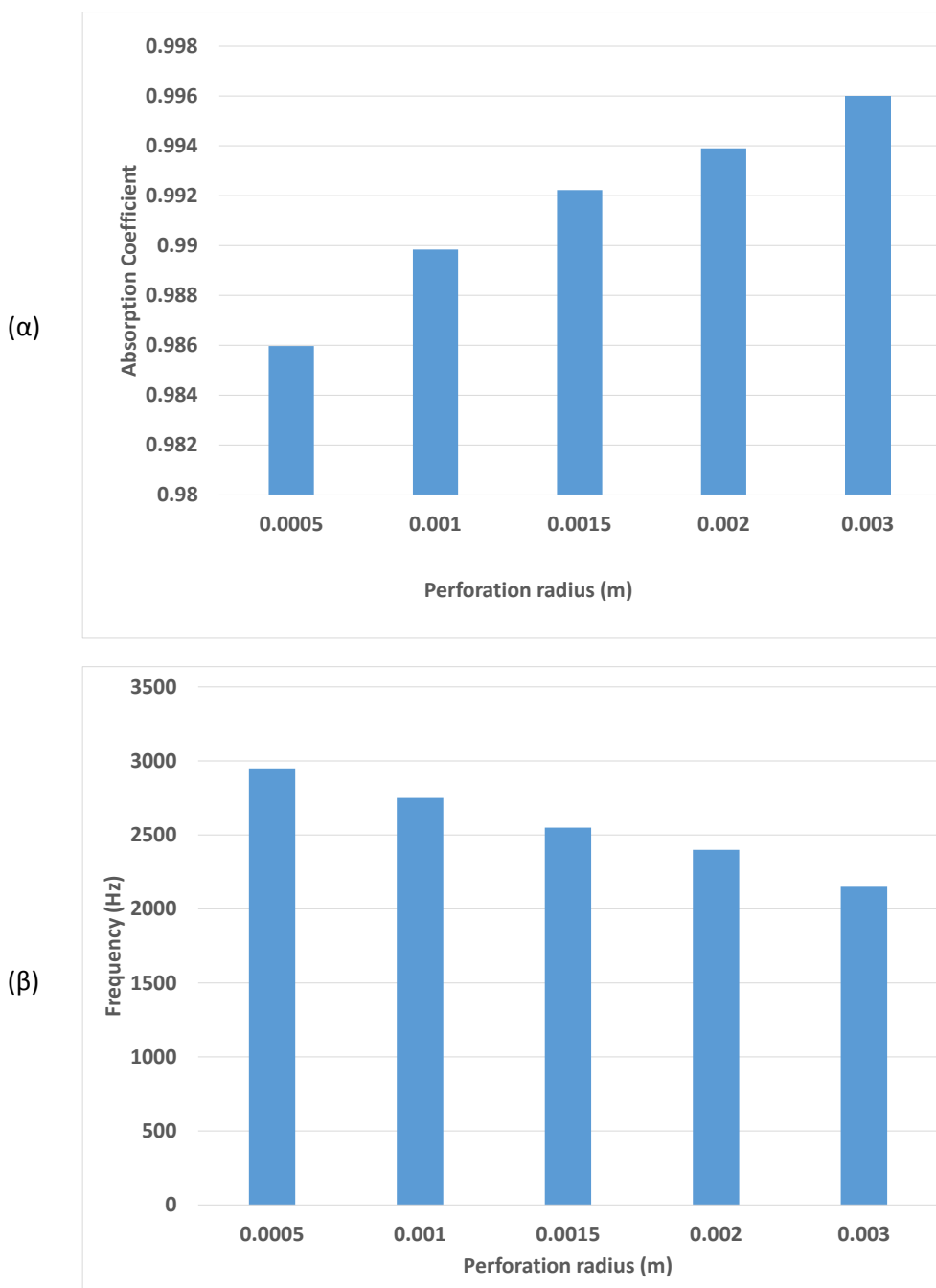
Σχήμα 4.2 Διερεύνηση συμπεριφοράς με μεταβολή της ακτίνας μικροδιάτρησης για ποσοστό κενού χώρου 15%

Κατ' απόλυτη αντιστοιχία, στην πρώτη περιοχή, η συμπεριφορά των απορροφητών διαφορετικής ακτίνας διάτρησης είναι παρόμοια. Στη συνέχεια, οι απορροφητές με μεγάλες ακτίνες οπών είναι αποτελεσματικότεροι, ενώ στην τρίτη περιοχή συχνοτήτων οι μικρές ακτίνες οπών καθιστούν τη συμπεριφορά του απορροφητή ικανοποιητικότερη.

Ένα σημείο που αξίζει να σχολιασθεί, είναι πως στην τελευταία περιοχή συχνοτήτων και στην περίπτωση της μικροδιάτρησης, ο συντελεστής απορρόφησης αυξάνεται μειούμενης της ακτίνας διάτρησης μέχρι μίας τιμής αυτής, ενώ πέρα απ' αυτήν αρχίζει και μειώνεται η αποδοτικότητα του μοντέλου. Πιο αναλυτικά, παρατηρείται πως ο συντελεστής απορρόφησης για ακτίνα  $r = 0.0001 \text{ m}$  είναι μικρότερος απ' ότι στην περίπτωση ακτίνας  $r = 0.0002 \text{ m}$ .

Έπειτα από σύγκριση της συμπεριφοράς των απορροφητών για τις περιπτώσεις διάτρησης και μικροδιάτρησης, παρατηρείται πως στη δεύτερη περίπτωση, ανάλογες μεταβολές στην ακτίνα των οπών επιφέρουν μικρότερες μεταβολές στον συντελεστή απορρόφησης. Πιο συγκεκριμένα, διπλασιασμός της ακτίνας διάτρησης επιφέρει μέγιστη μεταβολή στον συντελεστή απορρόφησης στην περίπτωση διάτρησης 3%, ενώ στην περίπτωση μικροδιάτρησης 1%. Παρατηρείται λοιπόν, πως τα μοντέλα μικροδιάτρησης δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές αποκλίσεις στη συμπεριφορά μεταξύ τους.

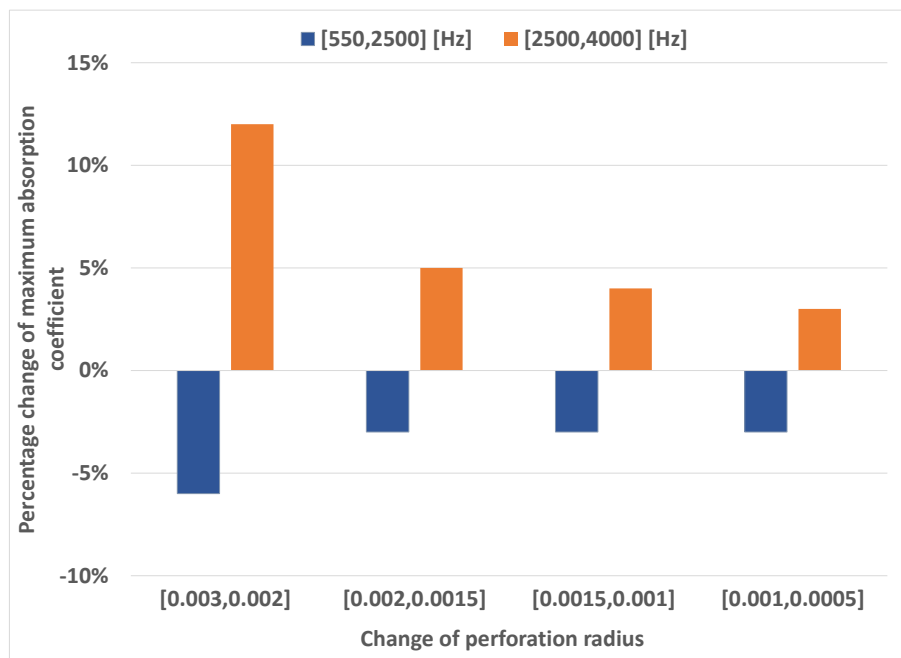
Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να βρεθεί εκείνη η τιμή της ακτίνας των οπών για κάθε περιοχή, η οποία καθιστά τον απορροφητή αποτελεσματικότερο στην ηχοαπορρόφηση. Για το σκοπό αυτό, παρατίθενται τα διαγράμματα του μέγιστου συντελεστή απορρόφησης και της συχνότητας στην οποία αυτός επιτυγχάνεται, μεταβαλλόμενης της ακτίνας διάτρησης, για καθεμία περιοχή (Σχήμα 4.3).



**Σχήμα 4.3 (α) Μέγιστος συντελεστής απορρόφησης και (β) Συχνότητα εμφάνισής του συναρτήσει ακτίνας οπών για την περίπτωση διάτρησης**

Παρατηρώντας τα διαγράμματα, όπως είναι φανερό στην περίπτωση διάτρησης, μέγιστος συντελεστής απορρόφησης επιτυγχάνεται στα άνω όρια της μεσαίας περιοχής συχνοτήτων και πιο συγκεκριμένα σε συχνότητα  $f = 2150 \text{ Hz}$  και σε ακτίνα οπών  $r = 0.003 \text{ m}$ . Η συμπεριφορά του απορροφητή αυτού, όπως έχει παρουσιαστεί παραπάνω, είναι ιδιαίτερα αποδοτική στην περιοχή μεσαίων συχνοτήτων, αλλά παρουσιάζει μειωμένη απορροφητικότητα στις υψηλές συχνότητες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Δεδομένου ότι στόχος είναι η εύρεση της ακτίνας διάτρησης που βελτιώνει τη συνολική συμπεριφορά ενός απορροφητή, δεν μπορεί να αποτελεί μοναδικό κριτήριο επιλογής της, ο μέγιστος

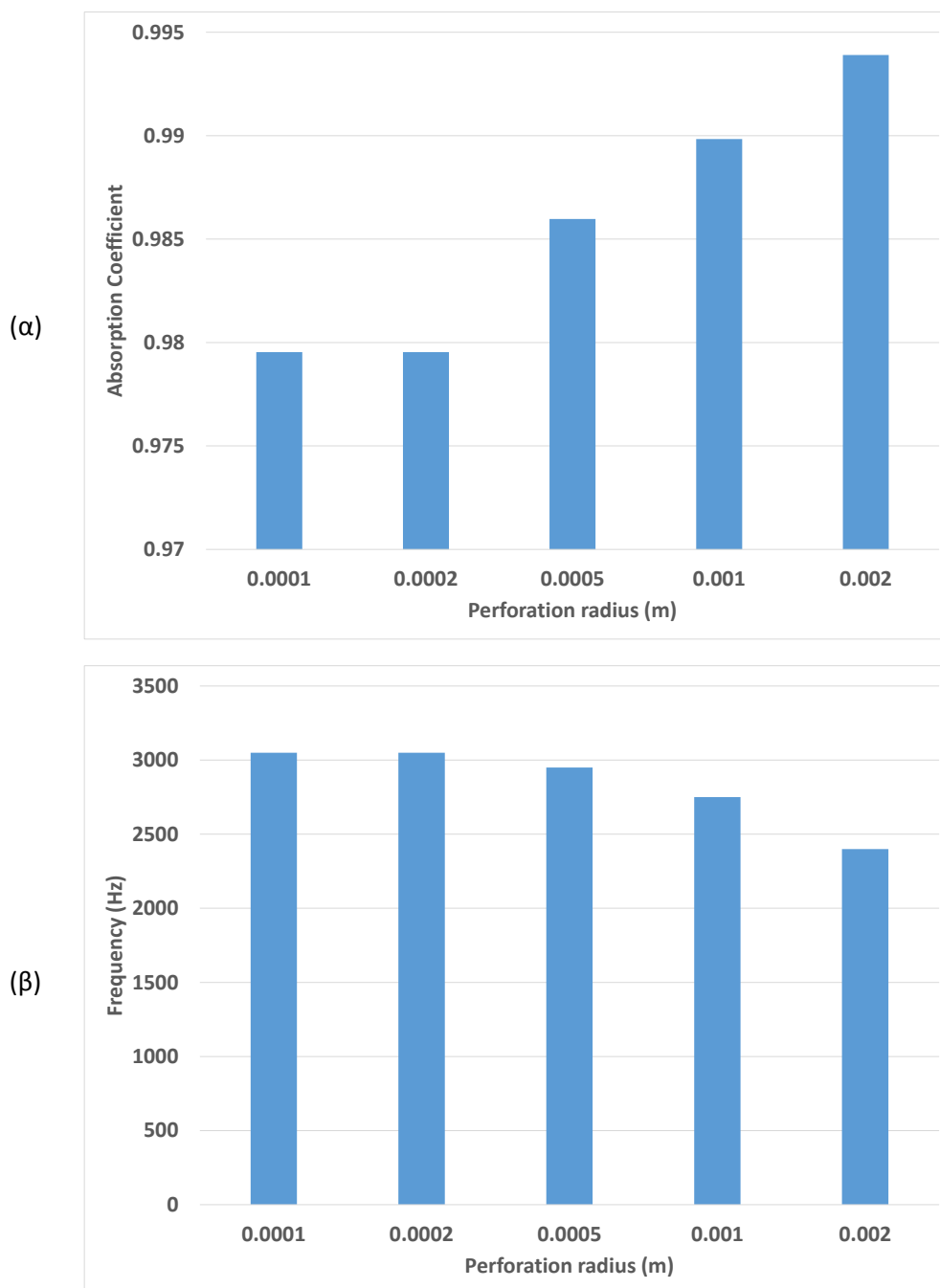
συντελεστής απορρόφησης ο οποίος επιτυγχάνεται σε μία τιμή συχνότητας. Σε συνδυασμό με αυτό το μέγεθος, λαμβάνεται υπόψη και η ποσοστιαία μεταβολή του μέγιστου συντελεστή απορρόφησης μεταξύ δύο διαδοχικών ακτίνων διάτρησης, σε αντίστοιχες τιμές συχνότητας, ώστε να υπάρξει σχετική εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Η σύγκριση των δύο ποσοστών, θα δώσει μία σαφή εικόνα ως προς την απόδοση του διάτρητου απορροφητή.



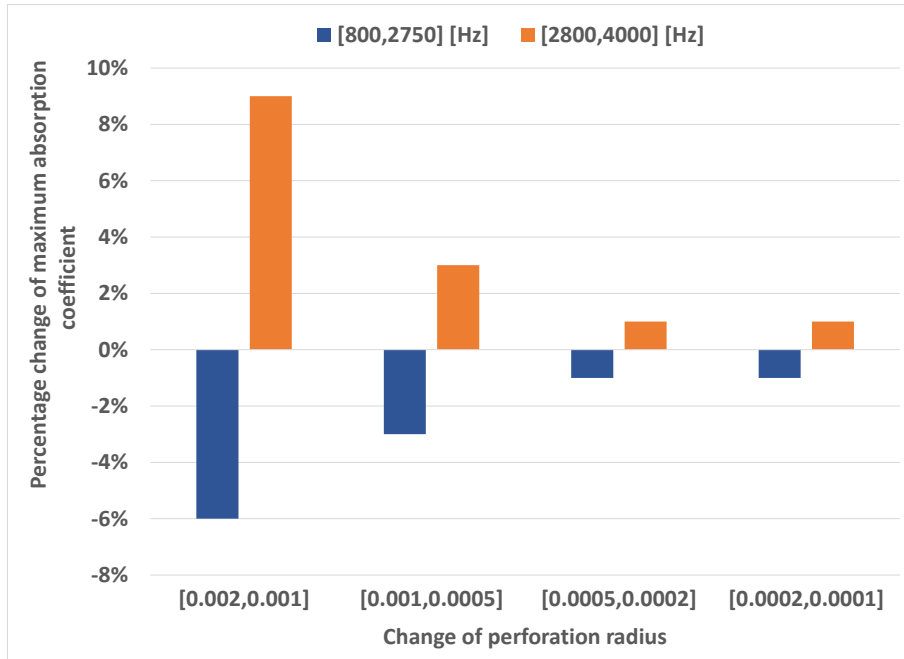
**Σχήμα 4.4 Ποσοστιαία μεταβολή του μέγιστου συντελεστή απορρόφησης μεταξύ διαδοχικών ακτίνων διάτρησης για μέση και υψηλή περιοχή συχνοτήτων**

Εξετάζοντας τη συμπεριφορά του απορροφητή με την αμέσως μικρότερη ακτίνα,  $r = 0.002\text{ m}$ , προκύπτει πως η τιμή του συντελεστή απορρόφησης για το νέο μοντέλο είναι μειωμένη σε σχέση με αυτήν του προηγούμενου μοντέλου, κατά 0.2 %. Η δε συχνότητα στην οποία αυτός επιτυγχάνεται είναι  $f = 2400\text{ Hz}$ . Συγκρίνοντας τις τιμές των δύο συντελεστών απορρόφησης για δύο διαδοχικές ακτίνες (Σχήμα 4.4, οριζόντιος άξονας), στη μεσαία περιοχή συχνοτήτων (550-2500Hz) παρατηρείται μέγιστη μείωση του συντελεστή του νέου μοντέλου κατά 6%, ενώ στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων (2550-4000Hz) μέγιστη αύξηση αυτού κατά 12 % (Σχήμα 4.4, 1<sup>η</sup> στήλη διαγράμματος). Μετά από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι ο νέος απορροφητής ( $r = 0.002\text{ m}$ ), παρουσιάζει συμπεριφορά ελαφρώς υποδεέστερη από τον αρχικά εξεταζόμενο όσον αφορά τις μεσαίες συχνότητες, ενώ στις υψηλές η απόδοσή του αυξάνεται σημαντικά. Προφανώς, η μείωση της μέγιστης τιμής της απορρόφησης που παρατηρείται σε αυτόν δεν είναι σημαντική ώστε να επικρατήσει η επιλογή του πρώτου απορροφητή ακτίνας  $r = 0.003\text{ m}$ . Με ανάλογο σκεπτικό, στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μεταβολές που προκύπτουν για διαφορετικά ζεύγη τιμών ακτίνας διάτρησης.

Ανάλογη διαδικασία θα εφαρμοστεί και στην περίπτωση της μικροδιάτρησης, προκειμένου να προκύψει βέλτιστη τιμή ακτίνας οπών για αυτήν την περιοχή (Σχήμα 4.5, Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.5 (α) Μέγιστος συντελεστής απορρόφησης και (β) Συχνότητα εμφάνισής του συναρτήσει ακτίνας οπών για την περίπτωση μικροδιάτρησης



Σχήμα 4.6 Ποσοστιαία μεταβολή του μέγιστου συντελεστή απορρόφησης μεταξύ διαδοχικών ακτίνων μικροδιάτρησης για μέση και υψηλή περιοχή συχνότητων

Συνδυάζοντας τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα διαγράμματα, μία διάτρητη επιφάνεια ακτίνας  $r = 0.0015 \text{ m}$  παρουσιάζει την βέλτιστη συνολική συμπεριφορά ως προς την ηχοαπορρόφηση. Ειδικότερα, ο μέγιστος συντελεστής απορρόφησης της παραμένει υψηλός,  $\alpha = 0.992$  και σε υψηλή τιμή συχνότητας,  $f = 2550 \text{ Hz}$ , ενώ ταυτόχρονα όλες οι περιοχές συχνότητων παρουσιάζουν ικανοποιητικές επιδόσεις απορρόφησης. Όσον αφορά στη μικροδιάτρητη δομή, η βέλτιστη συμπεριφορά παρουσιάζεται σε ακτίνα οπής  $r = 0.0005 \text{ m}$  καθώς ο συντελεστής απορρόφησης παραμένει υψηλός,  $\alpha = 0.986$ , σε υψηλή τιμή συχνότητας,  $f = 2950 \text{ Hz}$  και μειωμένος ελάχιστα από τον υψηλότερο.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, είναι φανερό πως όσο πιο μεγάλη είναι η διάμετρος των οπών τόσο αποτελεσματικότεροι καθίστανται οι απορροφητές στις μέσες συχνότητες. Αντίθετα στις υψηλές συχνότητες, μεγαλύτερη απορρόφηση επιτυγχάνεται με χρήση οπών μικρής διαμέτρου. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής στην οποία δύναται να χρησιμοποιηθούν οι απορροφητές, ανάλογα επιλέγονται και τα κατάλληλα χαρακτηριστικά τους.

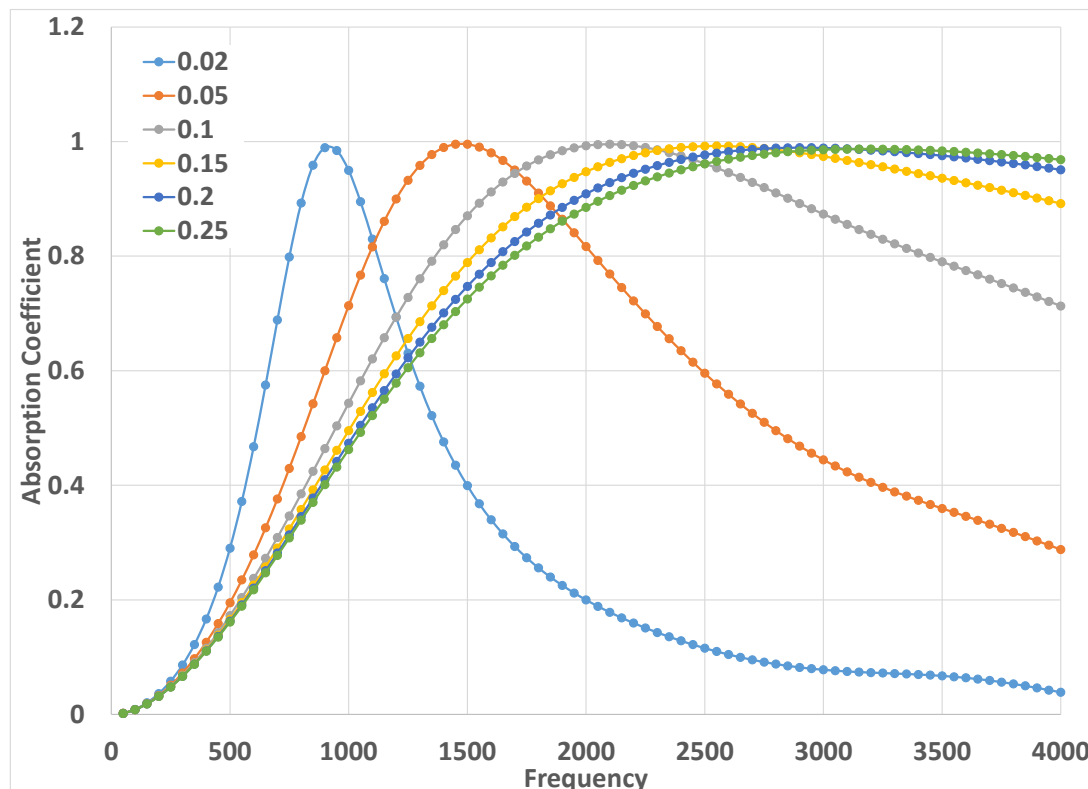
Στα πλαίσια της μελέτης αυτής, επιλέγονται τα χαρακτηριστικά των απορροφητών προκειμένου αυτοί να καλύπτουν αποτελεσματικά μεγάλο εύρος συχνότητων. Προκύπτει λοιπόν, πως στην περίπτωση διάτρησης ιδανική καθίσταται η χρήση οπών ακτίνας  $r = 0.0015 \text{ m}$  ενώ για μικροδιάτρηση  $r = 0.0005 \text{ m}$ .

#### 4.1.2 Ποσοστό κενού χώρου διάτρησης

Σε δεύτερο στάδιο θα μελετηθεί η μεταβολή της συμπεριφοράς του απορροφητή με επίδραση της δεύτερης παραμέτρου, δηλαδή του ποσοστού κενού χώρου διάτρησης. Το εύρος τιμών που θα καλύψει η ανάλυση είναι: [0.02, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25]. Η

διερεύνηση θα πραγματοποιηθεί για τιμές ακτίνας σπών, αυτές που επιλέχθηκαν ως βέλτιστες παραπάνω, για τις δύο περιοχές διάτρησης.

Η επίδραση που επιφέρει η μεταβολή του ποσοστού κενού χώρου επιφανείας στο μοντέλο προς εξέταση, απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7 για την περίπτωση διάτρησης.



Σχήμα 4.7 Επίδραση ποσοστού κενού χώρου για την περίπτωση διάτρησης

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση, γίνεται σαφές πως δεν είναι δυνατόν οι καμπύλες να ομαδοποιηθούν ως προς την συμπεριφορά τους σε περιοχές συχνοτήτων, όπως προηγουμένως. Αντίθετα, η κάθε καμπύλη συμπεριφέρεται διαφορετικά κατά την αύξηση της συχνότητας και του ποσοστού κενού χώρου διάτρησης. Παρ' όλα αυτά η επίδραση στη συμπεριφορά της δομής θα κριθεί και σχολιασθεί τμηματικά στις παραπάνω περιοχές συχνοτήτων.

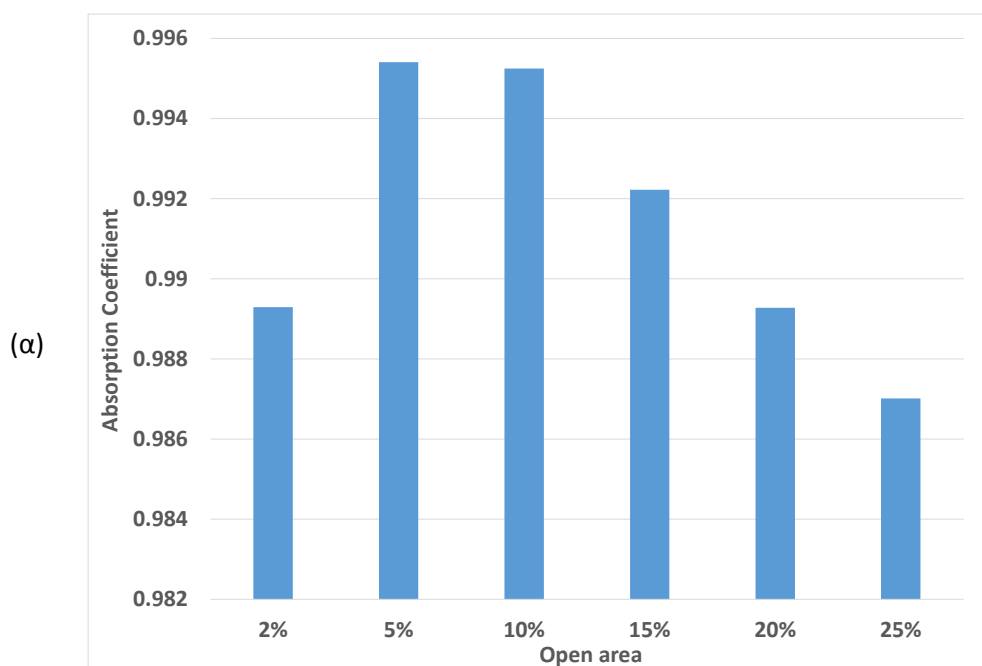
Στη περίπτωση που εξετάζεται, είναι φανερό πως μέχρι τα 500 Hz τα υψηλά ποσοστά κενού χώρου, παρουσιάζουν αντίστοιχη συμπεριφορά ενώ καθώς μειώνεται η τιμή της παραμέτρου, αυξάνεται ο συντελεστής απορρόφησης. Κάτι τέτοιο καταδεικνύει πως επιφάνειες με λιγότερες διατρήσεις παρουσιάζονται αποτελεσματικότερες στην απορρόφηση του ήχου στις χαμηλές συχνότητες.

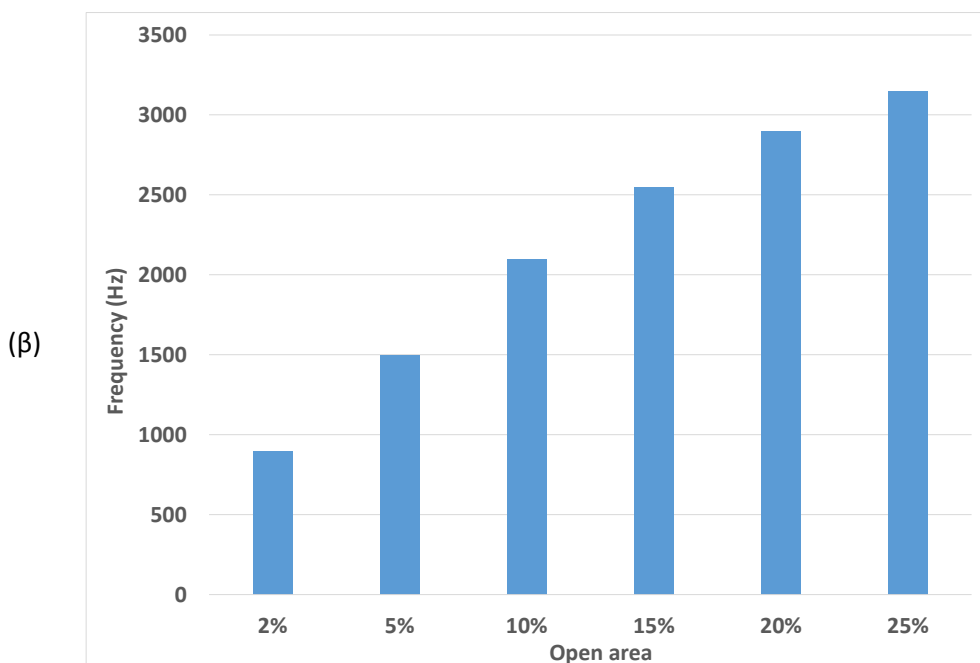
Όσον αφορά τη μεσαία περιοχή συχνοτήτων, είναι εμφανές πως καθώς αυξάνεται η τιμή του ποσοστού κενού χώρου, η καμπύλη εμφανίζει μετατοπισμένο το μέγιστο του συντελεστή απορρόφησης προς υψηλότερες συχνότητες. Επιπλέον, στην περιοχή του μεγίστου η καμπύλη πλαταίνει, γεγονός που σημαίνει πως υψηλές τιμές απορρόφησης είναι δυνατές σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Σε αυτήν την περίπτωση, η απορρόφηση είναι

ικανοποιητικότερη σε μεγάλα ποσοστά κενού χώρου, δηλαδή σε επιφάνειες με αυξημένο αριθμό οπών.

Στην τελευταία περιοχή συχνοτήτων, η συμπεριφορά της δομής εξακολουθεί να βελτιώνεται με αύξηση του ποσοστού κενού χώρου. Ειδικότερα, ενώ παρατηρείται μία γενική μείωση του συντελεστή, όσο αυξάνεται η παράμετρος, τόσο μειώνεται ο ρυθμός μείωσης της καμπύλης. Προκύπτει λοιπόν, πως τα υψηλά ποσοστά κενού χώρου επιφανείας επιτυγχάνουν υψηλές επιδόσεις απορρόφησης και σ' αυτήν την περιοχή.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, η γενική τάση της καμπύλης που απεικονίζεται έχει ως εξής: καθώς αυξάνεται το ποσοστό κενού χώρου η απορρόφηση βελτιώνεται και μάλιστα η μέγιστη τιμή της επιτυγχάνεται σε όλο και υψηλότερες συχνότητες. Για την εύρεση της τιμής εκείνης που δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα, θα πρέπει να εξεταστούν όπως και προηγουμένως, ο μέγιστος συντελεστής απορρόφησης και η συχνότητα στην οποία εμφανίζεται. Η εξέταση της ποσοστιαίας μεταβολής του μεταξύ διαδοχικών τιμών ποσοστού κενού χώρου διάτρησης και ανάλογων συχνοτήτων σ' αυτήν την περίπτωση δεν οφείλει, καθώς η μορφή των καμπυλών διαφοροποιείται σημαντικά.



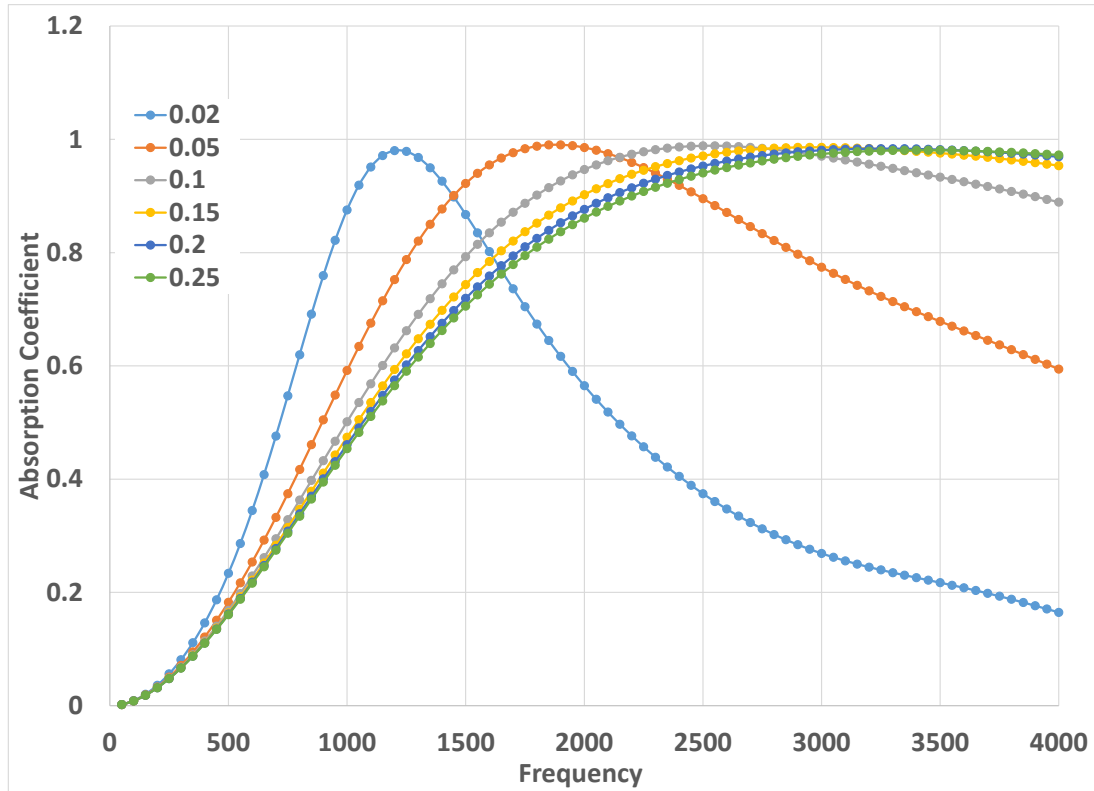


**Σχήμα 4.8 (α) Μέγιστος συντελεστής απορρόφησης και (β) Συχνότητα εμφάνισής του συναρτήσει ποσοστού κενού χώρου για την περίπτωση διάτρησης**

Η τελική απόφαση ως προς το πιο ποσοστό κενού χώρου επιλέγεται ως χαρακτηριστικό της διάτρητης επιφάνειας, προκύπτει με επισκόπηση των παραπάνω παρατηρήσεων (Σχήμα 4.8). Οι μεταβολές μεταξύ των μέγιστων τιμών του συντελεστή απορρόφησης όπως παρατηρείται είναι αμελητέες, επομένως το στοιχείο αυτό δεν επηρεάζει την επιλογή της τιμής της παραμέτρου. Σημαντικό στοιχείο είναι σε ποια τιμή της συχνότητας επιτυγχάνεται αυτός ο μέγιστος συντελεστής. Φαίνεται λοιπόν πως καθώς αυξάνεται το ποσοστό, τόσο αυξάνονται και οι συχνότητες στις οποίες βελτιώνεται η απορρόφηση.

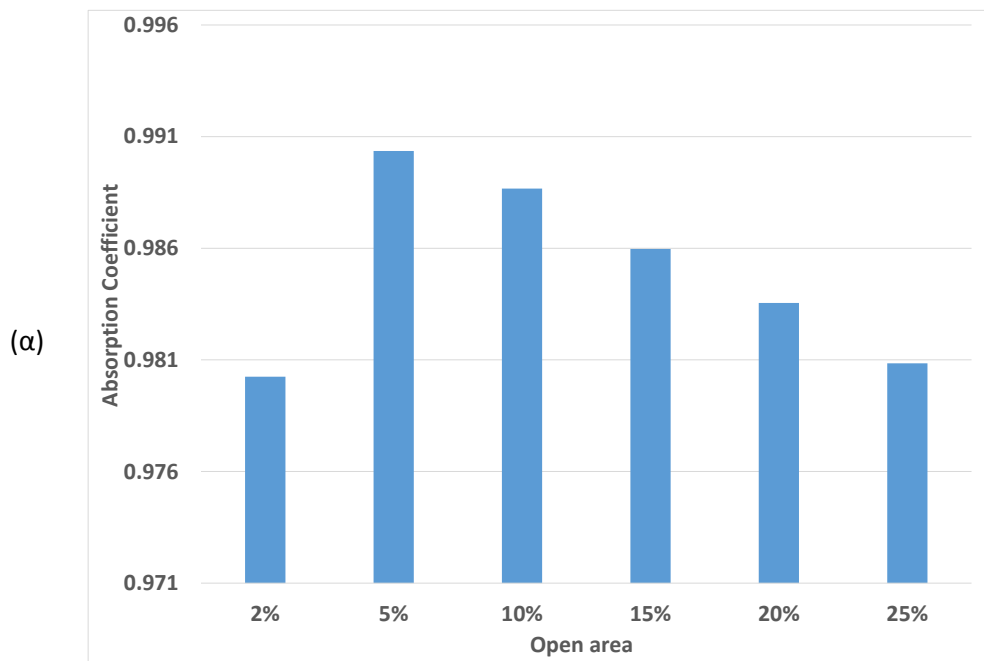
Στα πλαίσια των απαιτήσεων της μελέτης αυτής, ζητούμενο είναι να επιτυγχάνεται υψηλή απορρόφηση σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρατίθενται είναι εμφανές, πως οι υψηλές τιμές ποσοστού κενού χώρου προσεγγίζουν ικανοποιητικά την επιθυμητή συμπεριφορά. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να υπενθυμιστεί πως ποσοστά μεγαλύτερα από 20%, αντιστοιχούν σε επιφάνειες διαφανείς ως προς τον ήχο δηλαδή επιφάνειες που επιτρέπουν την πλήρη διέλευση της προσπίπτουσας ηχητικής ενέργειας. Προκύπτει λοιπόν πως ικανοποιητική απορρόφηση για την περίπτωση διάτρησης στο μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων επιτυγχάνεται για ποσοστό κενού χώρου διάτρησης 15%. Ακολουθεί ανάλογη διερεύνηση για την περίπτωση μικροδιάτρησης και τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Σχήμα 4.9.

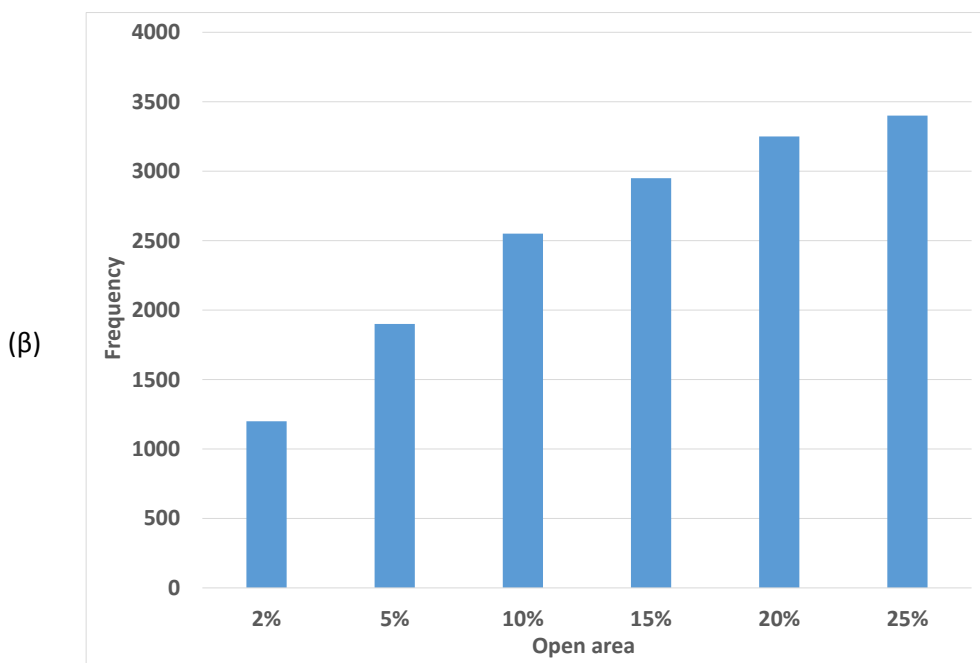




Σχήμα 4.9 Επίδραση ποσοστού κενού χώρου για την περίπτωση μικροδιάτρησης

Όπως είναι φανερό, η συμπεριφορά των καμπυλών παρουσιάζεται πανομοιότυπη με την περίπτωση διάτρησης με την μοναδική διαφορά πως οι καμπύλες είναι μετατοπισμένες προς υψηλότερες περιοχές συχνοτήτων. Παρατηρείται και πάλι πως οι μέγιστες τιμές του συντελεστή απορρόφησης διαφοροποιούνται ελάχιστα καθώς μεταβάλλονται οι τιμές του ποσοστού κενού χώρου (Σχήμα 4.10).





**Σχήμα 4.10 (α) Μέγιστος συντελεστής απορρόφησης και (β) Συχνότητα εμφάνισής του συναρτήσει ποσοστού κενού χώρου για την περίπτωση μικροδιάτρησης**

Το ποσοστό κενού χώρου που πετυχαίνει υψηλές δυνατότητες απορρόφησης σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων στην περίπτωση μικροδιάτρησης είναι ίσο με 10%. Όπως παρατηρείται, η συμπεριφορά της καμπύλης με αυτά τα χαρακτηριστικά μικροδιάτρησης, ομοιάζει με την βέλτιστη καμπύλη που επιλέχθηκε παραπάνω για την περίπτωση διάτρησης.

Επιλέγεται λοιπόν, στην περίπτωση μικροδιάτρησης, απορροφητής ποσοστού κενού χώρου διάτρησης 10%, με χαρακτηριστικά συντελεστή απορρόφησης  $a = 0.9887$  σε συχνότητα  $f = 2550 \text{ Hz}$ .

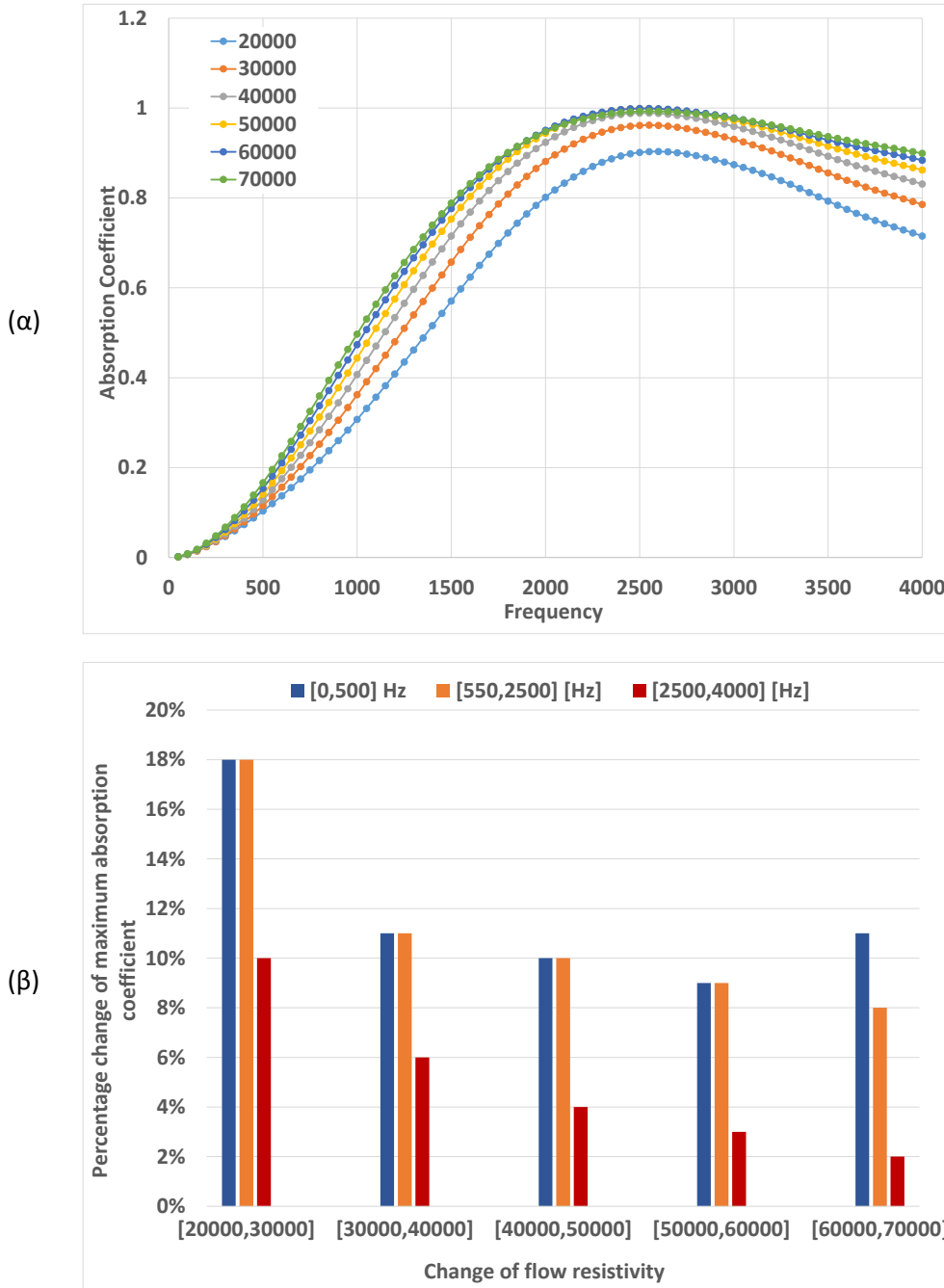
Συμπερασματικά, ακολουθεί συνολικός πίνακας (Πίνακας 4.1) που περιλαμβάνει τα γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά των διάτρητων δομών που επιλέχθηκαν, για διάτρηση και μικροδιάτρηση.

**Πίνακας 4.1 Τελικά μοντέλα διάτρητων επιφανειών**

	Ακτίνα (m)	Ποσοστό κενού χώρου διάτρησης (%)
Διάτρητος απορροφητής	0.0015	15
Μικροδιάτρητος απορροφητής	0.0005	10

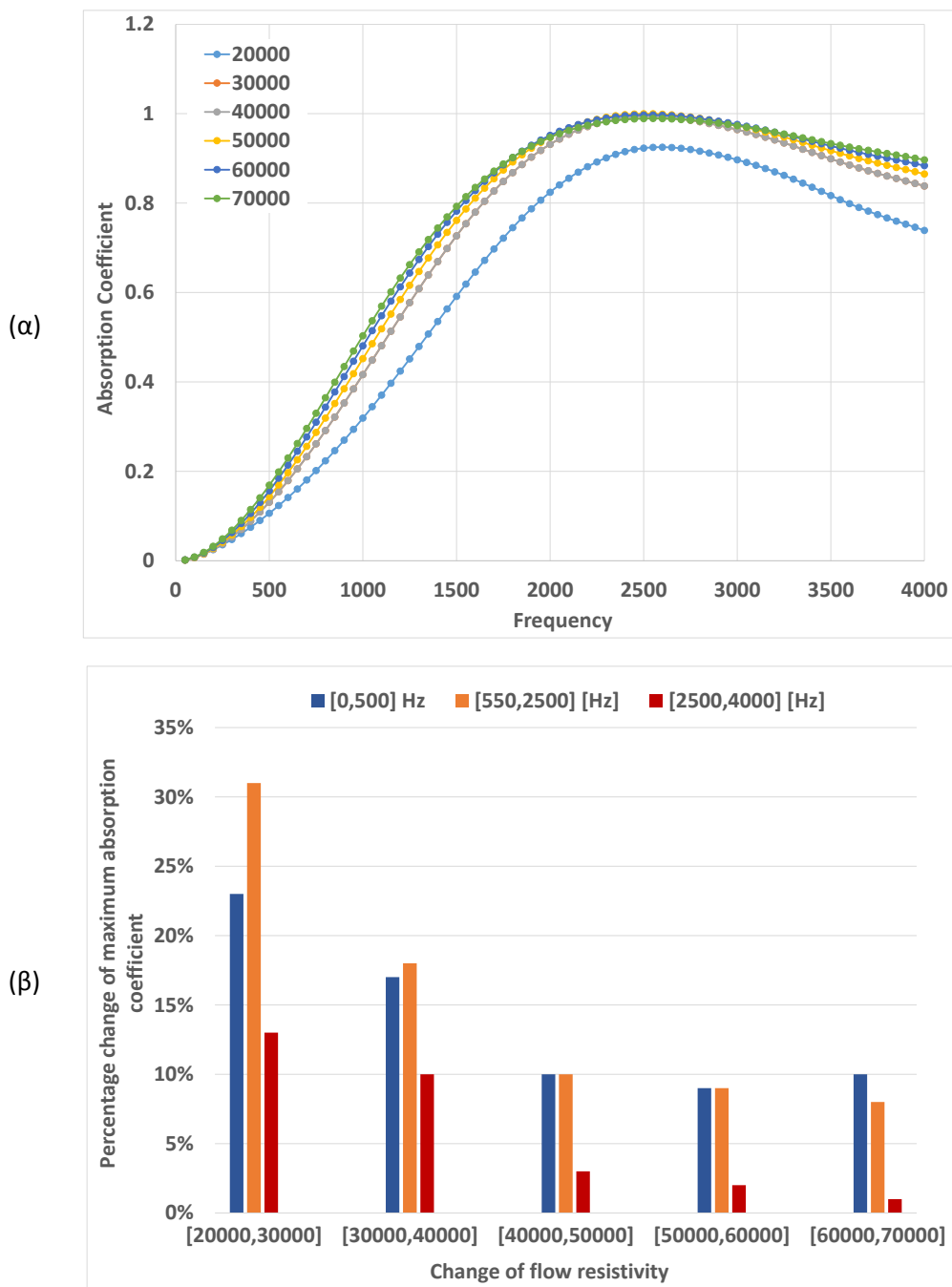
## 4.2 Επίδραση ιδιοτήτων μικροδομής πορώδη απορροφητή

Σε δεύτερο στάδιο θα πρέπει να μελετηθεί η απόκριση του πορώδη απορροφητή με τη μεταβολή της τιμής της αντίστασης ροής του. Για τα δύο μοντέλα διάτρησης που έχουν προκύψει, παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα μεταβολής της αντίστασης ροής σε εύρος τιμών [20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000] [rayl/m] (Σχήμα 4.11(α), Σχήμα 4.12(α)).



Σχήμα 4.11 (α) Επίδραση αντίσταση ροής πορώδη απορροφητή και (β) ποσοστιαία μεταβολή του μέγιστου συντελεστή απορρόφησης μεταξύ διαδοχικών τιμών αντίστασης ροής για όλες τις περιοχές συχνοτήτων για την περίπτωση διάτρησης

Για την εξαγωγή συμπεράσματος ως προς την κατάλληλη επιλογή αντίστασης ροής, είναι χρήσιμη η επισκόπηση της ποσοστιαίας μεταβολής των μέγιστων τιμών του συντελεστή απορρόφησης μεταξύ διαδοχικών τιμών της παραμέτρου, για τα δύο μοντέλα που αναπτύχθηκαν (Σχήμα 4.11(β), Σχήμα 4.12(β)).



**Σχήμα 4.12 (α) Επίδραση αντίσταση ροής πορώδη απορροφητή και (β) ποσοστιαία μεταβολή του μέγιστου συντελεστή απορρόφησης μεταξύ διαδοχικών τιμών αντίστασης ροής για όλες τις περιοχές συχνοτήτων για την περίπτωση μικροδιάτρησης**

Παρατηρώντας τα διαγράμματα, η συμπεριφορά της δομής και στις δύο περιπτώσεις είναι αντίστοιχη, με την καμπύλη της μικροδιάτρησης να παρουσιάζεται μετατοπισμένη προς υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης σε μικρότερες τιμές αντίστασης ροής.

Όπως είναι φανερό, η διαφορά στην απορρόφηση της δομής μεταξύ των καμπυλών σε διαδοχικές τιμές αντίστασης ροής είναι μικρότερη, καθώς αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου της αντίστασης ροής του πορώδη απορροφητή.

Δεδομένου ότι η επιλογή αντίστασης ροής ίσης με  $70000 \text{ rayl/m}$ , είχε ως αποτέλεσμα έναν απορροφητή με υψηλές δυνατότητες, ζητούμενο είναι να επιλεγεί μικρότερη τιμή της παραμέτρου η οποία παράλληλα δεν μεταβάλλει τις ιδιότητες της δομής. Αυτό είναι επιθυμητό στα πλαίσια τόσο της ευκολίας κατασκευής μίας πορώδους δομής όσο και στη ταχύτερη απόκριση του υπολογιστικού μοντέλου. Την απαίτηση αυτή, έπειτα από παρατήρηση του διαγράμματος (Σχήμα 4.11(β), Σχήμα 4.12(β)), ικανοποιεί τιμή αντίστασης ροής  $60000 \text{ rayl/m}$ , καθώς οι ποσοστιαίες μεταβολές στην μεσαία και υψηλή περιοχή συχνοτήτων είναι οι μικρότερες δυνατές, της τάξης του 8% και 2%, αντίστοιχα. Στη χαμηλή περιοχή συχνοτήτων, η απορρόφηση είναι μειωμένη κατά 11%, τιμή σχετικά υψηλή αλλά μη υπολογίσιμη καθώς το ενδιαφέρον της ανάλυσης εστιάζει κυρίως στις μεγαλύτερες τιμές συχνοτήτων.

Ανάλογη συμπεριφορά παρατηρείται και στην περίπτωση μικροδιάτρησης με ακόμα μικρότερες ποσοστιαίες μεταβολές συνολικά σε όλες τις περιοχές συχνοτήτων. Παρ' όλα αυτά, η απορρόφηση είναι ικανοποιητική και μάλιστα της ίδιας τάξης με την προηγούμενη περίπτωση, σε αντίσταση ροής ίση με  $50000 \text{ rayl/m}$ . Αυτή η διαφοροποίηση συμβαίνει διότι η χρήση μικροδιάτρητης επιφάνειας βελτιώνει την απόδοση της δομής σε υψηλές τιμές συχνότητας, με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις των χαρακτηριστικών του πορώδη απορροφητή να εμφανίζονται μειωμένες σε σχέση με την περίπτωση διάτρησης.

### 4.3 Σύγκριση ημιεμπειρικού – αναλυτικού μοντέλου

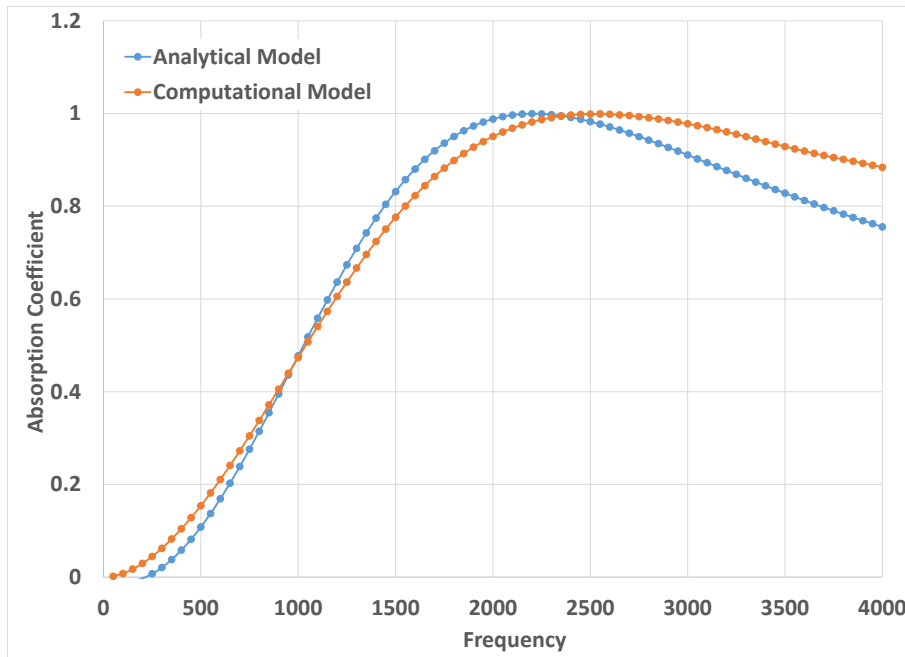
Σε συνέχεια της προηγούμενης ανάλυσης, προκύπτουν τα τελικά υπολογιστικά μοντέλα με καθορισμένα τα χαρακτηριστικά τόσο της διάτρητης επιφάνειας όσο και του πορώδη απορροφητή για τις δύο περιπτώσεις που μελετήθηκαν (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2 Τελικά μοντέλα συνολικής απορροφητικής δομής

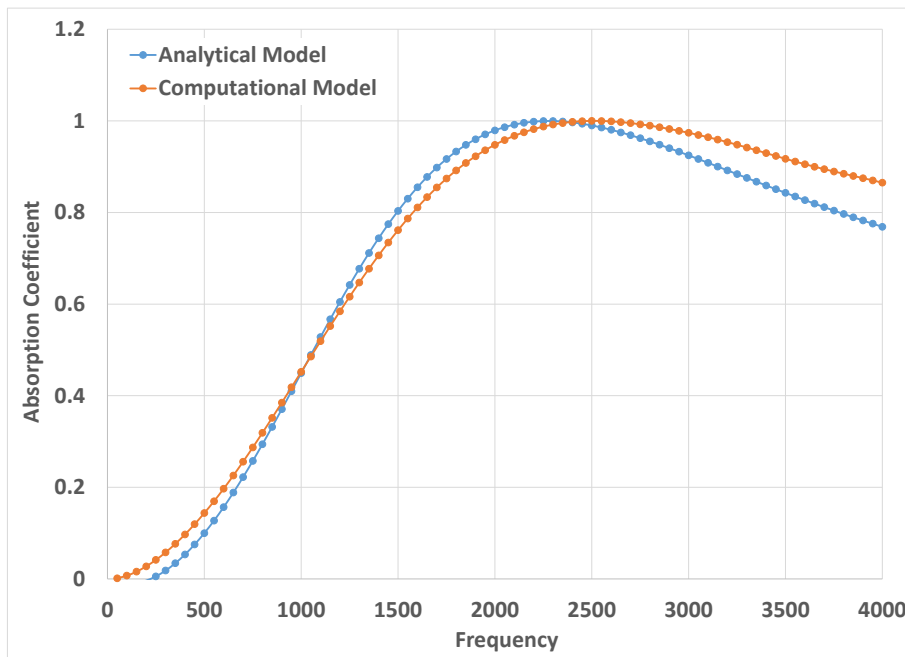
	Ακτίνα (m)	Ποσοστό κενού χώρου διάτρησης (%)	Αντίσταση ροής (rayl/m)
Διάτρητος απορροφητής	0.0015	15	60000
Μικροδιάτρητος απορροφητής	0.0005	10	50000

Είναι καίριας σημασίας η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία αναπτύχθηκαν στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, και αυτών από την προσομοίωση με χρήση του λογισμικού πακέτου Ansys. Παρακάτω παρατίθενται τα

διαγράμματα σύγκρισης για τα δύο βέλτιστα μοντέλα προσομοίωσης που έχουν προκύψει (Σχήμα 4.13, Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.13 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την περίπτωση διάτρησης



Σχήμα 4.14 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την περίπτωση μικροδιάτρησης

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, είναι φανερό η ομοιότητα της συμπεριφοράς των καμπυλών ως προς τις τιμές του συντελεστή απορρόφησης σε αντίστοιχες τιμές συχνοτήτων. Τα συμπεράσματα που εξάγονται, έχουν να κάνουν με τη φύση της μαθηματικής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, η λύση του ίδιου προβλήματος με μαθηματική και υπολογιστική διαδικασία, δίνει αποτελέσματα που αποκλίνουν μεταξύ τους, κυρίως λόγω ακρίβειας. Αυτό

συμβαίνει γιατί, η υπολογιστική προσέγγιση ομοιάζει περισσότερο με το ρεαλιστικό πρόβλημα προς λύση, απ'ότι η μαθηματική. Επιπλέον, η ακρίβεια της υπολογιστικής μεθοδολογίας είναι δυνατό να ενισχυθεί με χρήση υπολογιστικών συνθηκών που πετυχαίνουν αυξημένη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, στη μέθοδο προσομοίωσης που έχει χρησιμοποιηθεί στην παρούσα μελέτη, ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και κατ'επέκταση τη σύγκλιση του υπολογιστικού μοντέλου με το πραγματικό. Πρόκειται, λοιπόν, για αναμενόμενη βελτιωμένη συμπεριφορά του υπολογιστικού μοντέλου, με έντονη σύγκλιση προς το πραγματικό μοντέλο.

Εστιάζοντας περισσότερο στις παραπάνω καμπύλες, παρατηρείται πως στην περιοχή μέσων συχνοτήτων το υπολογιστικό μοντέλο καταδεικνύει μειωμένη απόδοση ως προς την ηχοαπορρόφηση ενώ στις άλλες δύο ακραίες περιοχές αυξημένη κατά πολύ. Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, πρόκειται για αποτελέσματα πλήρως αποδεκτά αφού δίνουν την πραγματική απόκριση απορροφητών με αυτά τα χαρακτηριστικά.





**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΚΡΙΒΟΥΣ  
ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ**



## 5.1 Αλληλεπίδραση ρευστού – στερεού σώματος

Βασικός στόχος της τρέχουσας μελέτης, είναι να αναπτυχθεί μια ηχοαπορροφητική δομή η οποία θα προσομοιωθεί για τη διερεύνηση της ηχοαπορροφητικής της συμπεριφοράς. Όπως φάνηκε από το προηγούμενο κεφάλαιο, η υπολογιστική προσέγγιση με χρήση ισοδύναμων μοντέλων ρευστών, έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα που προσεγγίζουν επαρκώς τα αντίστοιχα της αναλυτικής μεθοδολογίας. Παρ' όλα αυτά, αναμένεται περαιτέρω σύγκλιση στην πραγματική ακουστική συμπεριφορά, με προσομοίωση της πραγματικής γεωμετρίας της απορροφητικής δομής. Αυτό σημαίνει πως, θα γίνει προσπάθεια αντικατάστασης των σωμάτων που έχουν προσομοιωθεί με χρήση ισοδύναμων μοντέλων ρευστών από ακριβείς και λεπτομερώς σχεδιασμένες γεωμετρίες.

Ο καθορισμός των φυσικών χαρακτηριστικών της δομής, τα οποία επηρεάζουν την ηχητική συμπεριφορά της επιτυγχάνεται μέσω της αλληλεπίδρασης ρευστού και στερεού σώματος (fluid – structure interaction). Στην προηγούμενη ανάλυση, όπως έχει αναφερθεί πολλές φορές, όλα τα σώματα μοντελοποιήθηκαν ως ρευστά τα οποία με ορισμό των κατάλληλων οριακών συνθηκών, αποκτούσαν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Στην προσέγγιση αυτή, τα στερεά σώματα θα σχεδιασθούν επακριβώς και καθώς αυτά θα βρίσκονται σε άμεση επαφή με το ρευστό, θα επιτυγχάνεται η μηχανική αλληλεπίδραση που είναι επιθυμητή.

## 5.2 Μοντελοποίηση του φυσικού προβλήματος

### 5.2.1 Περιγραφή νέου υπολογιστικού μοντέλου

Στα πλαίσια της νέας ανάλυσης, η δομή της διάτρητης πλάκας θα εισαχθεί στο λογισμικό προς προσομοίωση, έχοντας, πια, σχεδιασθεί επακριβώς. Αυτό σημαίνει, πως τα στερεά σώματα τα οποία μέχρι αυτό το σημείο είχαν ιδιότητες ισοδύναμου ρευστού, ούτως ώστε στο στάδιο αυτό να παρασταθούν με πραγματικές ιδιότητες στερεών σωμάτων.

Η απορροφητική δομή που εξετάζεται, όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο αποτελείται από τρεις τύπους σωμάτων. Τη διάτρητη επιφάνεια, τον πορώδη απορροφητή που την ακολουθεί και τέλος μία σταθερή ανένδοτη επιφάνεια. Φυσικά, η ταυτόχρονη αντικατάσταση όλων των ισοδύναμων μοντέλων ρευστού από τα αντίστοιχα στερεά σώματα, οδηγεί σε μειωμένη ελεγχιμότητα στα αποτελέσματα που προκύπτουν. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι πως η πραγματική γεωμετρία της απορροφητικής δομής είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη κυρίως στην περίπτωση του πορώδη απορροφητή. Κατ'επέκταση, οι απαιτήσεις σε υπολογιστικό κόστος είναι τεράστιες, γεγονός που καθιστά την απόκτηση των αποτελεσμάτων ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία. Επιπλέον, η σύζευξη των φυσικών παραμέτρων των δομών με τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά δεν αποτελεί πάντα μία απλή διαδικασία αλλά, συνήθως, απαιτείται διερεύνηση της σχέσης τους.

Για τους παραπάνω λόγους, στην τρέχουσα μελέτη θα γίνει προσπάθεια να προσομοιωθεί ως στερεό σώμα μόνο ο διάτρητος απορροφητής, ενώ τα άλλα δύο στερεά σώματα θα αναπαρίστανται όπως και προηγουμένως, ως ισοδύναμα μοντέλα ρευστού. Με αυτόν τον

τρόπο, θα εξασφαλιστεί καλύτερος έλεγχος στα αποτελέσματα και ταυτόχρονα θα διαπιστωθεί κατά πόσο επηρεάζονται αυτά από την εισαγωγή της πραγματικής γεωμετρίας, όπως αναμένεται.

### 5.2.2 Αναπαράσταση δομής νέου υπολογιστικού μοντέλου

Η νέα δομή που θα προσομοιωθεί για την κάθε περιοχή διάτρησης, θα κατασκευαστεί σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των δύο απορροφητών που έχουν προκύψει, έπειτα από την προηγούμενη διερεύνηση. Στο σημείο αυτό, θα περιγραφεί η ακριβής γεωμετρική αναπαράσταση της διάτρητης επιφάνειας της δομής, καθώς όπως εξηγήθηκε και παραπάνω, είναι η πρώτη γεωμετρική οντότητα που θα αντικατασταθεί.

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάτρητης επιφάνειας δεν θα μεταβληθούν, καθώς σκοπός είναι να μελετηθεί το ίδιο φυσικό πρόβλημα. Επομένως, οι διαστάσεις και το πάχος της διάτρητης πλάκας παραμένουν σταθερά και ίσα με  $20 \times 16 \text{ mm}$  και  $1 \text{ mm}$ , αντίστοιχα.

Όσον αφορά στον αριθμό των διατρήσεων για την κάθε περιοχή, αυτός, όπως είναι προφανές, είναι συνάρτηση της ακτίνας των οπών και του ποσοστού κενού χώρου διάτρησης. Οι δύο αυτές παράμετροι καθορίζουν σε κάθε περίπτωση τον απαιτούμενο αριθμό οπών, προκειμένου να καταστρωθούν πανομοιότυπα μοντέλα με την προηγούμενη διερεύνηση. Στο σημείο αυτό, γίνεται περισσότερο κατανοητός ο λόγος για τον οποίο η γεωμετρική απεικόνιση αναμένεται να δώσει ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τη μέθοδο των ισοδύναμων ρευστών που εφαρμόστηκε παραπάνω.

Πιο συγκεκριμένα, στην ανάλυση του Κεφαλαίου 3, όπου παραταίηθηκε αναλυτικά ο ορισμός ενός διάτρητου σώματος ως μοντέλο ισοδύναμου ρευστού, τα δεδομένα που εισάγονταν στο λογισμικό για το σκοπό αυτό, είναι η τιμή της ακτίνας διάτρησης, η απόσταση των κέντρων των οπών και το πάχος της διάτρητης επιφάνειας. Συγκεκριμένα, η απόσταση των κέντρων των οπών δόθηκε από την σχέση:

$$d = \sqrt{\frac{\pi \cdot r^2}{\text{open area}}} \quad (104)$$

Παρά το γεγονός πως η τιμή της παραμέτρου αυτής υπολογίστηκε σύμφωνα με την επιθυμητή τιμή του ποσοστού κενού χώρου επιφανείας, από την στιγμή που δεν δινόταν η δυνατότητα ορισμού και του επιθυμητού αριθμού οπών, δεν είναι δυνατόν να υπάρξει σαφής έλεγχος ως προς τον τρόπο κατανομής τους στην επιφάνεια την οποία πραγματοποιεί αυτόματα το λογισμικό και φαίνεται να είναι κανονικοποιημένη. Είναι φανερά λοιπόν, τα πλεονέκτημα της γεωμετρικής απεικόνισης της διάτρητης επιφάνειας ως προς τον έλεγχο του προβλήματος που μελετάται.

Στα πλαίσια του νέου υπολογιστικού μοντέλου, οι παράμετροι που είναι απαραίτητες για την γεωμετρική απεικόνιση της διάτρητης δομής είναι:

- η ακτίνα των οπών

- η απόσταση των κέντρων των οπών
- ο αριθμός των οπών

Αξιοποιώντας την τιμή της ακτίνας των οπών και του ποσοστού κενού χώρου διάτρησης που επιθυμείται, υπολογίζεται ο αριθμός των οπών ως εξής:

$$N = \frac{\text{open area} \cdot a \cdot b}{\pi \cdot r^2} \quad (105)$$

όπου  $a, b$  οι διαστάσεις της πλάκας.

Η απόσταση των κέντρων των οπών, θα υπολογιστεί για κάθε διάσταση της πλάκας ξεχωριστά, εφόσον πρόκειται για ορθογωνική πλάκα. Επιπλέον, ζητούμενο είναι ο αριθμός των οπών να είναι ακέραιος και όχι πρώτος αριθμός προκειμένου να εξασφαλιστεί ακέραιος αριθμός οπών και στις δύο διαστάσεις της πλάκας. Ένα ακόμα ζητούμενο είναι οι οπές στην πλάκα να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα κατανομημένες, ώστε να καλύπτουν σχεδόν ολόκληρη την επιφάνειά της. Κάτι τέτοιο θα εξασφαλίσει πιο ομαλή ροή ρευστού διαμέσου τους.

#### 5.2.2.1 Χαρακτηριστικά για την περίπτωση διάτρητης πλάκας

Τα χαρακτηριστικά του βέλτιστου μοντέλου για την περίπτωση διάτρησης όπως προέκυψε προηγουμένως, είναι:

$$r = 0.0015 \text{ m και open area} = 15\%.$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, προκύπτει αριθμός οπών:

$$N = 6.78$$

Για την ικανοποίηση όμως των δύο βασικών απαιτήσεων που αναφέρθηκαν, του ακέραιου και όχι πρώτου αριθμού, τελικά ο αριθμός οπών μπορεί να πάρει μία από τις παρακάτω τιμές:

$$N = 8$$

$$N = 6$$

Η μεταβολή αυτή, όπως είναι φυσικό θα μεταβάλλει ελαφρώς και το ποσοστό κενού χώρου που χαρακτηρίζει το μοντέλο. Υπολογίζοντας το μέγεθος των δύο μεταβολών, αυτές είναι αντίστοιχα 15% και 13%. Προτιμώτερη λοιπόν, είναι η επιλογή του μικρότερου αριθμού οπών, έτσι ώστε να μεταβληθεί κατά το δυνατόν λιγότερο το ποσοστό κενού χώρου διάτρησης.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο αριθμός των οπών κάθε διάστασης λαμβάνοντας υπόψιν κατά το δυνατόν την απαίτηση της ομοιόμορφης κατανομής τους, και προκύπτουν:

$$N_a = 2$$

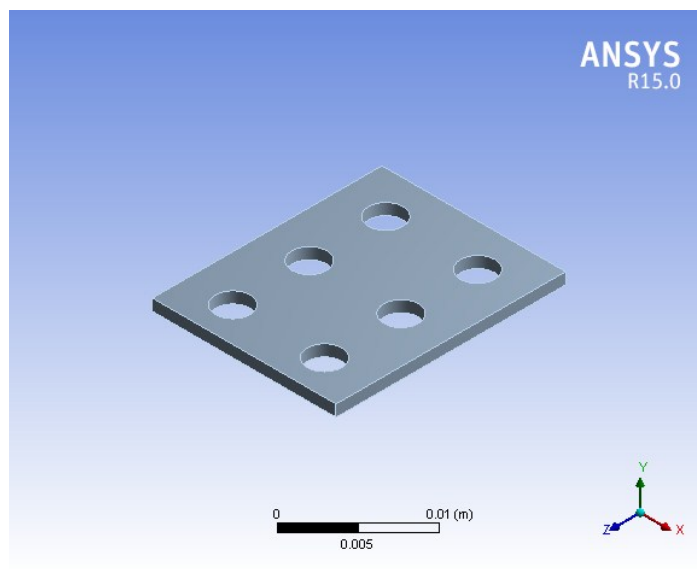
$$N_b = 3$$

Τέλος, για τον υπολογισμό της απόστασης των κέντρων των οπών σε κάθε διάσταση, η διεργασία είναι απλή και έχει ως εξής:

$$d_a = \frac{a}{N_a} = 0.008 \text{ m}$$

$$d_b = \frac{b}{N_b} = 0.007 \text{ m}$$

Παρατίθεται στο Σχήμα 5.1, σχηματική αναπαράσταση της διάτρητης επιφάνειας που αναπτύχθηκε.



Σχήμα 5.1 Σχηματική αναπαράσταση διάτρητου απορροφητή για την περίπτωση διάτρησης

#### 5.2.2.2 Χαρακτηριστικά για την περίπτωση μικροδιάτρητης πλάκας

Η διαδικασία υπολογισμού των απαιτούμενων γεωμετρικών παραμέτρων θα είναι η ίδια που ακολουθήθηκε και παραπάνω, για το μοντέλο μικροδιάτρησης με τα χαρακτηριστικά που έχουν καθορισθεί:

$$r = 0.0005 \text{ m και open area} = 10\%$$

Ο αριθμός των οπών υπολογίζεται:

$$N = 40.76$$

Ενώ έπειτα από στρογγυλοποίηση, για λόγους ικανοποίησης των περιορισμών προκύπτει:

$$N = 42$$

Το ποσοστό κενού χώρου, λόγω της στρογγυλοποίησης μεταβάλλεται κατά 3%, επομένως πρόκειται για αμελητέα μεταβολή.

Ο αριθμός των οπών που αντιστοιχεί σε κάθε διάσταση της πλάκας προκύπτει:

$$N_a = 6$$

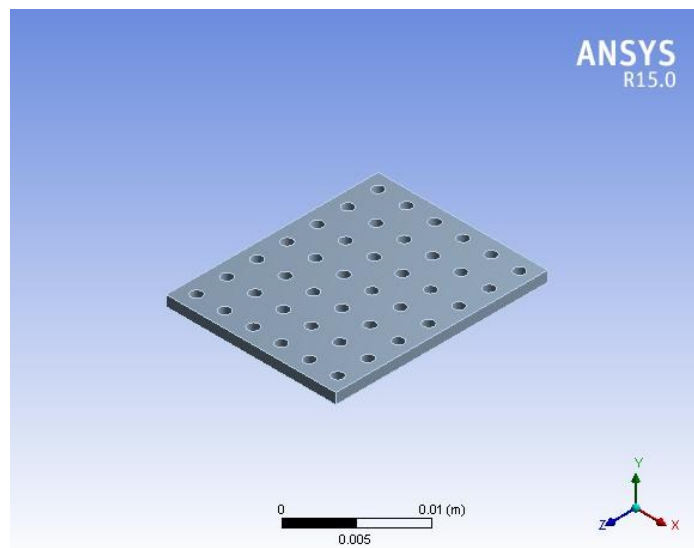
$$N_b = 7$$

Τέλος, υπολογίζονται οι αντίστοιχες αποστάσεις των οπών σε κάθε διάσταση:

$$d_a = \frac{a}{N_a} = 0.003 \text{ m}$$

$$d_b = \frac{b}{N_b} = 0.003 \text{ m}$$

Η σχηματική αναπαράσταση της διάτρητης επιφάνειας για την περίπτωση μικροδιάτρησης φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 5.2.

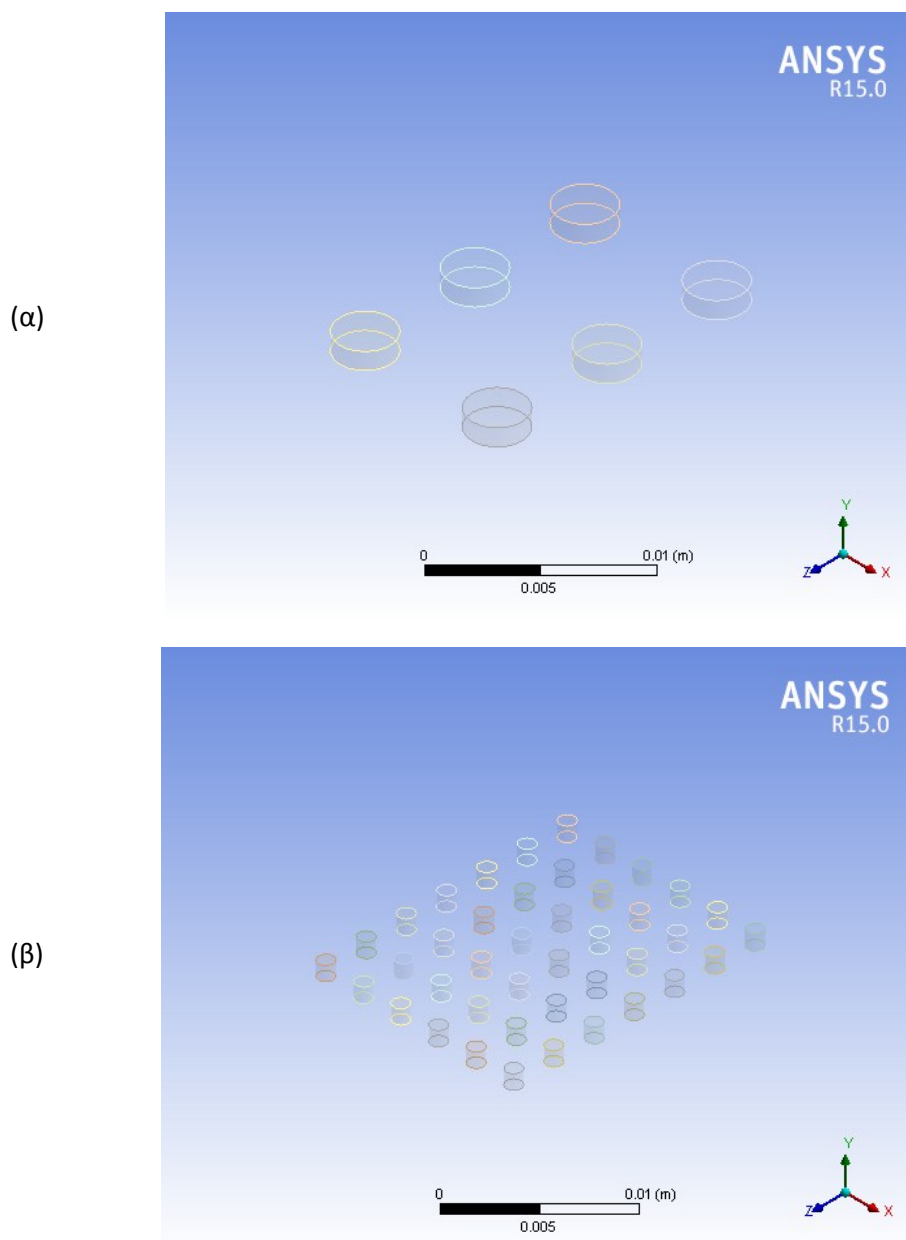


**Σχήμα 5.2** Σχηματική αναπαράσταση διάτρητου απορροφητή για την περίπτωση μικροδιάτρησης

### 5.2.2.3 Συνολική δομή νέου υπολογιστικού μοντέλου

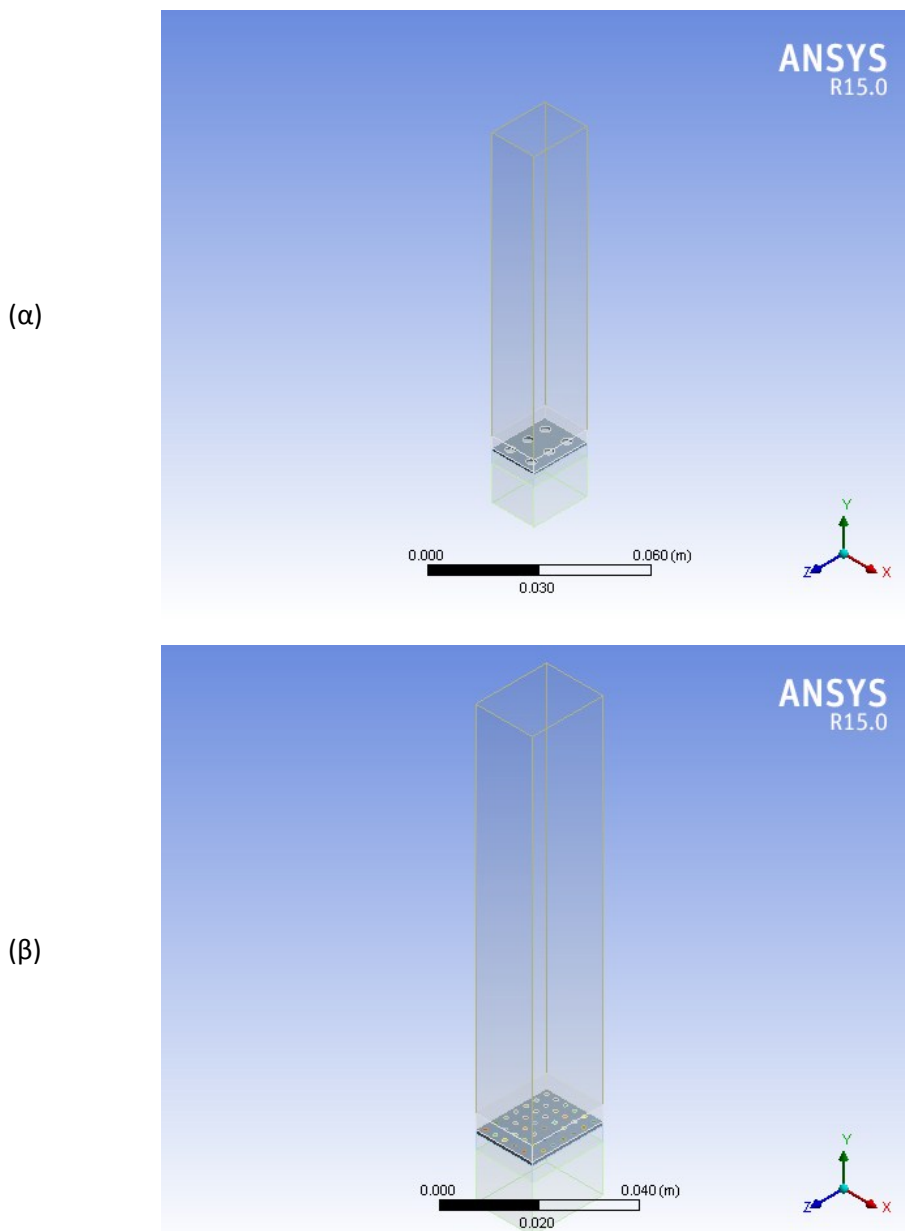
Η νέα υπολογιστική δομή, εκτός από τη διάτρητη επιφάνεια, αποτελείται, όπως και στην προηγούμενη ανάλυση, από το ρεύμα ρευστού που προσπίπτει σ' αυτήν και τον πορώδη απορροφητή που την ακολουθεί. Όπως έχει επεξηγηθεί, ο ορισμός ρευστών και ισοδύναμων μοντέλων ρευστών, επιτυγχάνεται μέσω εισαγωγής ακουστικών σωμάτων (Acoustic Body). Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού των ιδιοτήτων του αέρα και του πορώδη απορροφητή, οι οποίες παραμένουν αμετάβλητες σε σχέση με τις προηγούμενες αναλύσεις, γι' αυτό και δεν επεξηγούνται περισσότερο.

Παρόλα αυτά, ένα σημείο που διαφοροποιείται σημαντικά, είναι πως σ' αυτήν την περίπτωση η αλληλεπίδραση ρευστού – στερεού σώματος ορίζεται γεωμετρικά. Αυτό σημαίνει πως το ρευστό που προσπίπτει στην διάτρητη επιφάνεια, στη συνέχεια την διαπερνά, περνώντας μέσα από τις οπές και τέλος καταλήγει στην επιφάνεια του πορώδη απορροφητή. Είναι φανερό λοιπόν, πως απαιτείται ο σχεδιασμός του ρευστού που βρίσκεται μέσα στις οπές της διάτρητης επιφάνειας, καθώς χωρίς τον ορισμό των σωμάτων αυτών, η ανάλυση στερείται φυσικής σημασίας. Παρατίθεται στη συνέχεια, η γεωμετρία των σωμάτων αυτών για πλήρη κατανόηση, για τις δύο περιπτώσεις διάτρησης και μικροδιάτρησης (Σχήμα 5.3).



**Σχήμα 5.3** Τμήμα ρευστού εσωτερικά των οπών για την περίπτωση (α) διάτρησης και (β) μικροδιάτρησης  
Τα πλήρη μοντέλα, για περιπτώσεις διάτρησης και μικροδιάτρησης απεικονίζονται παρακάτω (Σχήμα 5.4).





**Σχήμα 5.4** Συνολική δομή νέου υπολογιστικού μοντέλου για την περίπτωση (α) διάτρησης και (β) μικροδιάτρησης

Από τη στιγμή που η νέα ανάλυση περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση ρευστού και στερεού σώματος, είναι απαραίτητος ο ορισμός των επαφών τους, καθώς και του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το στερερό σώμα.

Κατά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού της δομής, η ομαδοποίηση όλων των επιμέρους σωμάτων σε ένα ενιαίο κομμάτι (part), θα εξασφαλίσει την αυτόματη επιλογή των επιφανειών που αλληλεπιδρούν από το ίδιο το λογισμικό. Επομένως, στην ανάλυση αυτή οι διεπιφάνειες διαμορφώνονται αυτόματα, μόνο από τον ορισμό των σωμάτων ως ρευστά και στερεά σώματα (Σχήμα 5.5). Εάν αυτό το βήμα παραλειφθεί, είναι απαραίτητη η χειροκίνητη επιλογή όλων των διεπιφανειών, διαφορετικά δεν είναι δυνατόν να προκύψουν αποτελέσματα.



Σχήμα 5.5 Ρύθμιση επιφανειών επαφής

Όσον αφορά στην ανάθεση του υλικού της διάτρητης πλάκας, επιλέγεται μέσω του μενού που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο το υλικό που έχει καταχωρηθεί στις βιβλιοθήκες του λογισμικού και αναπαριστά ένα ύφασμα. Οι ιδιότητές του φαίνονται αμέσως παρακάτω στο Σχήμα 5.6.

Properties of Outline Row 3: Fabric				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
2	Density	500	kg m <sup>-3</sup>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Isotropic Elasticity			<input checked="" type="checkbox"/>
4	Derive from	Young's Modu...		
5	Young's Modulus	2.5E+07	Pa	
6	Poisson's Ratio	0.3		
7	Bulk Modulus	2.0833E+07	Pa	
8	Shear Modulus	9.6154E+06	Pa	

Σχήμα 5.6 Μηχανικές ιδιότητες υφάσματος

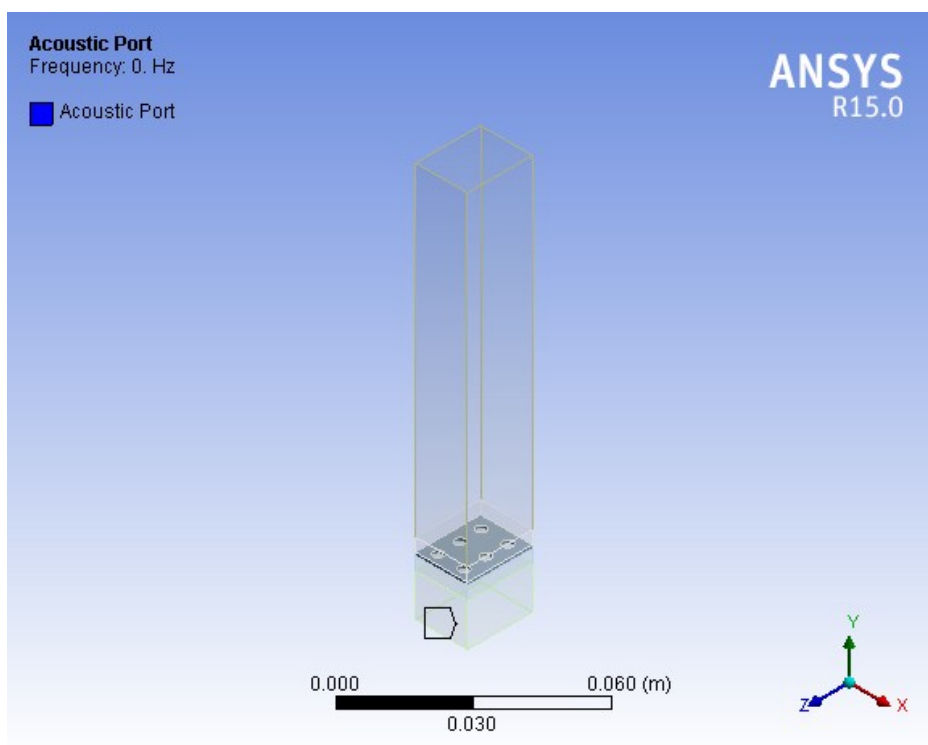
### 5.2.3 Καθορισμός φορτίων και οριακών συνθηκών

Στα πλαίσια της μελέτης του ίδιου φυσικού προβλήματος, η πηγή ήχου και τα χαρακτηριστικά της δεν μεταβάλλονται. Επομένως, η διέγερση εξακολουθεί να είναι μία σημειακή πηγή η οποία εφαρμόζεται στην εξωτερική επιφάνεια του ρεύματος αέρα μέσω επιβολής της Κάθετης Επιφανειακής Ταχύτητας (Normal Surface Velocity). Το ίδιο συμβαίνει και για τη βασική οριακή συνθήκη ακτινοβολίας (Radiation Boundary), μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η πλήρης απορρόφηση των προσπίπτοντων ηχητικών κυμάτων.

Επόμενη οριακή συνθήκη, απαραίτητη και στη νέα υπολογιστική ανάλυση, είναι ο ορισμός των ακουστικών περιοχών μέσω του ορισμού Διόδου (Port). Στην παρούσα διερεύνηση, ο λόγος χρήσης της, περιορίζεται στον υπολογισμό των αποτελεσμάτων ηχητικής ισχύος, καθώς ο σχεδιασμός της διάτρητης επιφάνειας ως στερεό σώμα δεν απαιτεί τη χρήση μεταβατικού πίνακα αγωγιμότητας (Transfer Admittance Matrix). Επομένως, από τη στιγμή που το ενδιαφέρον εστιάζεται στον συνολικό συντελεστή απορρόφησης της δομής, η συνθήκη Port θα εφαρμοστεί μεταξύ ανώτερης και κατώτερης επιφάνειας του υπολογιστικού μοντέλου. Ακολουθεί απεικόνιση των χαρακτηριστικών (Σχήμα 5.7, Σχήμα 5.9) και της γεωμετρίας (Σχήμα 5.8, Σχήμα 5.10) επιβολής της οριακής συνθήκης για την κάθε περίπτωση διάτρησης.

Details of "Acoustic Port"	
[-] <b>Port Surface</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] <b>Inside Surface Bodies</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	11 Bodies
[-] <b>Definition</b>	
Port Number	2

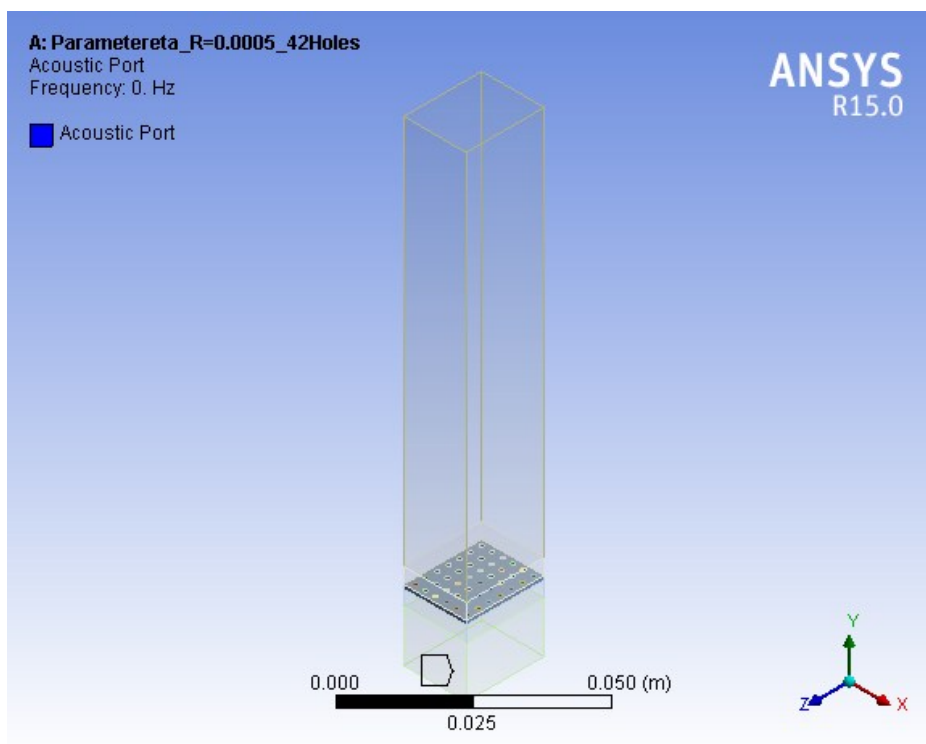
Σχήμα 5.7 Ορισμός χαρακτηριστικών οριακής συνθήκης ορισμού ακουστικής περιοχής για την περίπτωση διάτρησης



Σχήμα 5.8 Γεωμετρία επιβολής οριακής συνθήκης ορισμού ακουστικής περιοχής για την περίπτωση διάτρησης

Details of "Acoustic Port"	
[-] <b>Port Surface</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] <b>Inside Surface Bodies</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	47 Bodies
[-] <b>Definition</b>	
Port Number	2

Σχήμα 5.9 Ορισμός χαρακτηριστικών οριακής συνθήκης ορισμού ακουστικής περιοχής για την περίπτωση μικροδιάτρησης



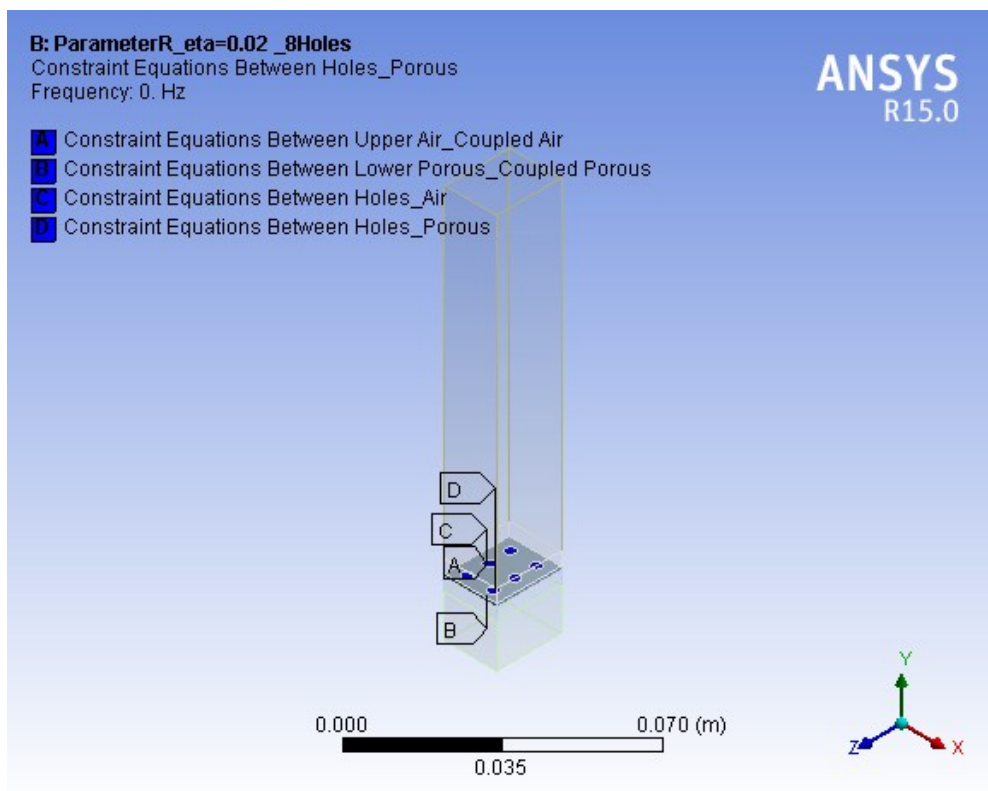
**Σχήμα 5.10** Γεωμετρία επιβολής οριακής συνθήκης ορισμού ακουστικής περιοχής για την περίπτωση μικροδιάτρησης

Όπως παρατηρείται από τα χαρακτηριστικά επιβολής της οριακής συνθήκης, είναι απαραίτητη η επιλογή όλων των σωμάτων που συνθέτουν το συνολικό μοντέλο, καθώς αυτά αναπαριστούν το πεδίο ροής, προκειμένου να προκύψουν σωστά αποτελέσματα ηχητικής ισχύος.

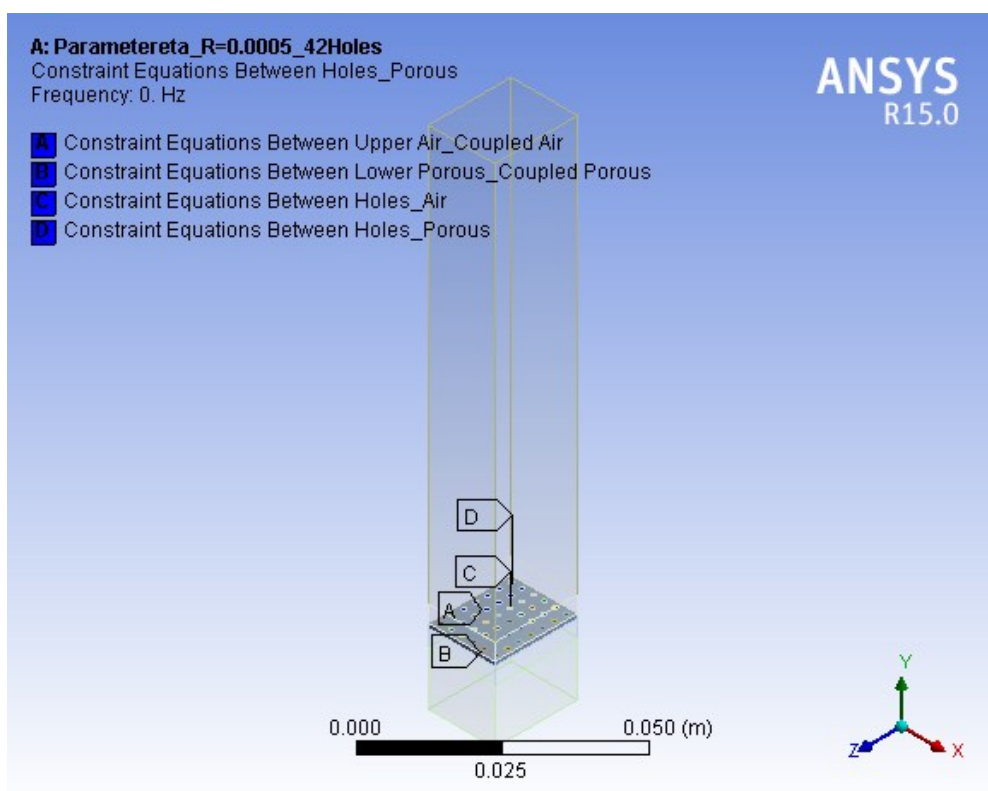
Η τελευταία οριακή συνθήκη σύνδεσης ακουστικών μερών (Constraint Equations Between Acoustic Parts), επιβάλλεται μεταξύ όλων των διεπιφανειών των ισοδύναμων ρευστών, και αφορά στις δυνατότητες κίνησης των κόμβων που βρίσκονται σε αυτές, επιτρέποντας κάθετη και οριζόντια μετακίνηση. Ακολουθεί η αναπαράσταση της γεωμετρίας επιβολής της οριακής συνθήκης για κάθε περιοχή στο Σχήμα 5.11.

Παρατηρώντας τα σχήματα αυτά, φαίνεται πως τα ακουστικά σώματα του αέρα και του πορώδη απορροφητή έχουν διαιρεθεί σε δύο το καθένα. Αυτή η τροποποίηση έγινε για λόγους που αφορούν στην αλληλεπίδραση ρευστού και στερεού σώματος και θα αναλυθούν σε επόμενη παράγραφο. Στο σημείο αυτό, σημασία έχει η κατανόηση του πολλαπλού ορισμού της οριακής συνθήκης, για λόγους περιορισμού κίνησης κόμβων μεταξύ ακουστικών σωμάτων, όπως έχει ήδη εξηγηθεί.

(α)



(β)



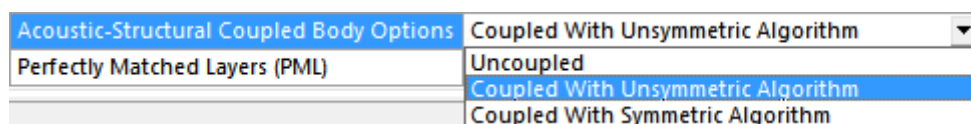
Σχήμα 5.11 Γεωμετρία επιβολής οριακής συνθήκης περιορισμού κόμβων για την περίπτωση (α) διάτρησης και (β) μικροδιάτρησης

### 5.3 Δημιουργία πλέγματος

Κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας σχεδιασμού της υπολογιστικής δομής και πριν την επίλυση και απόκτηση των αποτελεσμάτων, απαραίτητο βήμα αποτελεί η διακριτοποίηση της γεωμετρίας με πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Στην περίπτωση της αλληλεπίδρασης ρευστού και στερεού σώματος, όπως έχει αναλυθεί εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο, έχει σημασία η επιλογή των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων.

Τα στερεά σώματα διακριτοποιούνται με δομικά πεπερασμένα στοιχεία που έχουν ως βαθμούς ελευθερίας τη μετατόπιση, ενώ ένα ρευστό σώμα μοντελοποιείται με χρήση πεπερασμένων στοιχείων με βαθμούς ελευθερίας την πίεση. Ωστόσο, σημαντικό σημείο της ανάλυσης που πραγματοποιείται, είναι η ανάγκη για σύζευξη των δύο τύπων σωμάτων, ρευστών και στερεών. Σύμφωνα με προηγούμενες αναφορές, η σύζευξή τους επιτυγχάνεται με ορισμό, στην διεπιφάνειά τους, πεπερασμένων στοιχείων με βαθμούς ελευθερίας τόσο πίεσης όσο και μετατόπισης. Μέσω αυτών, γίνεται δυνατή η μηχανική αλληλεπίδρασή τους καθώς η δόνηση που αναπτύσσεται στα στερεά σώματα λόγω της ηχητικής τους διέγερσης, προκαλεί απόκριση πίεσης στα ρευστά. Στην περίπτωση που δεν γίνει χρήση αυτών των πεπερασμένων στοιχείων στις διεπιφάνειες των σωμάτων, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν δεν θα είναι ρεαλιστικά.

Στα πλαίσια της νέας ανάλυσης, η αλληλεπίδραση ρευστού – στερεού σώματος ορίζεται μέσω της επιλογής ακουστικής – δομικής σύζευξης, που δίνεται στο μενού των ακουστικών σωμάτων (Σχήμα 5.12). Πιο συγκεκριμένα, επιλέγεται η σύζευξη με ασύμμετρα μητρώα, μέσω της οποίας εξασφαλίζεται η χρήση των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 5.12 Σύζευξη ρευστού – στερεού σώματος

Εφόσον ο ορισμός τους είναι δυνατός μέσω προσδιορισμού χαρακτηριστικών των ακουστικών σωμάτων, είναι φανερό πως οι υποψήφιες γεωμετρίες που βρίσκονται σε επαφή με τη στερεή διάτρητη επιφάνεια και επομένως οφείλουν να φέρουν πεπερασμένα στοιχεία σύζευξης, είναι ο αέρας που προσπίπτει στην διάτρητη επιφάνεια, ο αέρας που τη διαπερνά και ο πορώδης απορροφητής που ακολουθεί. Με τον τρόπο αυτόν, ικανοποιούνται οι απαιτήσεις της ανάλυσης για πιστή αναπαράσταση του φυσικού προβλήματος, αλλά προκύπτει το ζήτημα του υψηλού υπολογιστικού κόστους. Για το λόγο αυτό, γίνεται προσπάθεια χρήσης όσο το δυνατόν λιγότερων στοιχείων με αυτές τις ιδιότητες.

Παρατηρώντας τις επιλογές που δίνονται στο παραπάνω μενού, φαίνεται η δυνατότητα χρήσης συμμετρικών μητρώων για τη σύζευξη σωμάτων. Η χρήση συμμετρικών μητρώων διευκολύνει τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου της ανάλυσης, καθώς οι ανάγκες αποθήκευσης και επεξεργασίας τιμών από το λογισμικό είναι μειωμένες στο μισό συγκριτικά με την περίπτωση ασύμμετρων σχηματισμών. Ενδεικτικά, ο παρακάτω πίνακας συγκρίνει το

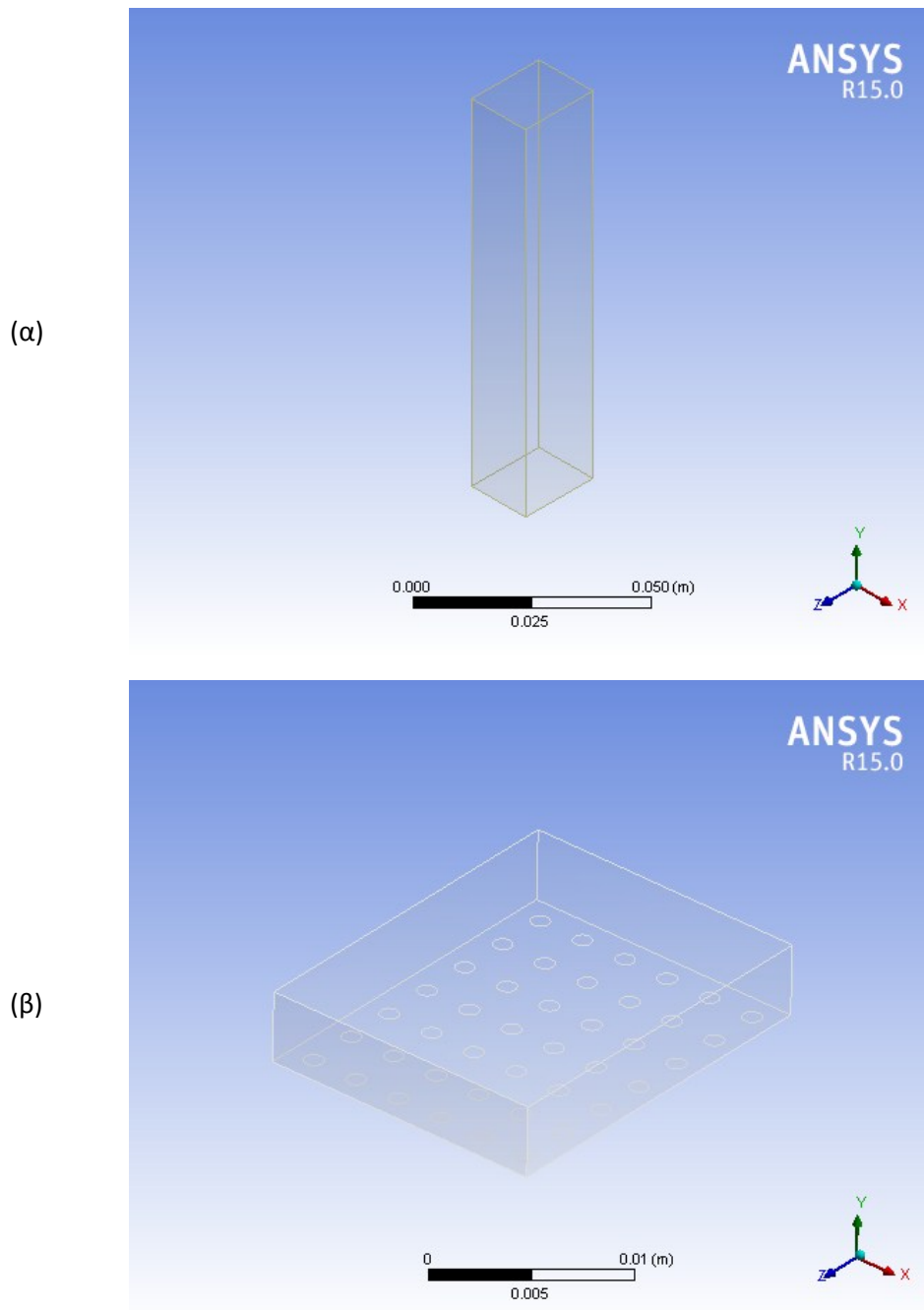
συνολικό χρόνο επιτάχυνσης απόκτησης λύσης για μία ανάλυση 275 βαθμών ελευθερίας με έναν διπλό τετραπύρηνο επεξεργαστή Intel Xeon E5530 (Σχήμα 5.13).

Cores	Solver	Option	Speed-up
1	Sparse	Unsym	1.00
1	Sparse	Sym	1.64
2	Sparse	Unsym	1.00
2	Sparse	Sym	1.56
4	Sparse	Unsym	1.00
4	Sparse	Sym	1.50

Σχήμα 5.13 Σύγκριση υπολογιστικού χρόνου με χρήση συμμετρικών και ασύμμετρων μητρώων στη σύζευξη σωμάτων [5]

Η ταχύτερη απόκριση του συμμετρικού τρόπου επίλυσης θα πρέπει να αξιολογηθεί σε συνάρτηση με το μέγεθος του μοντέλου προς προσομοίωση. Στην περίπτωση ενός περίπλοκου και μεγάλου μοντέλου, είναι πιθανόν η χρήση ασύμμετρων μητρώων σε μικρότερα ακουστικά σώματα να δώσει ταχύτερα αποτελέσματα. Επιπλέον, στα ασύμμετρα μοντέλα υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού τους με μη συζευγμένα σώματα κάτι που δεν εξασφαλίζεται με χρήση συμμετρικών σχηματισμών.

Τελικά, στην τρέχουσα ανάλυση, επιλέγεται η χρήση ασύμμετρων μητρώων τα οποία εφαρμόζονται σε μικρότερου μεγέθους ακουστικά σώματα. Πιο αναλυτικά, ο αέρας που προσπίπτει στη διάτρητη επιφάνεια σχεδιάζεται ως δύο σώματα, διαδοχικά, που το καθένα μοντελοποιείται με χρήση διαφορετικών πεπερασμένων στοιχείων. Το πρώτο σώμα θεωρείται μη συζευγμένο και τα χαρακτηριστικά του είναι πανομοιότυπα με το αντίστοιχο της προηγούμενης ανάλυσης, ενώ το δεύτερο σώμα που βρίσκεται σε επαφή με την διάτρητη επιφάνεια προσομοιώνεται με χρήση ασύμμετρων μητρώων σύζευξης. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τον πορώδη απορροφητή, δηλαδή και αυτός διαιρείται σε δύο επιμέρους σώματα, που φέρουν τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται παραπάνω. Επιπλέον, ο αέρας που βρίσκεται στο εσωτερικό των όπων, είναι προφανές πως θα μοντελοποιηθεί με συζευγμένα πεπερασμένα στοιχεία. Ενδεικτικά, παρατίθενται οι γεωμετρίες (Σχήμα 5.14) και τα μενού ορισμού ακουστικών σωμάτων (Σχήμα 5.15) για τα δύο σώματα που αντιπροσωπεύουν τον αέρα.



Σχήμα 5.14 Σχηματική αναπαράσταση (α) μη συζευγμένου και (β) συζευγμένου σώματος αέρα



(α)

Details of "Upper Air"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
<b>Definition</b>	
Temperature Dependency	No
Frequency Dependency	No
Mass Density	1.2041 [kg m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]
Sound Speed	343.24 [m sec <sup>-1</sup> ]
Dynamic Viscosity	0 [Pa sec]
Bulk Viscosity	0 [Pa sec]
Thermal Conductivity	0 [W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Specific Heat Cp	0 [J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Specific Heat Cv	0 [J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Equivalent Fluid of Perforated Material	No
Low Reduced Frequency Model	No
Reference Pressure	2E-05 [Pa]
Reference Static Pressure	101325 [Pa]
Acoustic-Structural Coupled Body Options	Uncoupled
Perfectly Matched Layers (PML)	Off

(β)

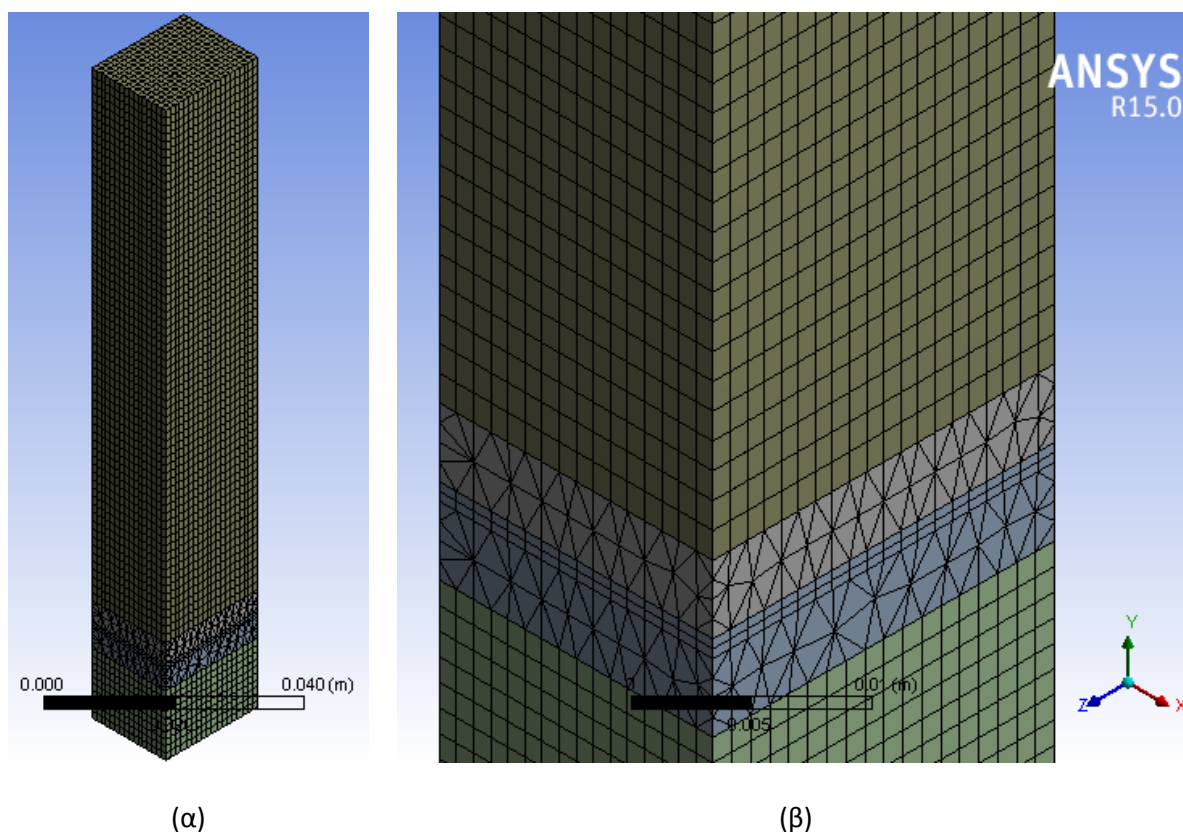
Details of "Coupled Air"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
<b>Definition</b>	
Temperature Dependency	No
Frequency Dependency	No
Mass Density	1.2041 [kg m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]
Sound Speed	343.24 [m sec <sup>-1</sup> ]
Dynamic Viscosity	0 [Pa sec]
Bulk Viscosity	0 [Pa sec]
Thermal Conductivity	0 [W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Specific Heat Cp	0 [J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Specific Heat Cv	0 [J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]
Equivalent Fluid of Perforated Material	No
Low Reduced Frequency Model	No
Reference Pressure	2E-05 [Pa]
Reference Static Pressure	101325 [Pa]
Acoustic-Structural Coupled Body Options	Coupled With Unsymmetric Algorithm
Perfectly Matched Layers (PML)	Off

Σχήμα 5.15 Αναπαράσταση μενού ορισμού (α) μη συζευγμένου και (β) συζευγμένου ακουστικού σώματος

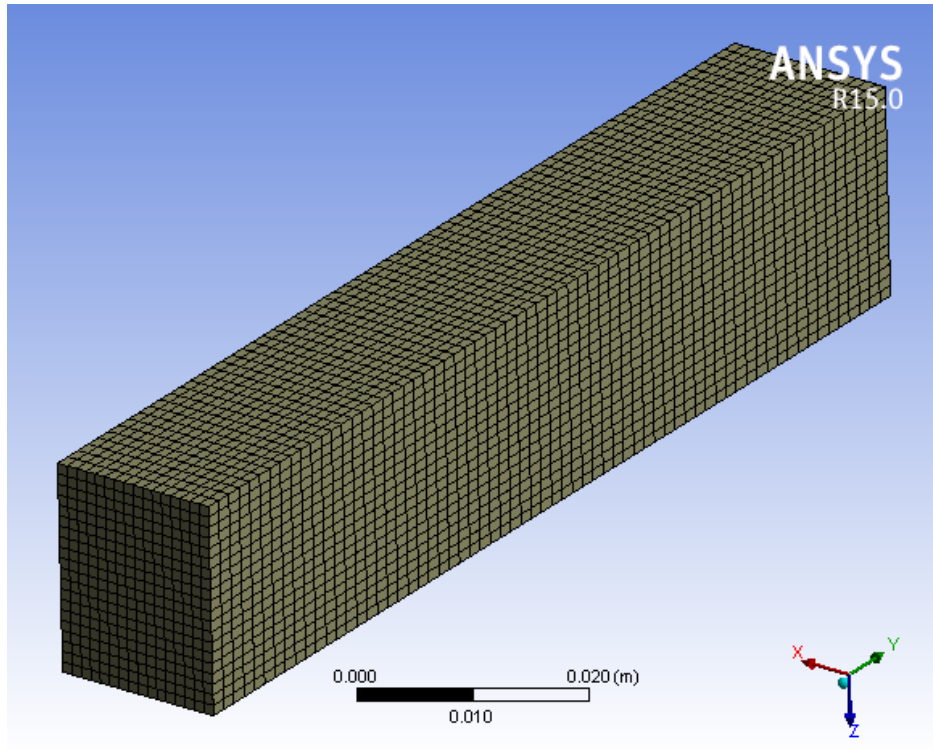
Ένα σημείο που χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά στην ανάπτυξη πλέγματος, είναι πως στην αλληλεπίδραση ρευστού – στερεού σώματος, απαιτείται η απόλυτη αντιστοίχιση κόμβων μεταξύ των επιφανειών διαφορετικών σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή, προκειμένου να είναι δυνατή η χρήση των ασύμμετρων μητρώων. Κάτι τέτοιο δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί στη νέα ανάλυση, καθώς η εισαγωγή περίπλοκων γεωμετριών προς προσομοίωση, έχει καταστήσει αδύνατη τη δημιουργία τετραγωνικού επιφανειακού πλέγματος σε όλα τα σώματα όπως προηγουμένως. Ο μοναδικός τρόπος που εξασφαλίζει όμοιο πλέγμα στις διεπιφάνειες των σωμάτων, είναι ομαδοποιώντας όλα τα σώματα της δομής, ρύθμιση που εισήχθη ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού.

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η ομαδοποίηση των σωμάτων ως ένα ενιαίο κομμάτι (Part), χρησιμεύει στην αυτόματη επιλογή των επιφανειών επαφής τους. Με τον ίδιο τρόπο, από τη

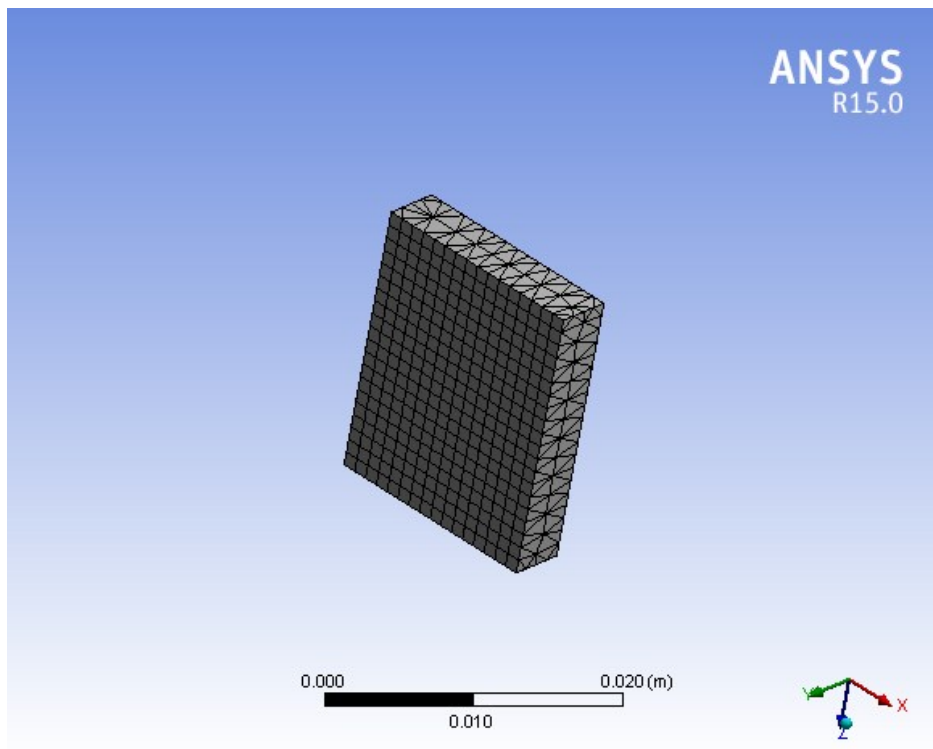
στιγμή που το λογισμικό όρισε αυτόματα τις διεπιφάνειες των σωμάτων, εξασφαλίζει επιπλέον και την πλεγματοποίησή τους ως ένα ενιαίο κομμάτι (Σχήμα 5.16). Η ικανοποίηση λοιπόν, αυτής της σημαντικότητας συνθήκης για την απόκτηση των αποτελεσμάτων, γίνεται εφικτή σχετικά απλά. Παρουσιάζονται παρακάτω εικόνες των επιφανειών της δομής για την περίπτωση διάτρησης, που ικανοποιούν την απαίτηση των αντιστοιχισμένων πλεγμάτων (Σχήμα 5.17 - Σχήμα 5.24). Στην περίπτωση μικροδιάτρησης, τα χαρακτηριστικά είναι πανομοιότυπα και γι' αυτό παραλείπεται η σχηματική αναπαράστασή τους.



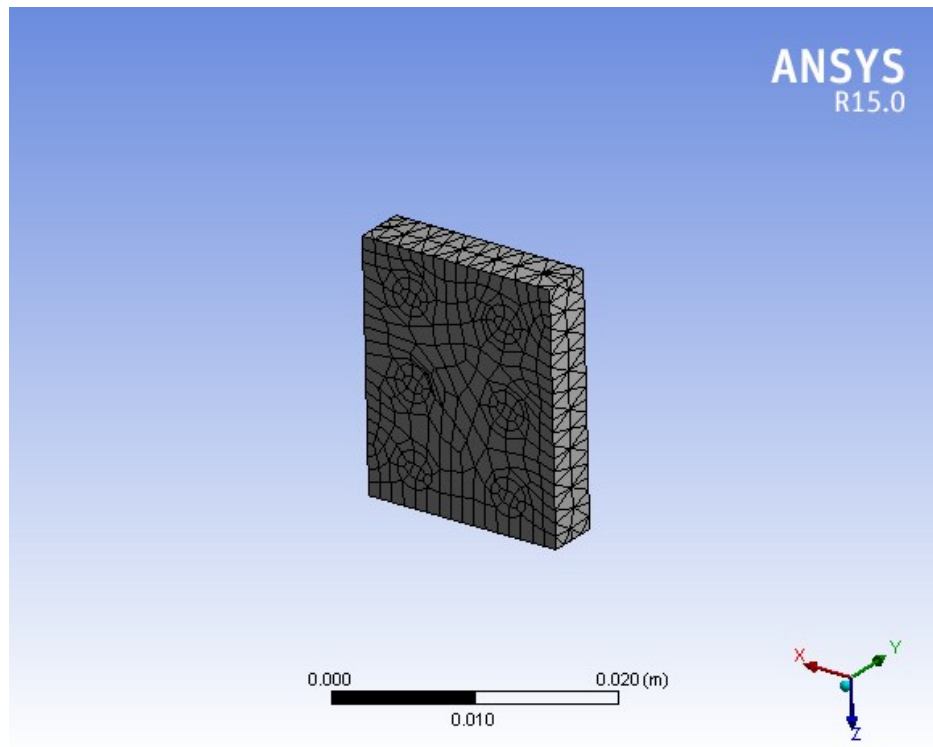
Σχήμα 5.16 Πλεγματοποίηση (α) συνολικής δομής υπολογιστικού μοντέλου και (β) λεπτομέρεια



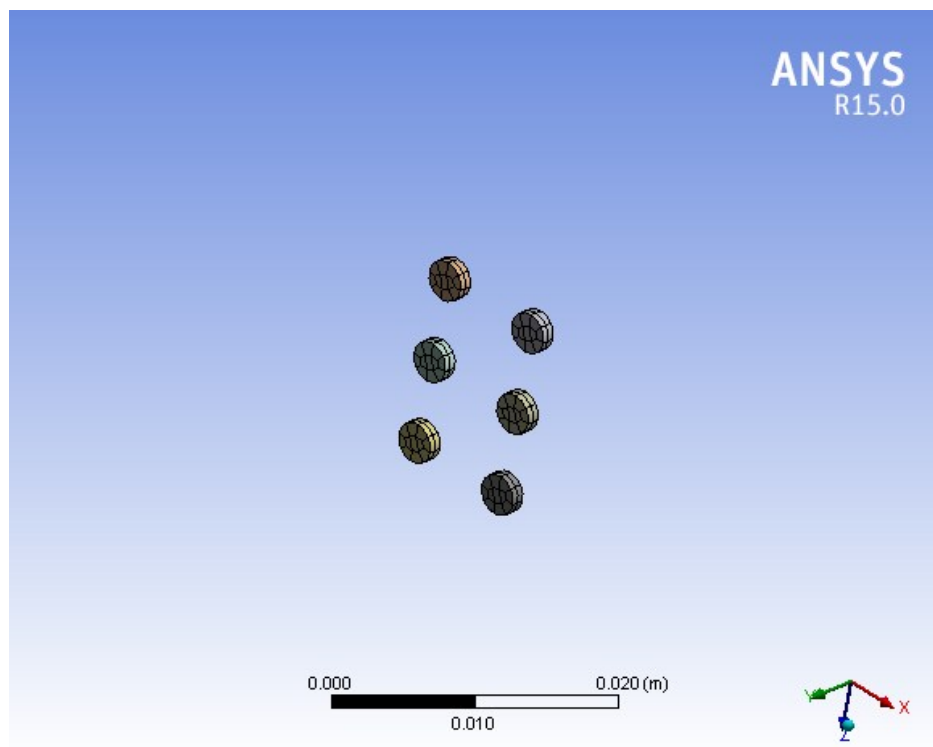
Σχήμα 5.17 Πλέγμα κατώτερης επιφάνειας μη συζευγμένου σώματος αέρα



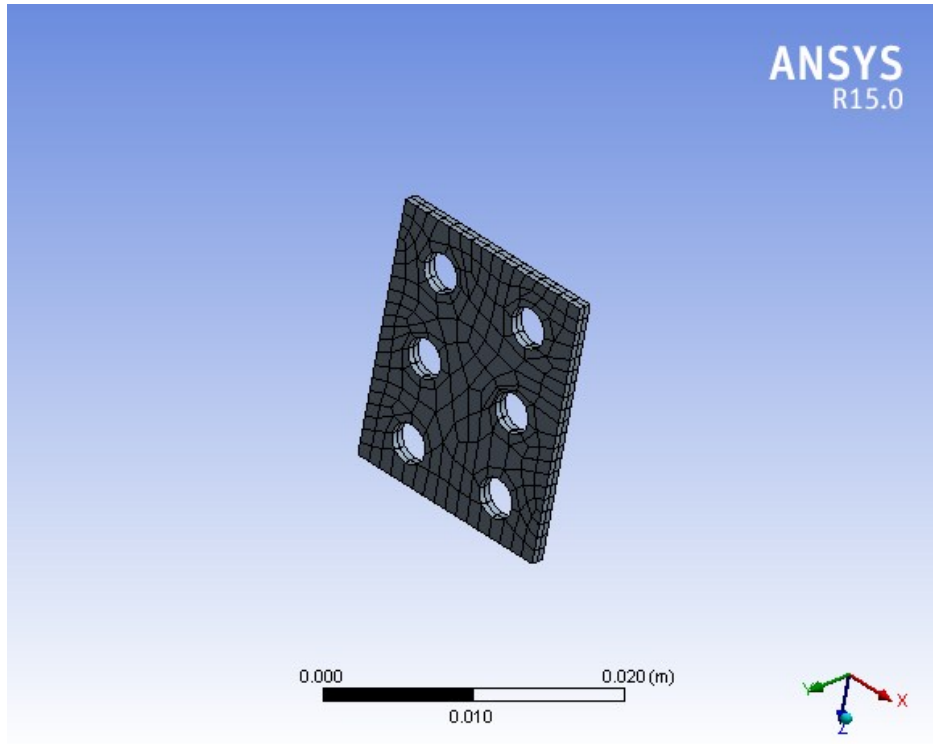
Σχήμα 5.18 Πλέγμα ανώτατης επιφάνειας συζευγμένου σώματος αέρα



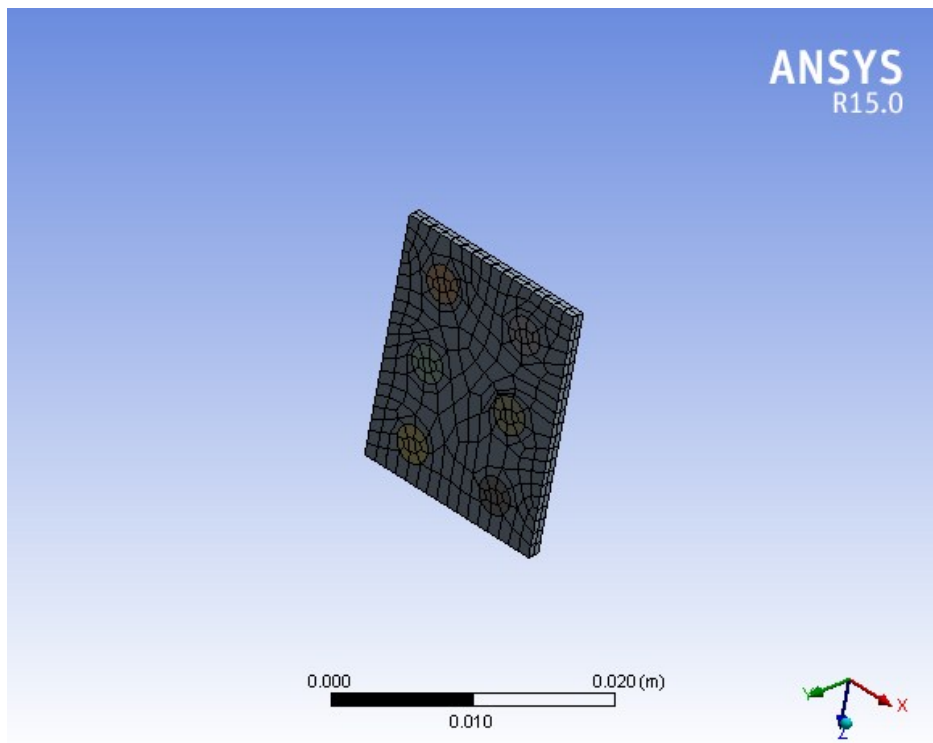
Σχήμα 5.19 Πλέγμα κατώτατης επιφάνειας συζευγμένου σώματος αέρα



Σχήμα 5.20 Πλέγμα ανώτατης επιφάνειας αέρα στο εσωτερικό οπών

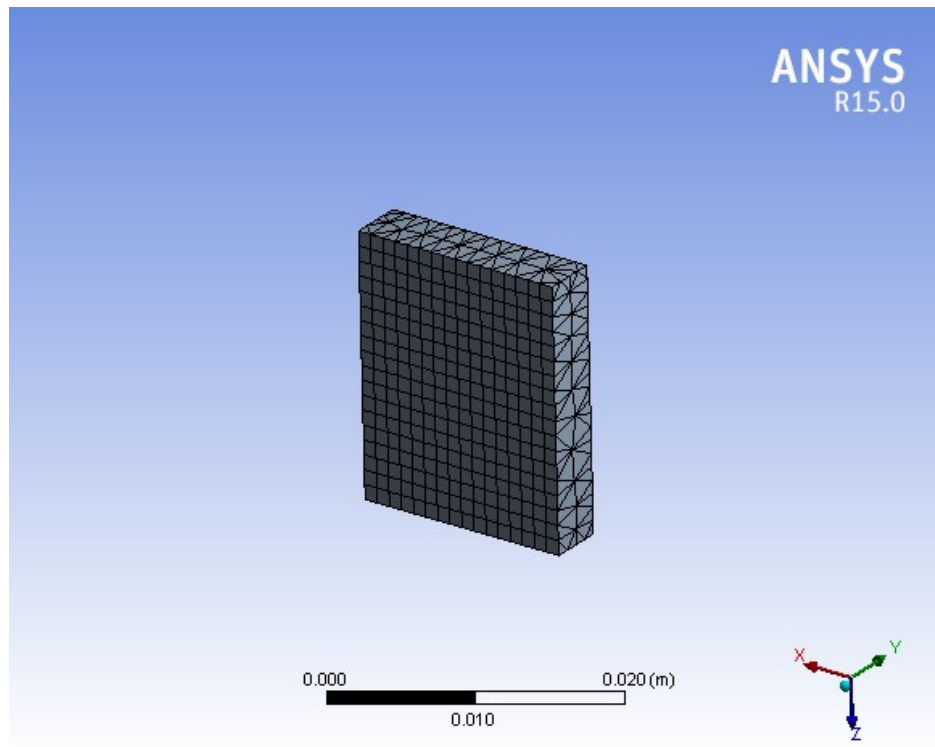


Σχήμα 5.21 Πλέγμα ανώτατης επιφάνειας διάτρητου απορροφητή

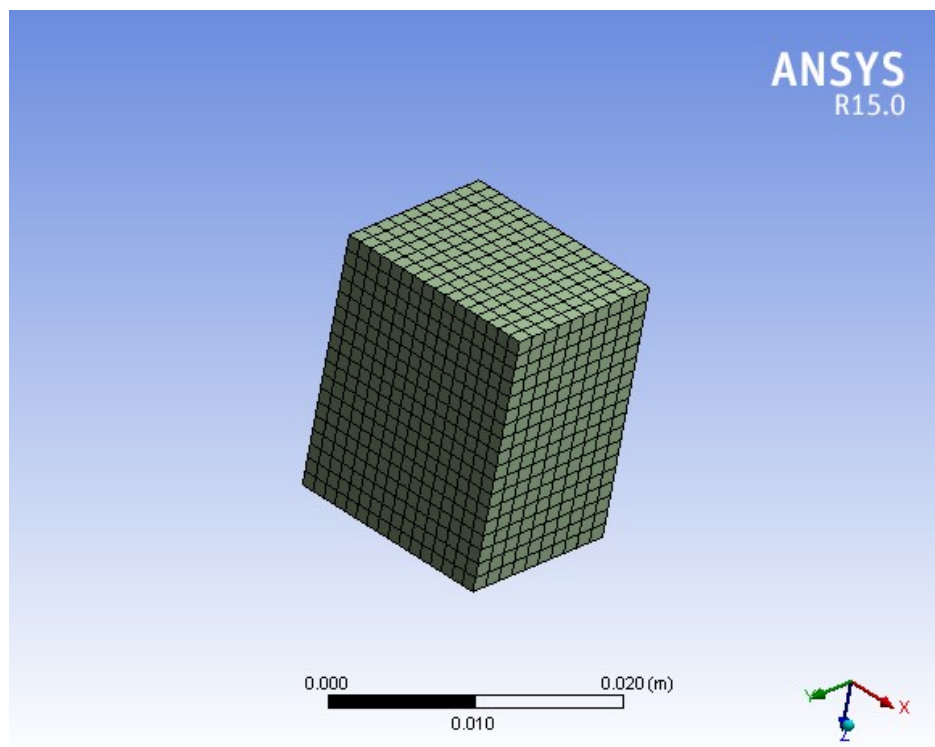


Σχήμα 5.22 Πλέγμα ενοποιημένου μοντέλου αέρα – διάτρητου απορροφητή

Κατ'αντιστοιχία, οι αντιδιαμετρικές επιφάνειες των εικονιζόμενων σωμάτων δηλαδή του διάτρητου απορροφητή, του αέρα που τον διαπερνά και του πορώδη απορροφητή φέρουν όμοιο πλέγμα με αυτές, γι'αυτό το λόγο παραλείπονται.



Σχήμα 5.23 Πλέγμα κατώτατης επιφάνειας συζευγμένου σώματος πορώδη απορροφητή



Σχήμα 5.24 Πλέγμα ανώτατης επιφάνειας μη συζευγμένου σώματος πορώδη απορροφητή

### 5.3.1 Διερεύνηση χαρακτηριστικών πλέγματος

Κύριος στόχος στην ανάπτυξη πλέγματος για τη νέα ανάλυση, αποτελεί η ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους. Φυσικά και το ζήτημα της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και κατ'επέκταση της προσομοίωσης με χρήση πυκνού πλέγματος είναι πρωτεύουσας σημασίας, παρ'όλα αυτά δεν είναι δυνατόν να αναπτυχθεί η διαδικασία διερεύνησης που έγινε στην προηγούμενη ανάλυση. Αυτό συμβαίνει γιατί το νέο μοντέλο, δεν γίνεται να προσομοιωθεί με δομημένο πλέγμα λόγω της γεωμετρίας των σωμάτων που το αποτελούν, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων και κόμβων ακόμα και για την πιο απλή περίπτωση συνθηκών πλεγματοποίησης.

Στα πλαίσια αυτών των δύο απαιτήσεων, της αυξημένης ταχύτητας επίλυσης και ακρίβειας αυτών, το πλέγμα θα αναπτυχθεί με λεπτομέρεια, όσο το επιτρέπουν οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι. Αυτό σημαίνει πως η διερεύνηση πλέγματος για τη νέα ανάλυση ακολουθεί αντίστροφη διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, εισάγονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις και γίνεται προσπάθεια ανάπτυξης πλέγματος. Εάν δεν είναι δυνατόν να προκύψει λύση για λόγους μειωμένων υπολογιστικών δυνατοτήτων, μεταβάλλονται οι αρχικές ρυθμίσεις υποβαθμίζοντας την ποιότητα του πλέγματος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου προκύψει λύση. Στη συνέχεια, ανάλογα με το χρόνο που χρειάστηκε για την επίλυση και απόκτηση αποτελεσμάτων θα κριθεί εάν είναι απαραίτητη ή όχι η διερεύνηση ως προς τη σύγκλιση αυτών.

Στην τρέχουσα ανάλυση, έπειτα από ποικίλλες προσπάθειες πλεγματοποίησης προέκυψαν τα μοντέλα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1, για την κάθε περίπτωση που μελετάται.

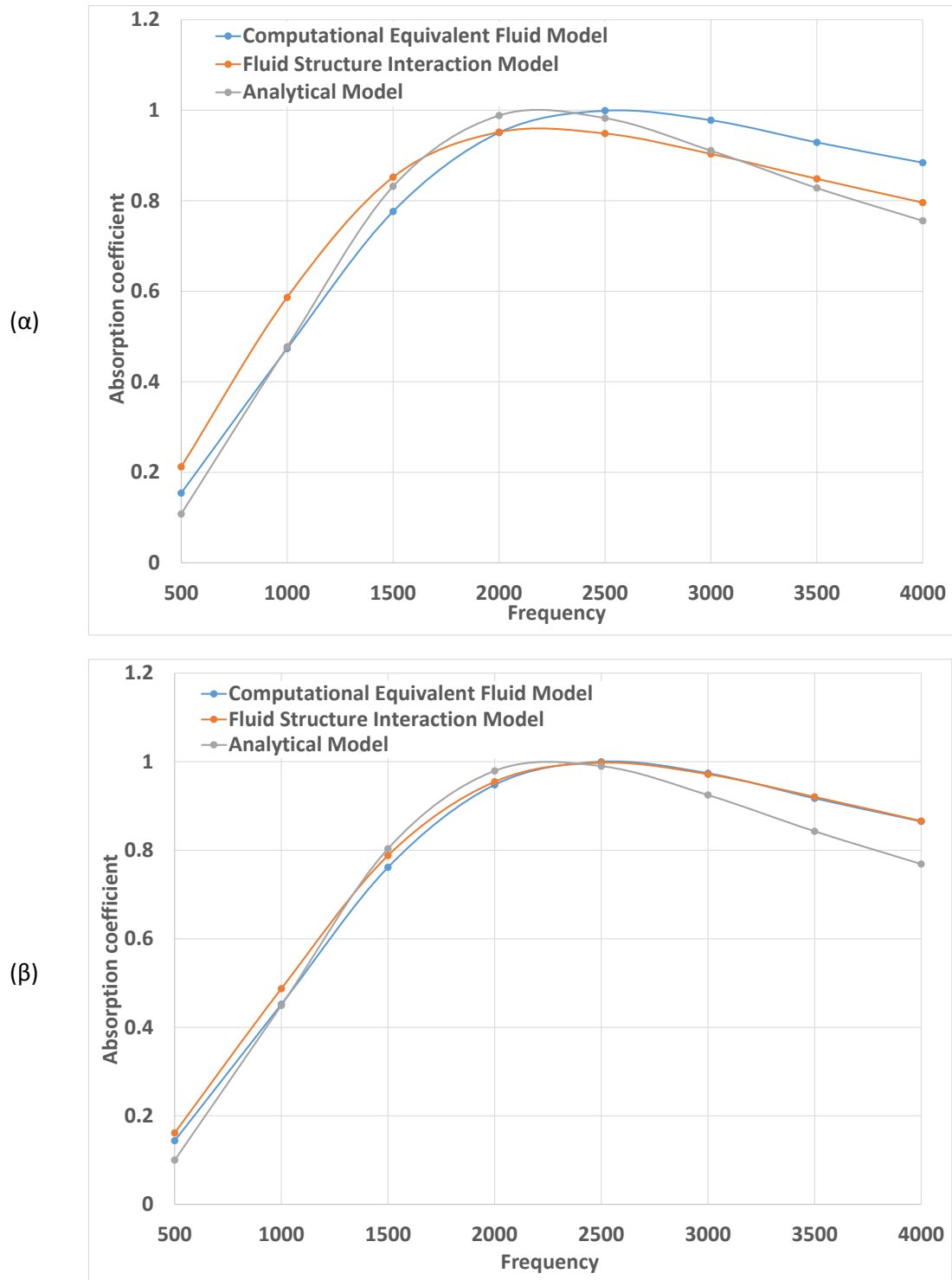
Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά πλέγματος για την περίπτωση διάτρησης και μικροδιάτρησης

Statistics	Διάτρηση	Μικροδιάτρηση
Nodes	118.127	148.138
Elements	31.168	46.652
Mesh Metric	None	None

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης προέκυψαν έπειτα από μία ώρα για ένα εύρος συχνοτήτων [0,4000] Hz με 8 διαμερίσεις. Ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτήθηκε, θεωρείται αποδεκτός για τέτοιου μεγέθους μοντέλα και ταυτόχρονα η συνθήκη της ακρίβειας των αποτελεσμάτων ικανοποιείται. Όπως γίνεται φανερό, δεν παρουσιάζεται ανάγκη για διερεύνηση σύγκλισης πλέγματος, καθώς μία τέτοια διαδικασία θα ήταν χρονοβόρα και δεν θα προσέδιδε κάποια βελτίωση στα αποτελέσματα.

## 5.4 Σύγκριση πραγματικού – υπολογιστικού – ημιεμπειρικού μοντέλου

Θα παρατεθούν παρακάτω (Σχήμα 5.25) τα αποτελέσματα των τριών μοντέλων σε ένα εύρος συχνοτήτων [0,4000] Hz με 8 διαμερίσεις, για λόγους ευκολίας σύγκρισης αυτών.



Σχήμα 5.25 Σύγκριση μοντέλων για την περίπτωση (α) διάτρησης και (β) μικροδιάτρησης

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν, είναι φανερό η διαφορετική συμπεριφορά του πραγματικού μοντέλου σε σχέση με τα δύο προγενέστερα. Πιο αναλυτικά, και στις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης η τάση του πραγματικού μοντέλου είναι να εμφανίζει ελαφρά αυξημένο συντελεστή απορρόφησης απ'ότι το υπολογιστικό μοντέλο



ισοδύναμων ρευστών στην περιοχή μέσων συχνοτήτων, ενώ στην περιοχή υψηλών η συμπεριφορά του μοντέλου διαφοροποιείται μεταξύ των δύο περιπτώσεων μελέτης.

Ειδικότερα, στην περίπτωση διάτρησης, οι τιμές του συντελεστή απορρόφησης μειώνονται σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του υπολογιστικού μοντέλου ισοδύναμων ρευστών, ενώ φαίνονται να προσεγγίζουν περισσότερο αυτές των ημιεμπειρικών. Αντίθετα, στην περίπτωση μικροδιάτρησης είναι φανερό η σύγκλιση στη συμπεριφορά των δύο υπολογιστικών μοντέλων, ισοδύναμων ρευστών και πραγματικού, στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων. Αυτή η διαφοροποίηση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν στη συμπεριφορά του πραγματικού μοντέλου μεταξύ διάτρησης και μικροδιάτρησης, οφείλεται στην κανονικοποίηση της γεωμετρίας που εφαρμόζεται αυτόματα από το λογισμικό στη μέθοδο ισοδύναμων ρευστών. Πιο συγκεκριμένα, όπως έχει εξηγηθεί παραπάνω, το γεγονός ότι δεν εισάγεται στο λογισμικό ο αριθμός των οπών που φέρει η επιφάνεια αλλά μόνο η ακτίνα και η απόστασή τους, αυτομάτως μειώνει την δυνατότητα του χρήστη να ελέγξει την αντιστοιχία του προβλήματος που εισάγεται στο λογισμικό με το πραγματικό. Επιπλέον, στην περίπτωση της διάτρησης, με βάση τα γεωμετρικά δεδομένα και με την πραγματική αποτύπωσή τους προκλήθηκε μία απόκλιση στο ποσοστό του κενού χώρου της τάξης του 13% από την τιμή που είχε κατά τη μοντελοποίησή του ως ισοδύναμο ρευστό, γεγονός που δικαιολογεί τις διαφορές που παρατηρούνται στα αποτελέσματα.

Ένας επιπλέον λόγος που η απόκλιση στη συμπεριφορά των δύο μοντέλων δεν είναι φανερό στη μελέτη μικροδιάτρησης είναι πως, η ύπαρξη μικρότερων διαστάσεων οπών εξασφαλίζει ανεξάρτητα των υπολοίπων παραμέτρων, πιο ομαλή κατανομή αυτών στην επιφάνεια. Ειδικότερα, το ρευστό που προσπίπτει σε αυτήν διαμερίζεται ομαλά καθώς τη διαπερνά με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η απορρόφηση ενέργειας και άρα η μείωση του ήχου. Αντίθετα, στην περίπτωση διάτρησης, η ακτίνα των οπών έχει τέτοια τιμή που επιβάλλει συγκεκριμένη κατανομή τους στην επιφάνεια. Στην περίπτωση ανάλυσης με χρήση πραγματικού μοντέλου, η γεωμετρία της διάτρητης επιφάνειας είναι τέτοια που δεν επιτρέπει την ομαλή διαμέριση του προσπίπτοντος ρευστού, αντιθέτως το ρευστό αποκλίνει ελάχιστα από την αρχική του πορεία. Αυτό σημαίνει πως αυτή η διάτρητη επιφάνεια τείνει να προσεγγίσει μία επιφάνεια διαφανή ως προς τον ήχο.

Ός προς την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, θεωρείται πως η χρήση του πραγματικού μοντέλου επιφέρει πιο ελέγχιμα αποτελέσματα σε σχέση με τη μέθοδο ισοδύναμων ρευστών. Εξετάζοντας την περίπτωση μικροδιάτρησης, είναι φανερό πως ρεαλιστικότερα αποτελέσματα προκύπτουν με χρήση πραγματικής γεωμετρίας και η σύγκλιση που παρατηρείται μεταξύ των δύο μοντέλων οφείλεται στα πλεονεκτήματα της μικροδιάτρησης για την ομαλή κανονικοποίηση του συστήματος. Στην περίπτωση διάτρησης, το υπολογιστικό μοντέλο ισοδύναμων ρευστών δεν προσομοιώνει με την ίδια ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες του προβλήματος. Ενώ, η πραγματική γεωμετρία παρουσιάζεται περισσότερο αξιόπιστη από τη στιγμή που προσεγγίζει αποτελεσματικότερα τα ημιεμπειρικά μοντέλα.



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΕΠΙΛΟΓΟΣ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**



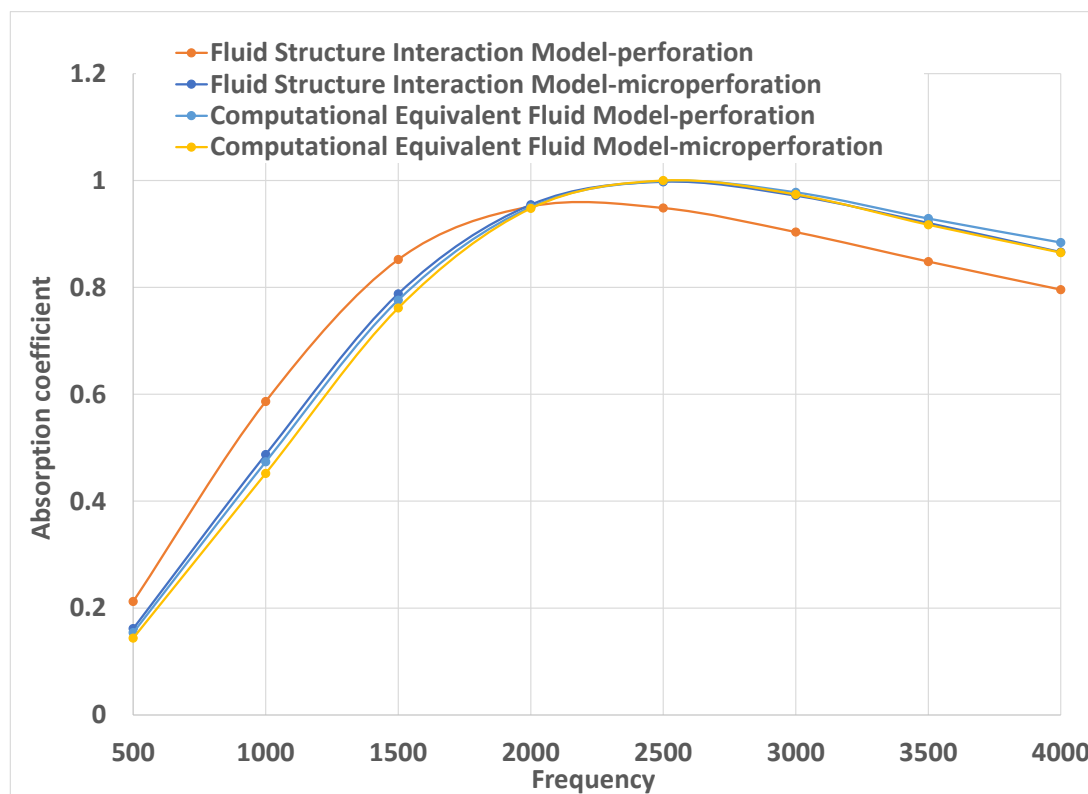
## 6.1 Επίλογος

Στα πλαίσια της τρέχουσας Διπλωματικής Εργασίας έχουν προκύψει χρήσιμα συμπεράσματα ως προς την αναπαράσταση και την προσομοίωση του φυσικού προβλήματος προς μελέτη. Όλη η ανάλυση που έχει προηγηθεί, περιστρέφεται γύρω από την ακουστική συμπεριφορά τριδιάστατων δομών και την ηχοαπορροφητική τους απόκριση και έχει ως στόχο την εφαρμογή της στην περίπτωση τριδιάστατων υφασμάτων. Τελικός στόχος της διερεύνησης ήταν ο προσδιορισμός του καταλληλότερου και ταχύτερου τρόπου αναπαράστασης της γεωμετρίας των υφασμάτων για απόκτηση αποτελεσμάτων ακριβείας στο βέλτιστο δυνατό υπολογιστικό χρόνο όσον αφορά στην ηχοαπορροφητική τους συμπεριφορά. Ζητούμενο αποτέλεσε, η προσέγγιση της συμπεριφοράς που προκύπτει με χρήση ημιεμπειρικών μοντέλων από υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης.

Στα πλαίσια αυτής της διερεύνησης, αναπτύχθηκαν δύο υπολογιστικά μοντέλα. Το πρώτο μοντέλο προσομοιώνει την προς εξέταση δομή με χρήση ομογενοποιημένης γεωμετρίας και ισοδύναμων μοντέλων ρευστών ενώ το δεύτερο, με πιστή αναπαράσταση τμήματος αυτής και πραγματική αλληλεπίδραση ρευστού – στερεού σώματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παρατέθηκαν προηγουμένως, καταδεικνύουν πως υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των προτεινόμενων αντιμετώπισεων και των ημιεμπειρικών μοντέλων. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και των δύο μοντέλων και για τον λόγο αυτό αυτά καθίστανται κατάλληλα σε διαφορετικές συνθήκες.

Πιο συγκεκριμένα, η χρήση του μοντέλου ισοδύναμων ρευστών καθιστά την προσομοίωση ταχύτερη. Αυτό συμβαίνει γιατί η αναπαράσταση της γεωμετρίας είναι ευκολότερη και άρα αποτελεσματικότερη και ταυτόχρονα ο χρόνος προσομοίωσης είναι ελάχιστος. Όμως, υπάρχει ένα βασικό μειονέκτημα το οποίο σχετίζεται με τη χρήση ομοιογενοποιημένης γεωμετρίας. Το λογισμικό εκμεταλλεύεται τα δεδομένα που εισάγονται σε αυτό κανονικοποιώντας την κατανομή των θέσεων των διατρήσεων με τρόπο που δεν είναι ελέγξιμος από τον χρήστη. Απ' την άλλη πλευρά, η πιστή αναπαράσταση της γεωμετρίας παρουσιάζει αυξημένες σχεδιαστικές απαιτήσεις καθώς το εκάστοτε μοντέλο προς εξέταση χρειάζεται εκ νέου σχεδιασμό και πλεγματοποίηση. Επιπλέον, ο υπολογιστικός χρόνος είναι τεράστιος με αποτέλεσμα η χρήση της μεθόδου αυτής να στερείται πρακτικότητας. Παρ' όλα αυτά, η προσομοίωση των πραγματικών δομών και συνθηκών εμπεριέχει σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων υπολογιστικών μοντέλων καθώς προσομοιώνεται το ίδιο το φυσικό πρόβλημα χωρίς χρήση κάποιας παραδοχής.

Παρακάτω, στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν, για περιπτώσεις διάτρησης και μικροδιάτρησης με χρήση και των δύο υπολογιστικών διαδικασιών.



Σχήμα 6.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογιστικών μοντέλων για διάτρηση και μικροδιάτρηση

Κατ' αρχήν από τη στιγμή που παρατηρείται στα αποτελέσματα απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών των υπολογιστικών μοντέλων, είναι προφανές πως το πραγματικό μοντέλο προτιμάται καθώς επιδεικνύει υψηλότερη ακρίβεια. Στη συνέχεια, είναι φανερή η υπεροχή του στην περίπτωση διάτρησης, όταν πρόκειται για μοντέλο μεγάλων διαστάσεων καθώς με χρήση αυτού εξασφαλίζεται η πραγματική κατανομή των οπών. Στην περίπτωση της μικροδιάτρησης οι καμπύλες των δύο υπολογιστικών μοντέλων σχεδόν ταυτίζονται, και έτσι θα προτιμηθεί η χρήση του υπολογιστικά οικονομικότερου μοντέλου δηλαδή του μοντέλου ισοδύναμων ρευστών.

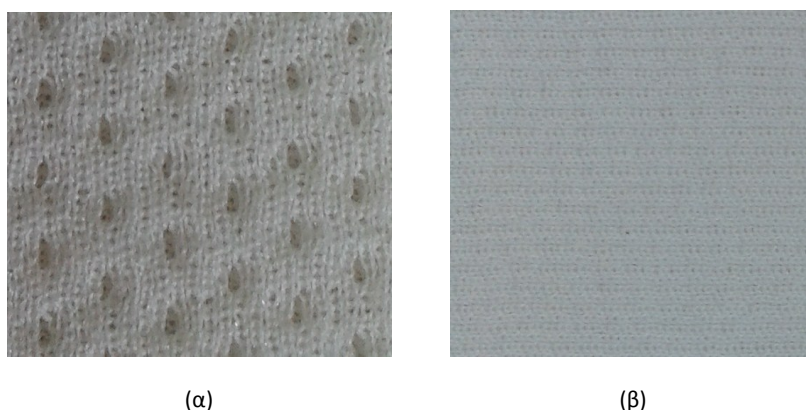
Σαν τελικό συμπέρασμα της παρούσας μελέτης προκύπτει, πως η ακουστική ανάλυση δομών με χρήση του λογισμικού πακέτου ANSYS μπορεί να πραγματοποιηθεί ικανοποιητικά με δύο τρόπους, ενώ η τελική επιλογή ως προς τον τρόπο εξαρτάται από τη γεωμετρία και τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους.

## 6.2 Προκαταρκτική σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

Η επιβεβαίωση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την διερεύνηση της συμπεριφοράς των τριδιάστατων δομών που υπόκεινται σε ακουστική ανάλυση, μπορεί να ελεγχθεί και με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με πειραματικά αποτελέσματα. Καθώς μία τέτοια διαδικασία απαιτεί εξοπλισμό ο οποίος δεν είναι διαθέσιμος, έγινε προσπάθεια εύρεσης πειραματικών δεδομένων ακουστικής ανάλυσης τριδιάστατων υφασμάτων.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομών στις οποίες έγινε πειραματική μέτρηση του συντελεστή απορρόφησης, διαφέρουν από αυτά που υπολογίστηκαν για τις βέλτιστες δομές στα προηγούμενα κεφάλαια. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από την διαδικασία διερεύνησης που ακολουθήθηκε, ως υπολογιστικά μοντέλα μοντέλα θα χρησιμοποιηθούν αυτά με τη χρήση ισοδύναμων μοντέλων ρευστών. Πρόκειται για ανάλυση χαμηλού υπολογιστικού κόστους και για το λόγο αυτό προτιμάται στα πλαίσια μίας προκαταρκτικής διερεύνησης.

Κατά την εκτέλεση του πειράματος, εξετάστηκαν δύο δομές τριδιάστατων υφασμάτων με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Το ανώτερο στρώμα στην πρώτη περίπτωση είναι προσομοιάζει έναν διάτρητο απορροφητή (Sample 1), ενώ στη δεύτερη έναν μικροδιάτρητο απορροφητή (Sample 2). Το ενδιάμεσο στρώμα, και στις δυο περιπτώσεις είναι ένας πορώδης απορροφητής. Αναλυτικότερα, η επάνω επιφάνεια των τριδιάστατων υφασμάτων πλέκεται με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζεται ένα τετραγωνικό πλέγμα πόρων με διαφορετικές διαστάσεις για τον κάθε απορροφητή. Παρατίθεται στο σημείο αυτό εικόνα των προς εξέταση δειγμάτων τριδιάστατων υφασμάτων (Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2 Δείγματα τριδιάστατων υφασμάτων, (α) διάτρητη επιφάνεια, (β) μικροδιάτρητη επιφάνεια

Τα τριδιάστατα υφάσματα παρήχθησαν σε μία μηχανή κυκλικής πλέξης, χρησιμοποιώντας πολύινα νήματα από πολυεστέρα 150 denier για τις δύο εξωτερικές επιφάνειες του απορροφητή, και μονόινα νήματα από πολυεστέρα 100 denier για τον πορώδη απορροφητή. Οι τιμές της διαπερατότητας του αέρα και του πάχους των υφασμάτων μετρήθηκαν με χρήση ειδικών μηχανών. Στον Πίνακα 6.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται, τα δομικά χαρακτηριστικά και οι φυσικές ιδιότητες του κάθε δείγματος.

Πίνακας 6.1 Δομικά χαρακτηριστικά και φυσικές ιδιότητες των δειγμάτων των τριδιάστατων υφασμάτων

	Thickness of the structure (mm)	Perforated / Micro-perforated Thickness (mm)	Radius (mm)	Grid period (mm)	Air Permeability (l/s·m <sup>2</sup> )	Density (kg·m <sup>-3</sup> )
Sample 1 (Perforated)	3.5	0.25	0.5	5	2010	111.14

Sample 2 (Micro – Perforated)	3.5	0.25	0.05	1	2343	112.571
-------------------------------------	-----	------	------	---	------	---------

Στον παραπάνω πίνακα, είναι φανερά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομών τα οποία θα εισαχθούν στο λογισμικό για την υπολογιστική ανάλυση. Η μόνη παράμετρος που απαιτείται και δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί είναι η αντίσταση ροής του πορώδη απορροφητή. Για την εκτίμηση της τιμής της, αξιοποιήθηκε η παράμετρος της αεροδιαπερατότητας η οποία ορίζεται ως, ο όγκος του αέρα σε mm που περνάει σε ένα δευτερόλεπτο από 100 mm<sup>2</sup> υφάσματος για διαφορά πίεσης 100 mm H<sub>2</sub>O. Η αντίσταση ροής ορίζεται ως εξής:

$$R_f = \frac{\Delta P}{q_v} \cdot A \tag{106}$$

όπου  $\Delta P$  η διαφορά πίεσης (Pa),  $A$  η διατομή του δείγματος (m<sup>2</sup>) και  $q_v$  ο ογκομετρικός ρυθμός ροής που διαπερνά το δείγμα (m<sup>3</sup>/s). Στον Πίνακα 6.2 παρατίθεται η εκτιμώμενη τιμή της παραμέτρου για το κάθε δείγμα συνδυάζοντας τη Σχέση (106) με τις τιμές αεροδιαπερατότητας (Πίνακας 6.1).

**Πίνακας 6.2 Αντίσταση ροής για κάθε δείγμα τριδιάστατου υφάσματος**

	Flow resistivity (Pa·s/m <sup>2</sup> )
Sample 1	13861
Sample 2	11889

Όσον αφορά στις συνθήκες της πειραματικής μεθόδου, ο συντελεστής απορρόφησης για κάθε δείγμα μετρήθηκε με χρήση ενός ανηχοϊκού σωλήνα Bruel & Kjaer Impedance Tube Type 7758 (Σχήμα 6.3).

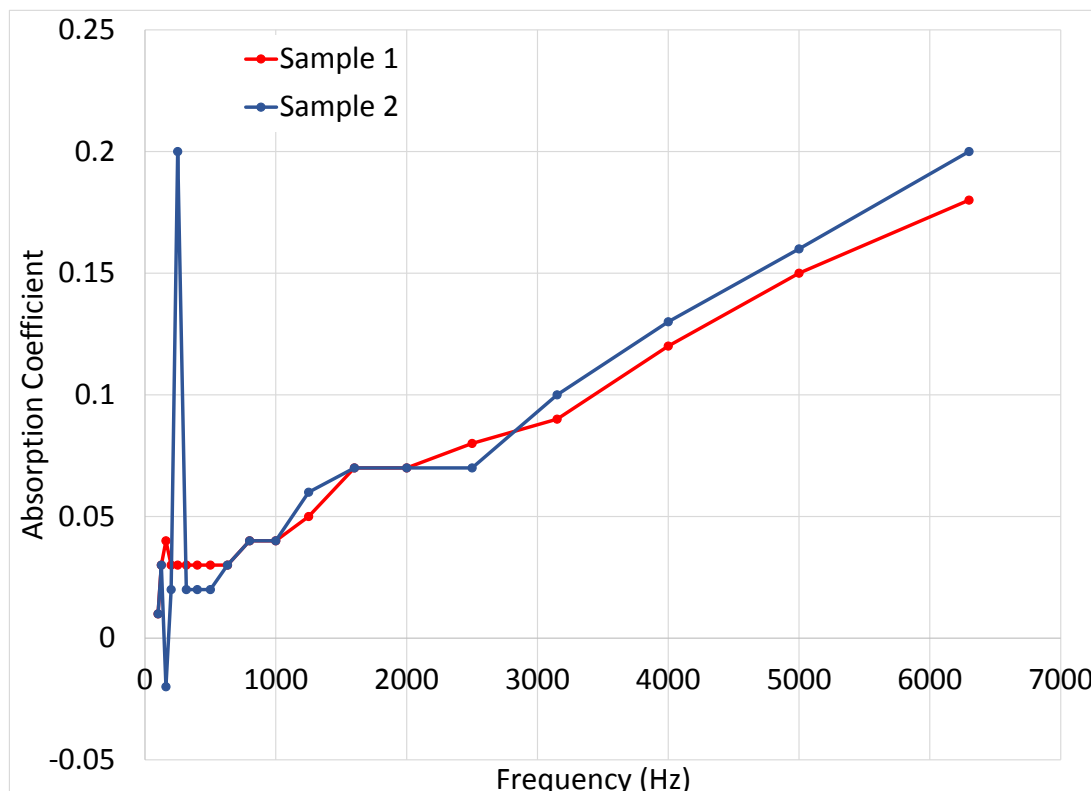


**Σχήμα 6.3 Σύστημα ανηχοϊκού σωλήνα**

Η βασική αρχή του πειράματος, σχετίζεται με τις διαφορές της ακουστικής πίεσης ανάμεσα σε προσπίπτοντα και ανακλώμενα από τη δομή ηχητικά κύματα. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε απόσταση 0.3 m από την ηχητική πηγή και οι μετρήσεις του συντελεστή απορρόφησης έγιναν για ένα κάθετο ηχητικό κύμα σε περιοχή συχνοτήτων 100 – 6300 Hz. Τα πειραματικά



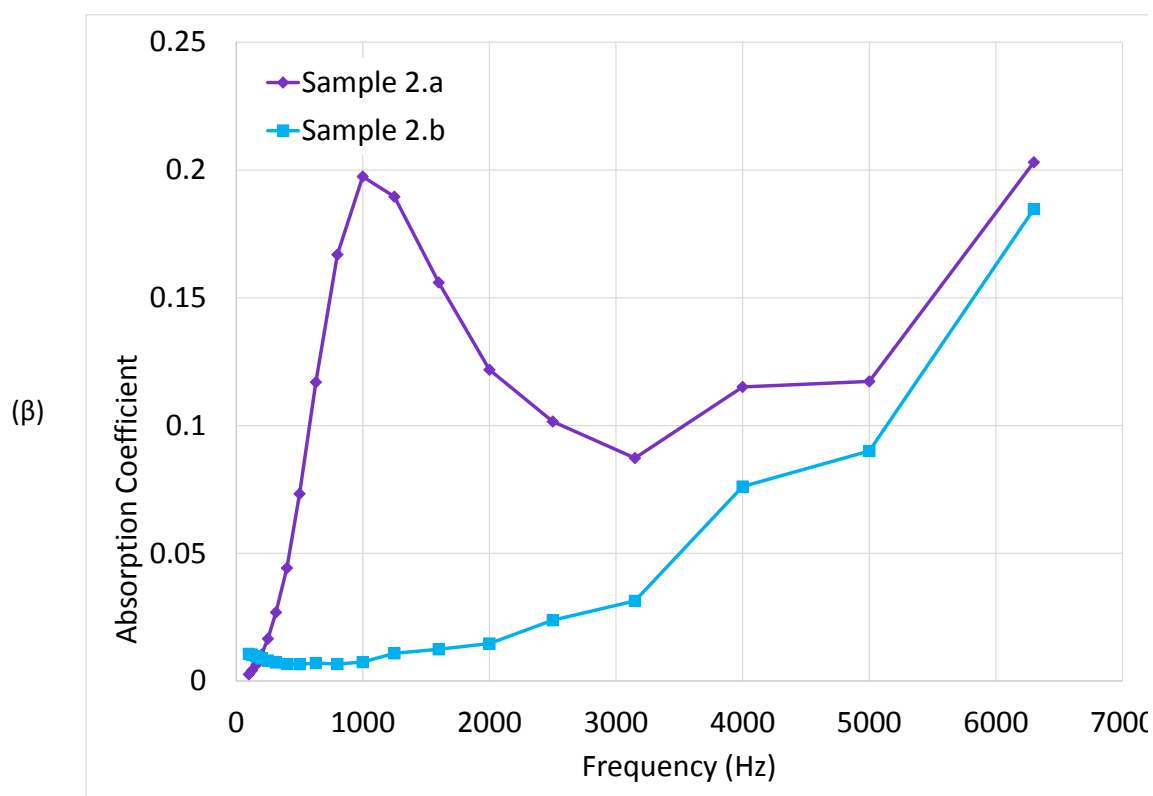
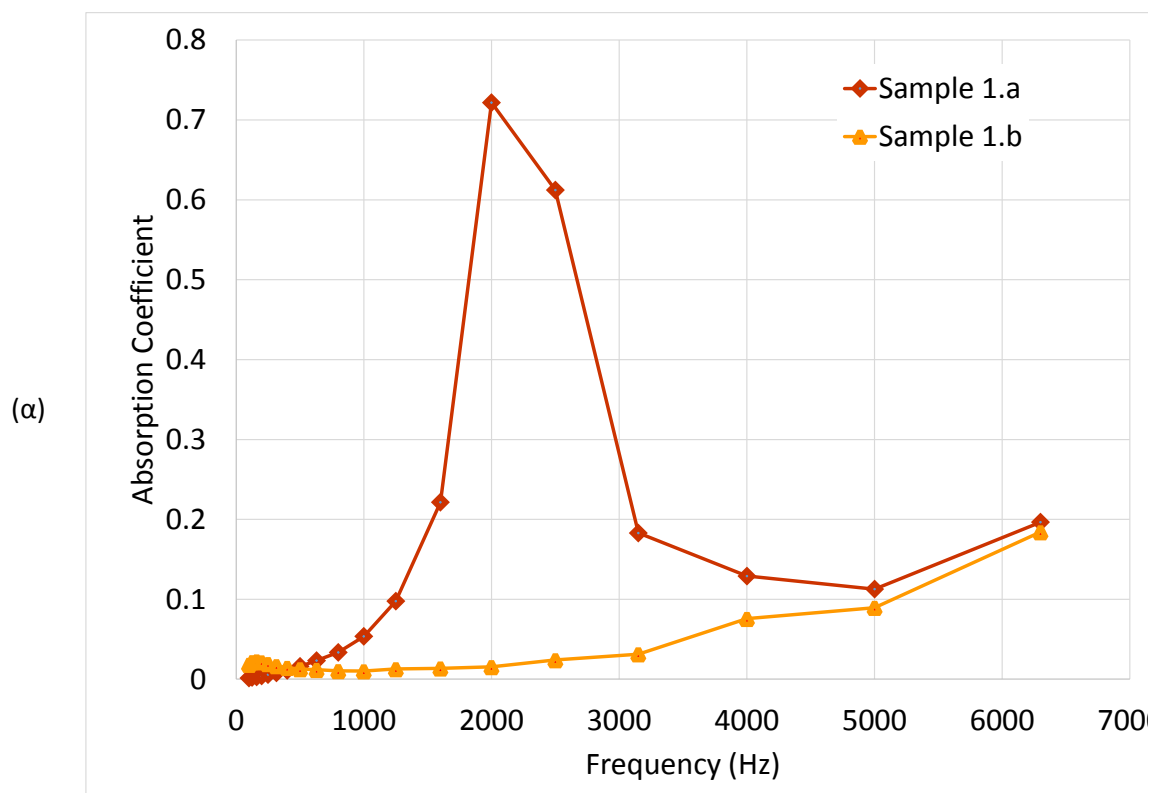
αποτελέσματα που προκύπτουν λοιπόν, για τα δύο δείγματα υφασμάτων φαίνονται στο Σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4 Πειραματικά αποτελέσματα συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας για τα δύο δείγματα τριδιάστατων υφασμάτων

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα αυτά και αξιοποιώντας παράλληλα τα συμπεράσματα της ακουστικής ανάλυσης που έχει προηγηθεί, είναι φανερό πως και τα δύο δείγματα παρουσιάζουν κάποιες μέγιστες τιμές συντελεστή απορρόφησης στις χαμηλές συχνότητες, οι οποίες αποδίδονται σε σφάλματα των πειραματικών μετρήσεων. Η συμπεριφορά των δειγμάτων, σε γενικές γραμμές παρουσιάζεται όμοια και πιο συγκεκριμένα εστιάζοντας στις περιοχές μέσων και υψηλών συχνοτήτων το δείγμα που αντιπροσωπεύει την μικροδιάτρηση καταδεικνύει υψηλότερες απορροφητικές δυνατότητες, γεγονός που επαληθεύεται από την βιβλιογραφία [1].

Στα πλαίσια της υπολογιστικής ανάλυσης, όπως αναφέρθηκε, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των ισοδύναμων μοντέλων ρευστών. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το κάθε δείγμα παρατίθενται παρακάτω (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5 Υπολογιστικά αποτελέσματα συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας για το δείγμα (α) διάτρησης (Sample 1) και (β) μικροδιάτρησης (Sample 2)

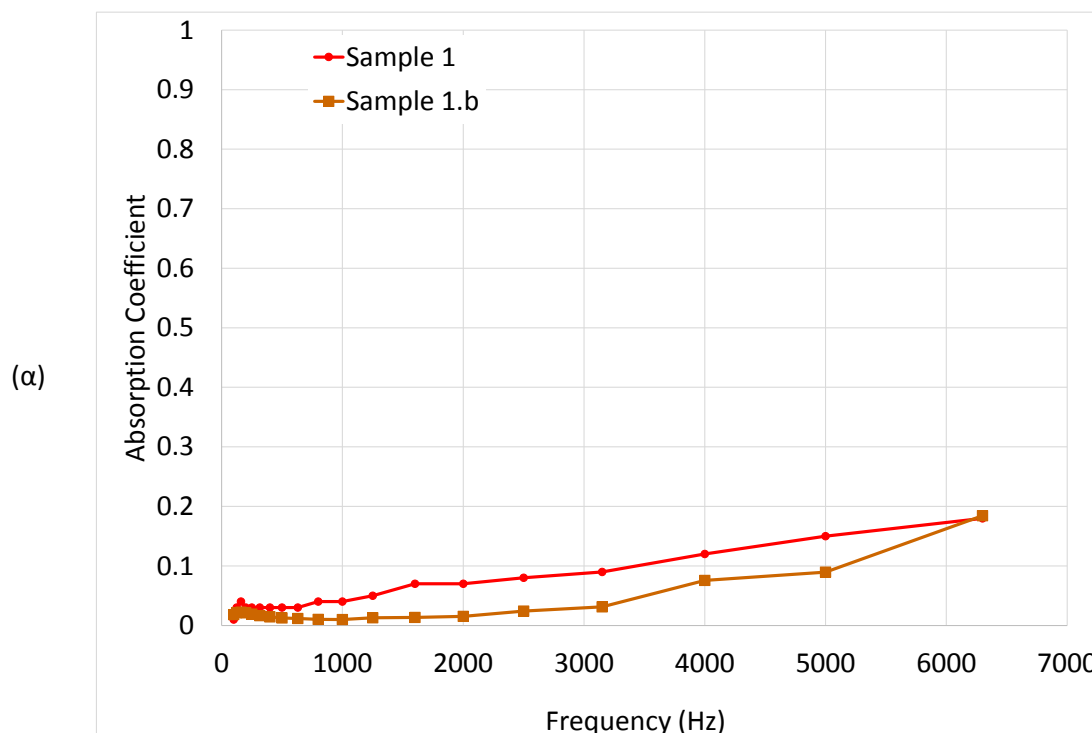
Είναι φανερό πως στην απεικόνιση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων των δύο δειγμάτων τριδιάστατου υφάσματος, διαφαίνονται δύο επιμέρους δείγματα των δομών. Πιο

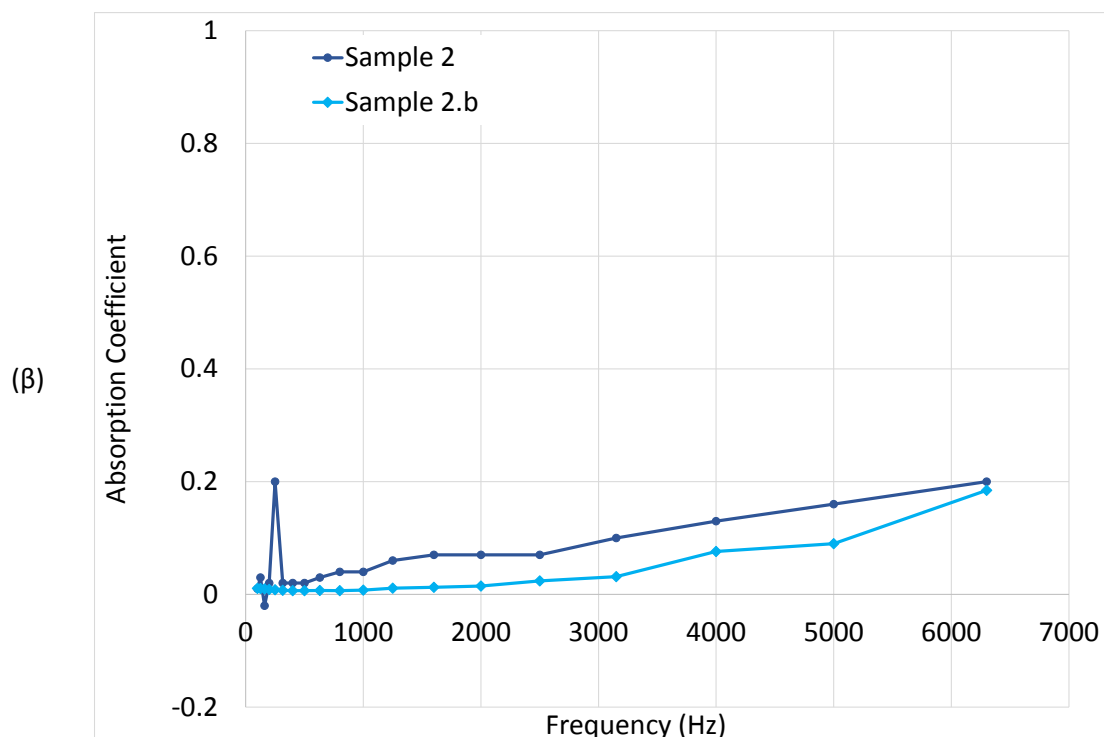
συγκεκριμένα, τα δείγματα 1.a και 2.a αντιστοιχούν στις πραγματικές γεωμετρίες των δομών, σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουν παρατεθεί σε παραπάνω πίνακα (Πίνακας 6.1). Παρ'όλα αυτά, τα δείγματα αυτά παρουσιάζουν μέγιστες τιμές απορρόφησης οι οποίες δεν είναι εμφανείς στα πειραματικά αποτελέσματά τους. Η συμπεριφορά αυτή οδηγεί στην υπόθεση πως η μικροδιάτρηση που παρατηρείται και στα δύο δείγματα και οφείλεται στη διαδικασία της πλέξης, επηρεάζει την ακουστική τους απόκριση. Για το λόγο αυτό, γίνεται προσπάθεια προσέγγισης των πειραματικών καμπυλών μεταβάλλοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και των δύο δειγμάτων, έτσι ώστε να προσεγγίσουν τη μικροδιάτρηση που παρατηρείται. Τα δύο νέα δείγματα 1.b και 2.b με τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στη συνέχεια στον Πίνακα 6.3.

**Πίνακας 6.3 Δομικά χαρακτηριστικά νέων δειγμάτων τριδιάστατων υφασμάτων**

	Radius(mm)	Grid period (mm)
Sample 1.b	0.05	5
Sample 2.b	0.005	0.25

Τέλος, απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ των δύο νέων δειγμάτων και των αντίστοιχων πειραματικών αποτελεσμάτων τους στο Σχήμα 6.6.





Σχήμα 6.6 Σύγκριση υπολογιστικών – πειραματικών αποτελεσμάτων ηχοαπορρόφησης για τα δύο νέα δείγματα τριδιάστατων υφασμάτων

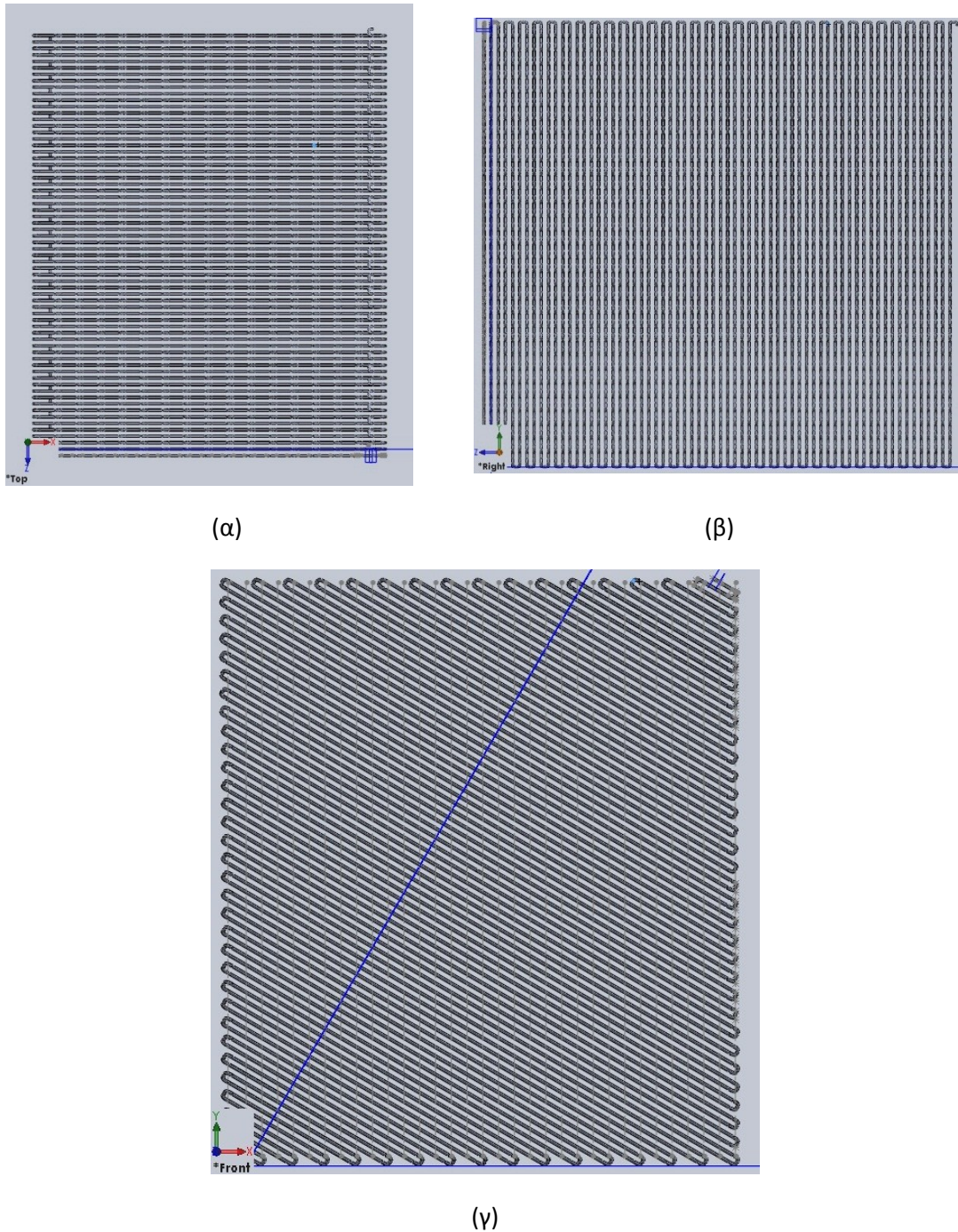
Είναι φανερή η σύγκλιση της συμπεριφοράς τους κατά γενικό κανόνα, ενώ οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται οφείλονται τόσο στον υπολογισμό της αντίστασης ροής του απορροφητή και όχι στη μέτρησή του σύμφωνα με διεθνή πρότυπα, όσο και στην απουσία περισσότερων πειραματικών μετρήσεων οι οποίες θα προσέδιδαν τη στατιστική ακρίβεια των πειραματικών αποτελεσμάτων.

### 6.3 Μελλοντική έρευνα

Η ακουστική ανάλυση τριδιάστατων υφασμάτων που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αποτελεί ένα πρώτο στάδιο μοντελοποίησης της γεωμετρίας των δομών αυτών, καθώς και μία πρωταρχική διερεύνηση της συμπεριφοράς ενός ακουστικού προβλήματος. Προετοιμάζει το έδαφος για περαιτέρω έρευνα στον τομέα της μηχανικής και ακουστικής συμπεριφοράς των τριδιάστατων υφασμάτων, ο οποίος παρουσιάζεται πολλά υποσχόμενος για το μέλλον της ακουστικής.

Πιο συγκεκριμένα, ένα ιδιαίτερα απαιτητικό πεδίο του προβλήματος που μελετήθηκε ήταν η προσομοίωση της πραγματικής γεωμετρίας του υφάσματος. Στη διάρκεια της εργασίας αυτής, έγινε πιστή αναπαράσταση μόνο της διάτρητης επιφάνειας του απορροφητή ενώ οι υπόλοιπες γεωμετρικές μοντελοποιήθηκαν με χρήση ομογενοποιημένων μοντέλων. Θα είχε, ωστόσο, ενδιαφέρον η προσομοίωση της πραγματικής γεωμετρίας ολόκληρου του απορροφητή καθώς με αυτόν τον τρόπο θα αξιολογούνταν το μοντέλο ισοδύναμων ρευστών με πλήρη ακρίβεια, ενώ ταυτόχρονα αναμένεται να λαμβάνονταν αποτελέσματα ακριβείας που θα προσέγγιζαν πιστά τα αποτελέσματα μίας πειραματικής διαδικασίας.

Παρόλα αυτά, η αναπαράσταση του πορώδη απορροφητή αποτελεί μία απαιτητική διαδικασία προκειμένου αυτός να σχεδιαστεί με ακρίβεια και ταυτόχρονα να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της βασικής παραμέτρου που τον χαρακτηρίζει, της αντίστασης ροής. Η διερεύνηση του συσχετισμού της φυσικής αυτής παραμέτρου με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του απορροφητή απαιτεί πλήρη ενασχόληση με το πεδίο αυτό και αυξημένους υπολογιστικούς πόρους. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, σχεδιάσθηκε ένα πρωταρχικό μοντέλο του πορώδη απορροφητή που χρησιμοποιήθηκε, εικόνες του οποίου παρατίθενται παρακάτω στο Σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.7 Όψεις πορώδη απορροφητή (α) κάτοψη, (β) πλάγια όψη και (γ) πρόοψη πορώδη απορροφητή

Ο παραπάνω σχεδιασμός της δομής είναι ενδεικτικός ικανοποιώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πορώδη απορροφητή Miki – προσανατολισμός ινών  $30^\circ$  – και χρήζει βελτίωσης προκειμένου να εισαχθεί στο λογισμικό για προσομοίωση.

Τέλος, μία μελλοντική πρόταση ενασχόλησης με το παρόν αντικείμενο θα ήταν η διενέργεια πειραμάτων πάνω στις δομές που έχουν καθορισθεί από την διπλωματική εργασία ως αποδοτικότερες στην ηχοαπορρόφηση. Στόχος μίας τέτοιας διαδικασίας θα ήταν η επαλήθευση των συμπερασμάτων που εξήχθησαν επί της ακουστικής υπολογιστικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε και ταυτόχρονα βελτιστοποίηση αυτής. Στην περίπτωση καλής συμφωνίας μεταξύ των αποτελεσμάτων, θα ήταν δυνατή η υποκατάσταση μίας πειραματικής διαδικασίας από την υπολογιστική μέσω αντίστροφου σχεδιασμού, σε περιπτώσεις όπου απαιτείται γρήγορη και ακριβής προσέγγιση της ακουστικής συμπεριφοράς μίας κατασκευής.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] «<http://apmr.matelys.com/PropagationModels/MotionlessSkeleton/index.html>,» [Ηλεκτρονικό].
- [2] «<http://mostreal.sk>,» ANSYS. [Ηλεκτρονικό].
- [3] T. J. C. a. P. d. Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers, USA and Canada*: Taylor & Francis Group, 2009.
- [4] E. C. G. & Associates, «[www.egregor.com/wp-content/uploads/2013/08/MAJOR\\_TEXTILE\\_SEGMENTS\\_by\\_Edward\\_C\\_Gregor.pdf](http://www.egregor.com/wp-content/uploads/2013/08/MAJOR_TEXTILE_SEGMENTS_by_Edward_C_Gregor.pdf),» 2013. [Ηλεκτρονικό].
- [5] C. Q. H. a. B. S. Cazzolato, «*Acoustic Analyses Using Matlab and Ansys*,» Taylor and Francis Book, New York, 2015.
- [6] U. I. K. Uno Ingard, «*Noise Reduction Analysis*,» σε *Noise Reduction Analysis*, Jones & Barlett Learning, 2010, 2010.
- [7] D.-Y. Maa, «*Potential of microperforated panel absorber*,» Acoustical Society of America, 16 July 1998.
- [8] S. D. D. a. S. V. Modak, «*Review of Vibro-Acoustics analysis procedures for prediction of low*,» Indian Institute Of Technology, Delhi, New Delhi, 110016, India.
- [9] A. Primentas, «*Acoustic Properties of Fabrics*,» 2014.
- [10] S. Vassiliadis, *Electronics and Computing in Textiles*.
- [11] T. E. Vigran, «*Building Acoustics*,» σε *Building Acoustics*, CRC Press, 2008, 2008.
- [12] Y.J. Qian, «*Investigation on micro-perforated panel absorber with ultra-micro*,» Elsevier LTD, 2013.
- [13] Χ. Καβαγιά, «*Μηχανική ανάλυση τρισδιάστατου υφάσματος με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων*,» 2007.
- [14] Γ. Μπαμπάνης, «*Προσομοίωση Ακουστικής και Μηχανικής συμπεριφοράς της γλωττίδας Ακκορντεόν*».
- [15] Δ. Σκαρλάτος, *ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ*, Πάτρα: GOTSIS ΕΚΔΟΣΕΙΣ, Οκτώβριος 2008.