

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Τεχνολογίες Ήχου, Βίντεο και Μετάδοσης



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering
www.eee.uniwa.gr

250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel: +30 210 538-1225, Fax: +30 210 538-1226

Master of Science in
Audio, Video and Broadcasting
Engineering

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πειραματική μελέτη της ήχο - απορροφητικής ικανότητας πορωδών υλικών.



Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια: Αδαμαντίνη Γιαννουλάκη, MSCAVB-02

Επιβλέπων: Στυλιανός Ποτηράκης, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών

www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering

www.eee.uniwa.gr

250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Τεχνολογίες Ήχου, Βίντεο και Μετάδοσης

Master of Science in
Audio, Video and Broadcasting
Engineering

MSc Thesis

Experimental study of the sound-absorbing ability of porous materials.



Student: Adamantini Giannoulaki, MSCAVB-02

MSc Thesis Supervisor: Stylianos Potirakis, Professor

ATHENS-EGALEO, JULY 2022

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων

Μέλος

Μέλος

Στυλιανός Ποτηράκης

Νικόλαος-Αλέξανδρος
Τάτλας

Σωτηρία Γαλατά

Καθηγητής

Αναπληρωτής
Καθηγητής

Επίκουρη Καθηγήτρια

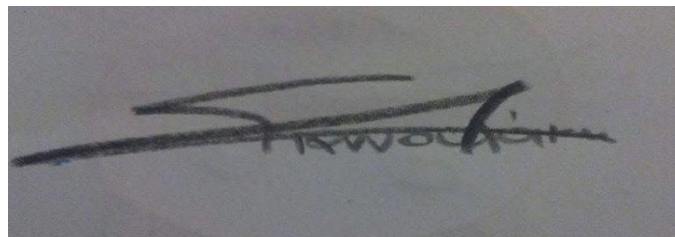
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Γιαννουλάκη Αδαμαντίνη του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου MSCAVB-002 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Τεχνολογίες Ήχου, Βίντεο και Μετάδοσης» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

A photograph of a handwritten signature in black ink on a light-colored background. The signature is stylized and appears to read 'ΓΙΑΝΝΟΥΛΑΚΗ'.

Γιαννουλάκη Αδαμαντίνη

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Αδαμαντίνη Γιαννουλάκη,

Ιούλιος, 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον/την συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος μέλους ΔΕΠ, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για τον έλεγχο των επιπέδων θορύβου σε πολλούς τομείς, όπως της αρχιτεκτονικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας, του ηχητικού εξοπλισμού καθώς και η διαμόρφωση της ακουστικής ενός συγκεκριμένου χώρου, όπως ένα θέατρο, μια αίθουσα μουσικής, ένα στούντιο, επιτυγχάνεται κυρίως με την χρήση ηχοαπορροφητικών υλικών. Οι πορώδης απορροφητές ίνας χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της εξαιρετικής ηχοαπορροφητικής τους απόδοσης και του χαμηλού κόστους.

Μέσω της μελέτης μας θα εξετάσουμε τις ιδιότητες ηχοαπορρόφησης υλικών με ανοιχτές πορώδεις δομές χρησιμοποιώντας ακουστικούς σωλήνες εμπέδησης «Kundt tubes» και τη μέθοδο συνάρτησης μεταφοράς (transfer function). Οι σωλήνες εμπέδησης χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μέτρηση των συντελεστών ηχοαπορρόφησης ακουστικών υλικών συναρτήσει της συχνότητας.

Η μελέτη διερευνά επίσης την απόδοση των πορωδών υλικών με διαφορετική πυκνότητα και ίδιο πάχος, με διάκενο αέρα μεταξύ του υλικού δείγματος και του στερεού τερματικού τοιχώματος του σωλήνα και τέλος διερευνά την ηχοαπορροφητική τους ικανότητα όταν τα δείγματα έχουν την ίδια πυκνότητα αλλά διαφορετικό πάχος. Η επαναληψιμότητα των μετρήσεων μας μέσω των σωλήνων εμπέδησης προσφέρει αξιοπιστία στα αποτελέσματα. Ωστόσο, υπάρχει πιθανότητα η μέτρηση των συντελεστών ηχοαπορρόφησης που λαμβάνονται με τη χρήση της μεθόδου σωλήνων εμπέδησης να έχουν κάποιες αποκλίσεις σε σύγκριση με του κατασκευαστή εξαιτίας της προετοιμασίας του δείγματος και της τοποθέτησης του ή λόγω διαφορετικής μεθόδου μέτρησης.

Η απόδοση των υλικών σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους και τα αποτελέσματα που αποκτήσαμε μας δίνουν σημαντικά στοιχεία τα οποία μπορούμε να εκμεταλλευτούμε στην εφαρμογή τους ώστε να πετύχουμε την μέγιστη απόδοση τους.

Για τους λόγους αυτούς πραγματοποιούνται πολλές μελέτες για τη μελέτη ανοικτών πορωδών υλικών που η εφαρμογή τους μπορεί να μειώσει τα επίπεδα θορύβου.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ: διάκενο αέρος, πάχος υλικών, πορώδη - ινώδη υλικά, πυκνότητα υλικών, συντελεστής απορρόφησης, σωλήνας Kundt.

ABSTRACT

The most effective way to control noise levels in many areas, such as architecture, automotive and sound equipment, or achieve a treatment in a specific room, such as a theater, a music room, a studio, is by using sound-absorbing materials. Fibrous porous absorbers are widely used because of the excellent sound absorption performance and low cost.

This study is examining the sound absorption properties of materials with open-porous structures by using acoustic impedance tubes “Kundt tubes” and utilizing the transfer function method. The impedance tubes method is widely used for measuring sound absorption coefficients of acoustic materials as a function of frequency.

In addition, the study investigates the performance of the porous materials with different densities and same thickness, with air gap between the sample material and solid back wall of the tube, and last but not least, investigates the performance of the sound absorption when the samples have the same density but different thicknesses. The repeatability of the measurements through the impedance tubes offers reliability of the results. However, there is a possibility the measurement of the sound absorption coefficients obtained by using the impedance tubes to present some variations compared to fabricator provided due to the sample preparation and sample mounting or to different method of measurement.

The performance of the tested materials according to its characteristics and the obtained results provide us important information which can be used to achieve the utmost of their performance.

For this reason, numerous studies focus on open porous materials the application of which can reduce the noise levels.

KEYWORDS: air gap, density of materials, Kundt's tube, open porous - fibrous materials, sound absorption coefficient, thickness of materials.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ μέσα από τη καρδιά μου τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Στυλιανό Ποτηράκη, για την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, τη συμπαράστασή του, τη συνεχή του υποστήριξη και το αμείωτο ενδιαφέρον που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον σύζυγο μου Αλεξανδρή Κωνσταντίνο και τα μικρά μου Γιώργο και Ιωάννη - Μάξιμο για όλη τη στήριξη, βοήθεια, συμπαράσταση και κατανόησή τους που μου έδειξαν, καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ:	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Βασικές έννοιες ακουστικής - Ηχητικά κύματα	18
1.1 Κύμα	18
1.2 Τύποι κυμάτων	19
1.2.1 Διαμήκη κύματα	19
1.2.2 Εγκάρσια κύματα	20
1.2.3 Στάσιμα κύματα	20
1.3 Ακουστικά μεγέθη και επιφάνεια πρόσπτωσης	23
1.4 Συντελεστής ηχοαπορρόφησης α	27
1.4.1 Θάλαμος αντήχησης (<i>Reverberation chamber</i>)	29
1.4.2 Σωλήνας εμπέδησης (<i>Impedance tube</i>)	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ηχοαπορροφητικά υλικά και ιδιότητες	30
2.1 Ηχοαπορροφητικά υλικά και διατάξεις	30
2.1.1 Συνηχητές μεμβράνης	30
2.1.2 Συνηχητές κοιλότητας <i>Helmholtz</i>	32
2.1.3 Πορώδη ηχοαπορροφητικά	33
2.1.3.1 Αντίσταση ροής σ (<i>flow resistivity</i>)	35
2.1.3.2 Πορώδες ενός υλικού ϵ (<i>porosity</i>)	36
2.1.3.3 Σχήμα των πόρων, χαρακτηριστικά μήκη Λ και Λ'	37
2.1.3.4 Ελικοειδές ενός υλικού (<i>tortuosity</i>)	38
2.1.4 Πετροβάμβακας (<i>mineral/rock wool</i>)	40
2.1.5 Υαλοβάμβακας (<i>glass wool</i>)	40
2.1.6 Πολυεστερική ίνα	41
2.1.7 Αερογέλη (<i>Aerogels</i>)	42
2.1.8 Μη υφαντά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα (<i>nonwoven textiles</i>)	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Σωλήνας εμπέδησης (<i>impedance tube</i>)	44
3.1 Προσδιορισμός του συντελεστή α	46
3.1.1 Μέθοδος στάσιμου κύματος (<i>Standing wave method</i>)	46
3.1.2 Μέθοδος συνάρτησης μεταφοράς (<i>The transfer function method</i>)	49
3.1.3 Μέθοδος Απωλειών Μετάδοσης (<i>Transmission Loss</i>)	51
3.1.4 Μέθοδος ελάχιστου μέσου τετραγώνου (<i>Least mean square method</i>)	54
3.1.5 Συντελεστής Μείωσης Θορύβου (<i>NRC</i>)	55
3.1.6 Μέσος όρος Απορρόφησης Ήχου (<i>Sound Absorption average</i>)	55
3.2 Σωλήνας εμπέδησης <i>SCS9020B/K/T60/TL</i>	56

3.2.1 SCS9020B/ K/ T60/ TL hardware	56
3.2.2 Πρότυπα συμμόρφωσης ISO.....	59
3.2.3 Εύρος συχνοτήτων - Υπολογισμός θέσης μικροφώνου.....	60
3.2.3.1 Όριο χαμηλών - υψηλών συχνοτήτων για διάμετρο σωλήνα d : 100 mm.....	61
3.2.3.2 Όριο χαμηλών - υψηλών συχνοτήτων για διάμετρο σωλήνα d : 28 mm.....	62
3.2.4 SCS90-SERIES/9020B δοκιμασμένα χαρακτηριστικά και επιδόσεις.....	62
3.2.5 Συντήρηση Σωλήνα.....	63
3.2.6 Τοποθέτηση δειγμάτων εσωτερικά του σωλήνα.....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Δείγματα, υλικά και κοπή.....	65
4.1 Κοπή υλικών.....	65
4.1.1 Κοπή λέιζερ -Laser cut.....	65
4.1.2 CNC μηχανές κοπής - CNC cutting machines.....	66
4.1.3 Κοπή διάτρησης (Punch cut).....	66
4.1.4 Κυκλικό κοπίδι με ξυράφι.....	67
4.2 Δείγματα.....	68
4.2.1 Sample 1.....	69
4.2.2 Sample 2.....	69
4.2.3 Sample 3.....	69
4.2.4 Sample 4.....	69
4.2.5 Sample 5.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πειραματικό μέρος.....	71
5.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός.....	71
5.2 Διάταξη εξοπλισμού.....	73
5.3 Πρόγραμμα μετρήσεων SCS 9020.....	74
5.4 Στάδια Πειραματικής Διαδικασίας.....	75
5.5 Μετρήσεις.....	84
5.5.1 Sample 1 πάχους 20 mm και πυκνότητας 200 kg/m ³	84
5.5.2 Sample 2 πάχους 20 mm / 50 mm και πυκνότητας 100 kg/m ³	85
5.5.3 Sample 3 πάχους 20 mm / 50 mm και πυκνότητας 150 kg/m ³	87
5.5.4 Sample 4 πάχους 20 mm και πυκνότητας 40 kg/m ³	89
5.5.5 Sample 5 πάχους 30 mm και πυκνότητας 34 kg/m ³	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Ανάλυση Αποτελεσμάτων – Συζήτηση.....	93
6.1 Η επίδραση του πάχους του υλικού.....	94
6.2 Η επιρροή του διάκενου αέρα (air gap).....	96
6.3 Η επιρροή της πυκνότητας.....	105

ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	109
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ.....	110

Εικόνα 1 : Βασικά χαρακτηριστικά κύματος [1].	18
Εικόνα 2 : Σχέση μεταξύ μήκους κύματος και συχνότητας [1].	19
Εικόνα 3 : Πυκνώματα και αραιώματα στα μόρια του αέρα κατά τη διάδοση ηχητικού κύματος [4].	19
Εικόνα 4 : Διαμήκη (επάνω) και εγκάρσια (κάτω) κύματα, αντίστοιχα [5].	20
Εικόνα 5 : Παράδειγμα στάσιμου κύματος. Δεσμοί στα κόκκινα σημεία, κοιλίες στα μπλε [7].	20
Εικόνα 6 : Κανονικοί τρόποι ταλάντωσης για τις περιπτώσεις σωλήνα ανοιχτών άκρων και σωλήνα ανοιχτού από το ένα άκρο.	22
Εικόνα 7 : Στάσιμα κύματα σε σωλήνα: επάνω σωλήνας με δυο κλειστά άκρα, κάτω σωλήνας ένα κλειστό και ένα ανοιχτό άκρο.	23
Εικόνα 8 : Πρόσπτωση ηχητικού κύματος σε υλικό.	25
Εικόνα 9 : Ανάκλαση και διάθλαση σε περίπτωση κάθετης πρόσπτωσης [12].	25
Εικόνα 10 : Συνηχητές μεμβράνης.	31
Εικόνα 11 : Συντελεστής απορρόφησης για συνηχητές μεμβράνης σε σχέση με την συχνότητα Hz [14].	32
Εικόνα 12 : Συνηχητές κοιλότητας Helmholtz.	32
Εικόνα 13 : Στάσιμο κύμα μπροστά σε τοίχο [21].	34
Εικόνα 14 : Εφαρμογή πορώδη απορροφητή ήχου.	35
Εικόνα 15 : Πάνελ πετροβάμβακα [26].	40
Εικόνα 16 : Ρολό υαλοβάμβακα [28].	41
Εικόνα 17 : Ρολό Πολυεστερικής ίνας [31].	42
Εικόνα 18 : Αεροτζέλ Silica σε μορφή μπλοκ [34].	43
Εικόνα 19 : Μη υφαντά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα [32].	43
Εικόνα 20 : Σχήματα σωλήνων Kundt του 1866 από τον αρχικό εξοπλισμό [34].	44
Εικόνα 21 : Σωλήνας Kundt για μέτρηση συντελεστή α και ειδικής ακουστικής εμπέδησης με τη μέθοδο στάσιμου κύματος [39].	47
Εικόνα 22 : Σωλήνας Kundt για μέτρηση συντελεστή α με την μέθοδο συνάρτησης μεταφοράς -transfer function method [12].	49
Εικόνα 23 : Υλοποίηση της μεθόδου απωλειών μετάδοσης με ρύθμιση τεσσάρων μικροφώνων [12].	52
Εικόνα 24 : Διάταξη σωλήνων Kundt για μέτρηση συντελεστή α , σωλήνας 1, 100 mm διάμετρος, σωλήνας 2, 28 mm διάμετρος.	57
Εικόνα 25 : Διάταξη σωλήνων Kundt για μέτρηση transmission loss TL.	57
Εικόνα 26 : Ο μεγάλος σωλήνας (100 mm) με 5 υποδοχείς μικροφώνων.	58
Εικόνα 27 : Έμβολο - πιστόνι κυλινδρικού σωλήνα.	58

Εικόνα 28 : Ο μικρός σωλήνας (28 mm) με δύο υποδοχείς μικροφώνων.	59
Εικόνα 29 : Διάταξη συνάρτησης μεταφοράς, πάνω σωλήνας διάμετρος 100 mm/ κάτω 28 mm και μήκη για το κάθε σωλήνα [43].	60
Εικόνα 30 : Ευθυγραμμισμένη τοποθέτηση δείγματος σε Σωλήνα Kundt.	64
Εικόνα 31 : CNC λέιζερ (laser cutter) [46].	66
Εικόνα 32 : CNC cutting machine [46].	66
Εικόνα 33 : Διατηρητής οπών [48].	67
Εικόνα 34 : Κοπίδι κύκλων Lion NT Cutter C-1500P με κοπή από 1,8 cm - 17 cm [49].	67
Εικόνα 35 : Kundt tubes TF διαμέτρου 100 mm και 28 mm.	71
Εικόνα 36 : Μικρόφωνο UC-53A με προενισχυτή NH-22 [51].	72
Εικόνα 37 : Ενισχυτής AS220, πάνω η πρόσοψη του AS220, κάτω η πίσω όψη του ενισχυτή ήχου [56].	72
Εικόνα 38 : Μονάδα απόκτησης/αναπαραγωγής σήματος Model DT-9837A / SCS-SDT4 [53].	73
Εικόνα 39 : Η/Υ τύπου laptop με κάρτα ήχου.	73
Εικόνα 40 : Διάταξη και συνδεσμολογία εργαστηριακού εξοπλισμού για μέτρηση του συντελεστή ηχοαπορρόφησης α	74
Εικόνα 41 : Κύριο μενού SCS 9020.	74
Εικόνα 42 : White Noise Generator.	75
Εικόνα 43 : Μενού βαθμονόμησης.	75
Εικόνα 44 : Βαθμονομητής μικροφώνων, sound calibrator Norsonic type 1251 [53].	76
Εικόνα 45 : Interface των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης.	76
Εικόνα 46 : Ρύθμιση παραμέτρων [39].	77
Εικόνα 47 : campaign settings	78
Εικόνα 48 : Μενού calibration alpha.	79
Εικόνα 49 : Απεικόνιση σωλήνα kundt <i>SCS 9020</i> για μέτρηση συντελεστή α .79	
Εικόνα 50 : Calibrate 1 – 2 για τις χαμηλές συχνότητες.	80
Εικόνα 51 : Calibrate 2 – 1 για τις χαμηλές συχνότητες.	80
Εικόνα 52 : Calibrate 1 – 2 για τις υψηλές συχνότητες.	80
Εικόνα 53 : Calibrate 2 – 1 για τις υψηλές συχνότητες.	81
Εικόνα 54 : Έλεγχος calibration α , αντιστάθμιση πλάτους και φάσης για υψηλές και χαμηλές συχνότητες.	81
Εικόνα 55 : Διαδικασία μέτρησης συντελεστή α	82
Εικόνα 56 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για συχνότητες 120 Hz – 1540 Hz.	82

Εικόνα 57 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για συχνότητες 540 Hz – 7100 Hz.....	83
Εικόνα 58 : Αριστερά συνολική καμπύλη απόκρισης του α σε όλο το εξεταζόμενο εύρος συχνοτήτων. Δεξιά συντελεστής α ανά 1/3 της οκτάβας 120 Hz – 7100 Hz.....	83
Εικόνα 59 : Έλεγχος δεδομένων για το sample 1 με διάκενο αέρος, αριστερά εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz, δεξιά εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz. Οι αριθμοί στα δεξιά δείχνουν το αντίστοιχο διάκενο (0, 20, 50, 100, 200) σε mm.....	84
Εικόνα 60 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 1 πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz.....	85
Εικόνα 61 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 1 πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.....	85
Εικόνα 62 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 2 πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz.....	86
Εικόνα 63 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 2 πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.....	86
Εικόνα 64 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 2 πάχους 50 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz.....	87
Εικόνα 65 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 2 πάχους 50 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.....	87
Εικόνα 66 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 3 με πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz.....	88
Εικόνα 67 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 3 με πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.....	88
Εικόνα 68 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 3 με πάχους 50 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz.....	89
Εικόνα 69 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 3 με πάχους 50 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.....	89

Εικόνα 70 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 4 πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz.....	90
Εικόνα 71 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 4 πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.....	90
Εικόνα 72 : Εφαρμογή πλαστελίνης στον σωλήνα Kundt (28mm) για το sample 5 διαμέτρου 28 mm.....	91
Εικόνα 73 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 5 πάχους 30 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz με διάκενο αέρος 0 mm.....	91
Εικόνα 74 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 5 πάχους 30 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz.....	92
Εικόνα 75 : Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 5 πάχους 30 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.....	92
Εικόνα 76 : Δείγμα πετροβάμβακα μη προετοιμασμένο σωστά.....	94
Εικόνα 77 : Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το δείγμα sample 2 για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 7100 Hz με διαφορετικό πάχος 20 mm και 50 mm με διάκενο αέρα 0 mm.....	95
Εικόνα 78 : Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης για το δείγμα sample 3 για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 7100 Hz με διαφορετικό πάχος 20 mm και 50 mm με διάκενο αέρα 0.....	95
Εικόνα 79 : Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το δείγμα sample 1 πάχους 20 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.....	97
Εικόνα 80 : Σύγκριση συντελεστή απορρόφησης α για το δείγμα sample 4 πάχους 20 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.....	98
Εικόνα 81 : Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το δείγμα sample 5 πάχους 30 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.....	100
Εικόνα 82 : Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το δείγμα sample 2 πάχους 20 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.....	101
Εικόνα 83 : Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το sample 2 πάχους 50 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος	

συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.	102
Εικόνα 84 : Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το sample 3 πάχους 20 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.	103
Εικόνα 85 : Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το sample 3 πάχους 50 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.	104
Εικόνα 86 : Συγκριτική καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για το sample 1 - sample 4 με ίδιο πάχος 20 mm και διαφορετικής πυκνότητας χωρίς διάκενο αέρος. Αριστερό διάγραμμα, εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz, δεξί διάγραμμα 520 Hz – 7100 Hz.	106
Εικόνα 87 : Συγκριτική καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για το sample 2 - sample 3 με ίδιο πάχος 20 mm και διαφορετικής πυκνότητας χωρίς διάκενο αέρος. Αριστερό διάγραμμα, εύρος συχνοτήτων 120 – 1540 Hz, δεξί διάγραμμα 520 – 7100 [Hz].	107
Εικόνα 88 : Συγκριτική καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για το sample 2 - sample 3 με ίδιο πάχος 50 mm και διαφορετικής πυκνότητας χωρίς διάκενο αέρος. Αριστερό διάγραμμα, εύρος συχνοτήτων 120 – 1540 Hz, δεξί διάγραμμα 520 – 7100 Hz.	107

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη της ηχοαπορροφητικής ικανότητας πορωδών υλικών με την μέθοδο μέτρησης συνάρτησης μεταφοράς δύο (2) μικροφώνων που βασίζεται στη χρήση σωλήνα ακουστικής εμπέδησης (acoustic impedance tube). Στα πλαίσια της μελέτης μας θα γίνει συγκριτική μελέτη παρόμοιων υλικών, με διαφορές στις κατασκευαστικές τους παραμέτρους όπως η πυκνότητα και το πάχος τους, ως προς την ικανότητά τους να απορροφούν τον ήχο. Ακόμα θα μελετηθεί η ικανότητα των υπό εξέταση υλικών να απορροφούν τον ήχο όταν εφαρμόζονται διαφορετικά βάρη κοιλότητας μεταξύ του πίσω (τερματικού) τοιχώματος του ακουστικού σωλήνα εμπέδησης και των υλικών και θα προσδιορίσουμε σε ποιο διάκενο αέρος η ήχο απορροφητική ικανότητα του εκάστοτε υλικού επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση του.

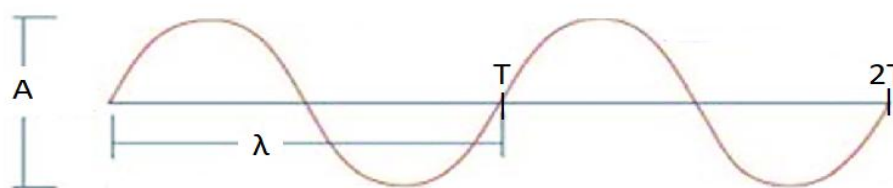
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

Βασικές έννοιες ακουστικής - Ηχητικά κύματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα κάνουμε αναφορά σε έννοιες της ακουστικής οι οποίες είναι βασικές στη μελέτη που θα διεξάγουμε με σκοπό να κατανοήσουμε καλύτερα τους όρους αυτούς και την συμβολή τους στο πείραμα μας.

1.1 Κύμα.

Η χωροχρονική διαταραχή που μεταφέρει ενέργεια από ένα σημείο του μέσου διάδοσης σε ένα άλλο χωρίς να μεταφέρει μάζα ονομάζεται μηχανικό κύμα.



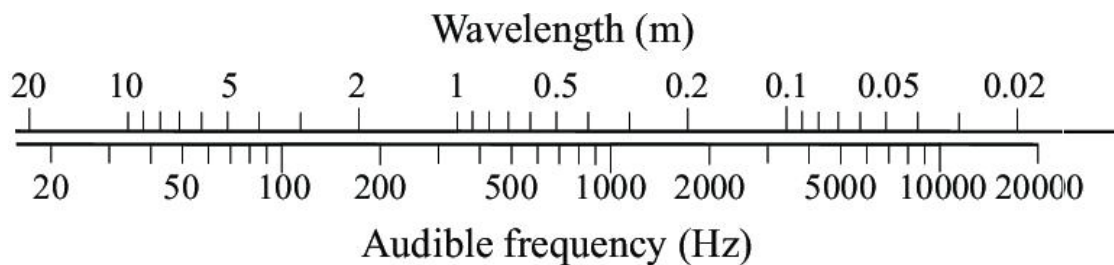
Εικόνα 1: Βασικά χαρακτηριστικά κύματος [1].

Η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος (σε ένα ομογενές και ισότροπο μέσο) είναι σταθερή και εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του μέσου. Αν το μέσο διάδοσης αλλάξει ιδιότητες, τότε αλλάζει η ταχύτητα διάδοσης c [m/s] και το μήκος κύματος λ [m], επειδή η συχνότητα, f [Hz] η οποία εξαρτάται από την πηγή, παραμένει σταθερή. Η Θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής που συνδέει την ταχύτητα, τη συχνότητα και το μήκος κύματος είναι η εξής [1]:

$$c = \lambda \cdot f \quad (1)$$

όπου λ [m] είναι το μήκος κύματος, η απόσταση δηλαδή μεταξύ δυο διαδοχικών μεγίστων πλάτους του κύματος. Πλάτος, A , (Εικόνα 1) ονομάζεται η μέγιστη μετατόπιση ενός σημείου στο κύμα, η περίοδος, T , είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να κάνει μια πλήρη ταλάντωση ένα σημείο του κύματος (η περιοδική κίνηση

μιας στοιχειώδους ποσότητας μάζας του μέσου διάδοσης, ή «μορίου», γύρω από τη θέση ισορροπίας του), $T=1/f$ [s], και f είναι η συχνότητα η οποία συνδέεται με την κυκλική συχνότητα ω με τον τύπο $f = \omega/2\pi$ [Hz]. Στην Εικόνα 2 βλέπουμε ενδεικτικό σχήμα της σχέσης μεταξύ μήκους κύματος και συχνότητας για διάδοση του ήχου στον αέρα [1],[2],[3],[4].



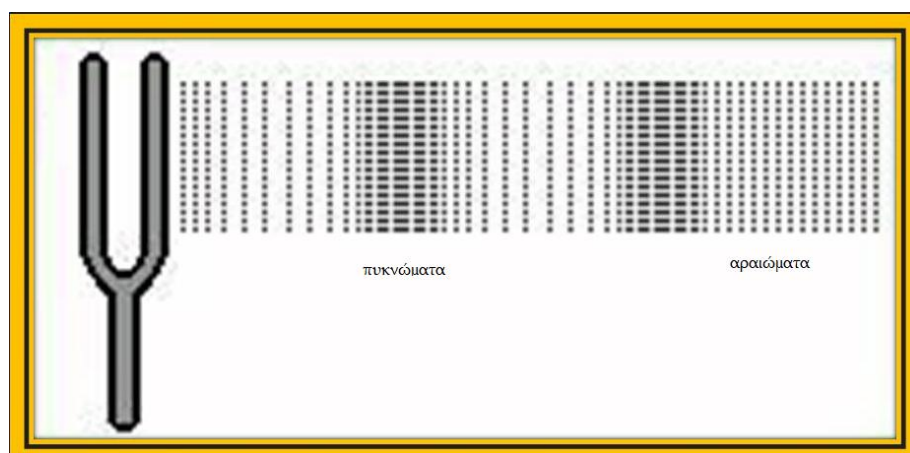
Εικόνα 2: Σχέση μεταξύ μήκους κύματος και συχνότητας [1].

1.2 Τύποι κυμάτων.

Ανάλογα με τον τρόπο που διαδίδονται τα ηχητικά κύματα έχουμε δύο βασικούς τύπους κυμάτων, τα διαμήκη και τα εγκάρσια.

1.2.1 Διαμήκη κύματα

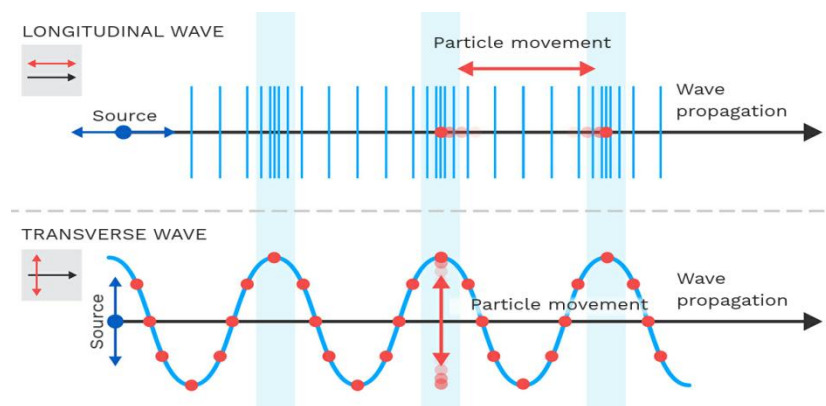
Διαμήκη κύματα ονομάζονται τα κύματα των οποίων η διεύθυνση διάδοσής τους είναι παράλληλη στη διεύθυνση της ταλάντωσης των «μορίων» του του μέσου διάδοσης. Με την ταλάντωση που πραγματοποιούν τα «μόρια» του μέσου στα διαμήκη κύματα, το κύμα αποτυπώνεται χωρικά με τη μορφή πυκνώματων και αραιώματων, στα ρευστά (αέρια και υγρά) διαδίδονται μόνο διαμήκη κύματα [4].



Εικόνα 3: Πυκνώματα και αραιώματα στα μόρια του αέρα κατά τη διάδοση ηχητικού κύματος [4].

1.2.2 Εγκάρσια κύματα.

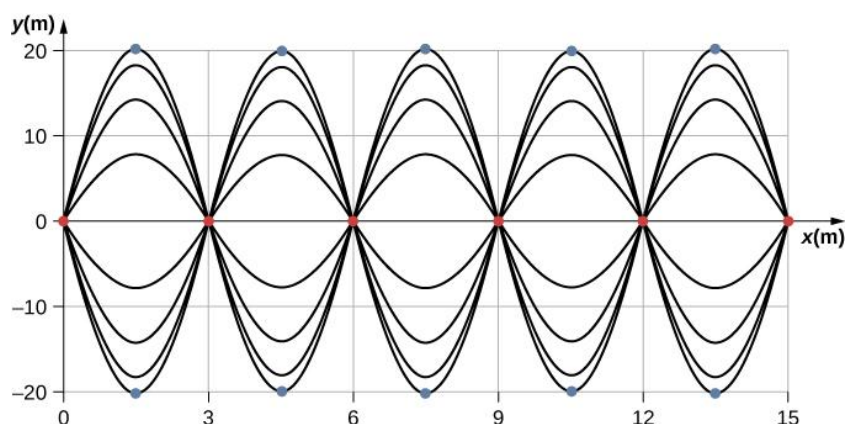
Εγκάρσια κύματα ορίζονται τα κύματα των οποίων η διεύθυνση διάδοσης είναι κάθετη στη διεύθυνση της ταλάντωσης των σωματιδίων που αποτελούν το μέσο διάδοσης. Εγκάρσια ηχητικά κύματα διαδίδονται μόνο στα στερεά. Τα εγκάρσια και τα διαμήκη κύματα αποτελούν τα δύο βασικά είδη ηχητικών (μηχανικών) κυμάτων [2],[4].



Εικόνα 4: Διαμήκη (επάνω) και εγκάρσια (κάτω) κύματα, αντίστοιχα [5].

1.2.3 Στάσιμα κύματα.

Τα στάσιμα κύματα είναι ένας συνδυασμός δύο κυμάτων τα οποία διαδίδονται σε αντίθετη κατεύθυνση, το καθένα έχει την ίδια συχνότητα και το ίδιο πλάτος. Τα δυο αυτά κύματα παρεμβάλλονται το ένα μέσα στο άλλο, δηλαδή, όταν τα κύματα υπερτίθενται, οι ενέργειές τους είτε αθροίζονται, είτε ακυρώνονται. Τα στάσιμα κύματα μπορούν να σχηματιστούν κάτω από ποικίλες συνθήκες, αλλά αναπτύσσονται εύκολα σε ένα μέσο που είναι πεπερασμένο ή οριοθετημένο [6].



Εικόνα 5: Παράδειγμα στάσιμου κύματος. Δεσμοί στα κόκκινα σημεία, κοιλίες στα μπλε [7].

Σε ένα οριοθετημένο μέσο, τα στάσιμα κύματα εμφανίζονται όταν ένα κύμα συναντά την ανάκλασή του (κύμα σε αντίθεση φάσης). Η υπέρθεση αυτών των δύο κυμάτων παράγει ένα κύμα που «φαίνεται να μην κινείται», το στάσιμο κύμα. Η αίσθηση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι σε κάθε σημείο του χώρου το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης είναι συγκεκριμένο, ενώ υπάρχουν σημεία που το πλάτος ταλάντωσης είναι μηδενικό (δεσμοί) και σημεία που το πλάτος ταλάντωσης είναι μέγιστο (κοιλίες) (Εικόνα 5), η δε απόσταση μεταξύ δυο δεσμών ισούται με το μισό του μήκους κύματος. Για να σχηματίζονται στάσιμα κύματα απαιτείται να τροφοδοτείται ένα σύστημα από ενέργεια με την κατάλληλη συχνότητα. Οι συχνότητες του συνόλου όλων των πιθανών στάσιμων κυμάτων είναι γνωστές ως αρμονικές. Η χαμηλότερης συχνότητας αρμονική ονομάζεται θεμελιώδης ή πρώτη αρμονική. Οι αμέσως μεγαλύτερες συχνότητες των επόμενων στάσιμων κυμάτων ονομάζονται δεύτερη αρμονική, τρίτη αρμονική, κλπ. Υπάρχουν τρεις απλές περιπτώσεις που μπορούν να σχηματιστούν στάσιμα κύματα σε ένα απλό, μονοδιάστατο σύστημα [2].

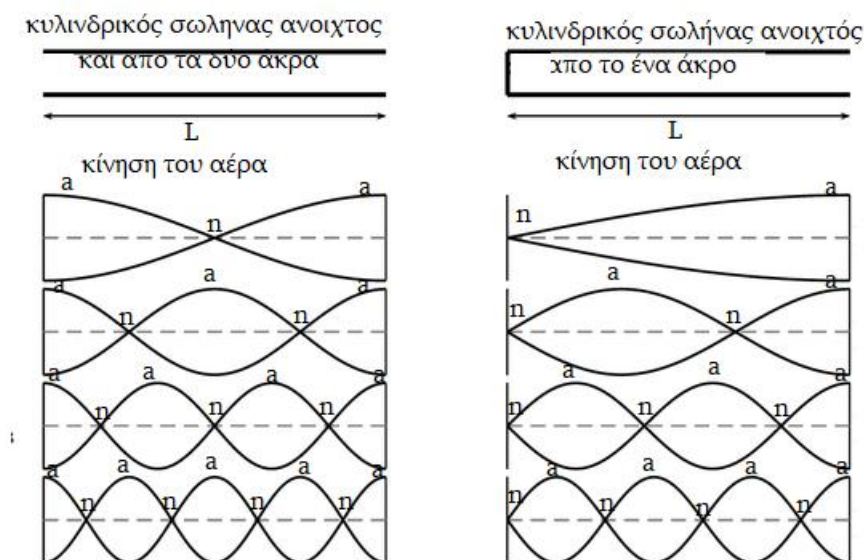
1. Μία διάσταση: δύο σταθερά άκρα
2. Μία διάσταση: ένα σταθερό άκρο-ένα ελεύθερο άκρο
3. Μία διάσταση: δύο ελεύθερα άκρα

Σε ένα μέσο (π.χ., χορδή ή ακουστικός σωλήνας) με μήκος L και δυο άκρα που είναι οριοθετημένα, το κύμα διαδίδεται και προς τις 2 κατευθύνσεις, η συνεχής υπέρθεση (έχει διαπιστωθεί ότι τα κύματα ακολουθούν την αρχή επαλληλίας ή υπέρθεσης, σύμφωνα με την οποία όταν σε ένα ελαστικό μέσο διαδίδονται δύο ή περισσότερα κύματα η απομάκρυνση ενός σημείου του μέσου είναι ίση με τη συνισταμένη των απομακρύνσεων που οφείλονται στα επί μέρους κύματα) των κυμάτων που προσπίπτουν και ανακλώνται στα άκρα του μέσου δημιουργεί στάσιμα κύματα. Τα κύματα που δημιουργούνται όμως υπόκεινται σε οριακές συνθήκες (στα όρια μέσου), π.χ. μπορεί τα άκρα του μέσου να είναι υποχρεωτικά δεσμοί, όταν τα άκρα είναι ακίνητα, οπότε η μετατόπισή τους πρέπει να είναι μηδενική [2].

Οριακές συνθήκες: Ένα νήμα το οποίο είναι στερεωμένο σε ακλόνητα σημεία και από τις δυο πλευρές του, έχει υποχρεωτικά δεσμούς στα άκρα του, άρα τα μήκη κύματος των στάσιμων κυμάτων που μπορούν να αναπτυχθούν σε αυτό είναι προκαθορισμένα όπως και οι αντίστοιχες συχνότητες. Μπορούμε να περιγράψουμε τους κανονικούς τρόπους ταλάντωσης ενός νήματος επιβάλλοντας τις οριακές συνθήκες, π.χ. στην πιο πάνω περίπτωση ότι τα άκρα πρέπει να είναι δεσμοί, και ότι ένας δεσμός από την κοντινότερη κοιλία πρέπει να απέχει απόσταση ίση με το ένα τέταρτο του μήκους κύματος.

Η ικανοποίηση των οριακών συνθηκών οδηγεί σε διακριτές ταλαντώσεις στο νήμα, που λέγονται κανονικοί τρόποι ταλάντωσης (modes) και όλες οι αντίστοιχες συχνότητες είναι πολλαπλάσιες μιας θεμελιώδους. Το φαινόμενο

αυτό λέγεται κβαντισμός. Υπάρχει ένας άπειρος αριθμός αρμονικών για αυτά τα συστήματα [8], [9], [10]. Στην Εικόνα 6 βλέπουμε δυο από τις τρεις περιπτώσεις οριακών συνθηκών όπου τα μήκη κύματος σχηματίζουν στάσιμα κύματα σε ακουστικό σωλήνα.



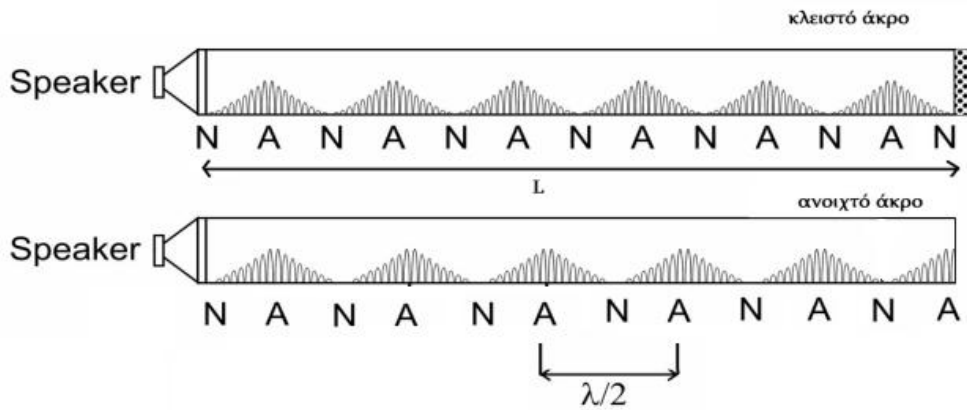
Εικόνα 6: Κανονικοί τρόποι ταλάντωσης για τις περιπτώσεις σωλήνα ανοιχτών άκρων και σωλήνα ανοιχτού από το ένα άκρο.

Η περίπτωση κλειστού - κλειστού ακουστικού σωλήνα, είναι αντίστοιχη με την περίπτωση ανοικτού-ανοικτού. Αν και με αντίθετες οριακές συνθήκες οι τρόποι ταλάντωσης έχουν τις ίδιες συχνότητες. Στην Εικόνα 6 με “n” σημειώνονται οι δεσμοί (nodes) και με “a” οι κοιλίες (antinodes).

Μέσα σε σωλήνα δημιουργούνται στάσιμα κύματα των οποίων το μήκος κύματος μπορεί να εκφραστεί με τις Εξισώσεις (2) και (3) για σωλήνα κλειστών (ή ανοικτών) και των δυο άκρων και για σωλήνα με ένα ανοιχτό και ένα κλειστό άκρο, αντίστοιχα.

$$L = n \frac{\lambda}{2}, \quad \text{όπου } n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

$$L = (2n - 1) \frac{\lambda}{4}, \quad \text{όπου } n = 1, 3, 5, \dots \quad (3)$$



Εικόνα 7: Στάσιμα κύματα σε σωλήνα: επάνω σωλήνας με δυο κλειστά άκρα, κάτω σωλήνας ένα κλειστό και ένα ανοιχτό άκρο.

Η Εικόνα 7 παρουσιάζει τους δεσμούς και τις κοιλίες που δημιουργούνται σε σωλήνα με ένα κλειστό και ένα ανοιχτό άκρο [6] όπου λ το μήκος κύματός, L το μήκος του σωλήνα, N δεσμός (node) και A κοιλία (antinode) του κύματος.

1.3 Ακουστικά μεγέθη και επιφάνεια πρόσπτωσης.

Στην ακουστική ένα από τα κυριότερα θέματα που μας απασχολούν είναι πως θα χειριστούμε τις ανακλάσεις του ήχου που επηρεάζουν τον τρόπο διάδοσης του και το πως γίνεται τελικά αντιληπτή η ακουστική ενός χώρου.

Ο ήχος ως μηχανική διαταραχή που διαδίδεται με μια ορισμένη ταχύτητα σε ένα μέσο μπορεί να αναπτύξει εσωτερικές δυνάμεις (π.χ. ελαστική, εσωτερική τριβή). Η ακουστική πίεση p [Pa] είναι το βασικό χαρακτηριστικό του ήχου. Η πιο απλή περίπτωση κύματος είναι τα αρμονικά επίπεδα κύματα, τα οποία διαδίδουν τη διαταραχή πίεσης κατά μήκος μιας διάστασης, π.χ., x , ενώ είναι σταθερή στις άλλες δύο διαστάσεις. Σε αυτή την περίπτωση, ο ήχος ικανοποιεί τη μονοδιάστατη κυματική εξίσωση:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (4)$$

Η στιγμιαία ακουστική πίεση, $p(t)$, είναι σπάνια μετρούμενη ποσότητα εν αντίθεση με την ηχητική ισχύ. Η ενεργός ακουστική πίεση, p_{eff} , δηλαδή η ρίζα της μέσης τετραγωνικής ακουστικής πίεσης (root mean square, rms), p_{rms} η οποία δίνεται από την Εξίσωση (5), χρησιμοποιείται κυρίως σε ακουστικές μετρήσεις.

$$p_{eff} = p_{rms} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (5)$$

Η ένταση του ήχου, \vec{I} , σε ένα δεδομένο σημείο ενός ακουστικού πεδίου σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση ορίζεται ως ο λόγος της μέσης ακουστικής ισχύος που μεταδίδεται μέσω μιας μονάδας επιφάνειας κάθετης προς την εξεταζόμενη διεύθυνση στο συγκεκριμένο σημείο, η οποία περιγράφει την ποσότητα και την κατεύθυνση της ροής της ακουστικής ενέργειας σε μια δεδομένη θέση, $[I] = 1\text{W}/\text{m}^2$. Για τα επίπεδα κύματα, το μέτρο της έντασης του ήχου υπολογίζεται ως:

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad (6)$$

όπου ρ η πυκνότητα του μέσου και c η ταχύτητα του ήχου στο συγκεκριμένο ακουστικό μέσο [3], [10].

Η γενική λύση της Εξίσωσης (4) μας δίνεται ως:

$$p(t) = p_{01} e^{j(\omega t - kx)} + p_{02} e^{j(\omega t + kx)} \quad (7)$$

Εφόσον ενδιαφερόμαστε για την διάδοση στη διεύθυνση $+x$ η Εξίσωση (7) τότε γίνεται:

$$p(t) = p_0 e^{j(\omega t - kx)} = p_0 e^{jk(ct-x)} \quad (8)$$

Επειδή οι πραγματικές ποσότητες είναι οι μετρήσιμες, από την Εξίσωση (8) έχουμε:

$$p(t) = p_0 \cos(\omega t - kx) \quad (9)$$

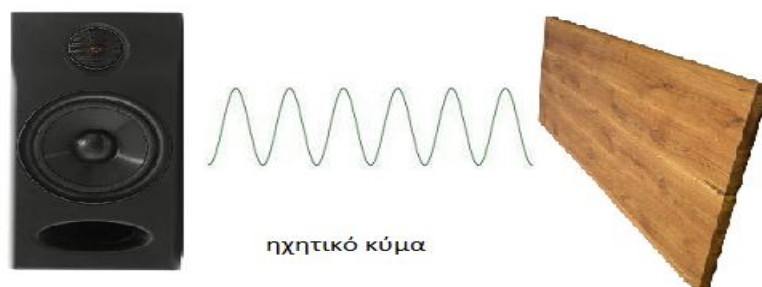
Από τους ορισμούς των ω, f, T , και τις Εξισώσεις (1) & (9) έχουμε :

$$p(t) = p_0 \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad \text{ή} \quad p(t) = p_0 \cos \omega\left(t - \frac{x}{c}\right) \quad (10)$$

Ο ήχος που διαδίδεται στον αέρα όταν προσπίπτει σε ένα άλλο υλικό, μεταδίδεται σε αυτό, απορροφάται από αυτό ή ανακλάται. Η ποσότητα της ενέργειας που μεταδίδεται, απορροφάται ή ανακλάται εξαρτάται από το υλικό και τη σχέση που έχουν οι ακουστικές του ιδιότητες σε σχέση με αυτές του αέρα. Ο ανακλώμενος ήχος μπορεί είτε να ανακατευθυνθεί από δομές με μεγάλες επίπεδες επιφάνειες (ανακλάται κατοπτρικά) ή να διασκορπιστεί από μια δομή διάχυσης, ενώ, παράλληλα, μέρος του μπορεί να απορροφάται από το υλικό της δομής αυτής. Όταν ένα σημαντικό τμήμα του ανακλώμενου ήχου είναι χωρικά

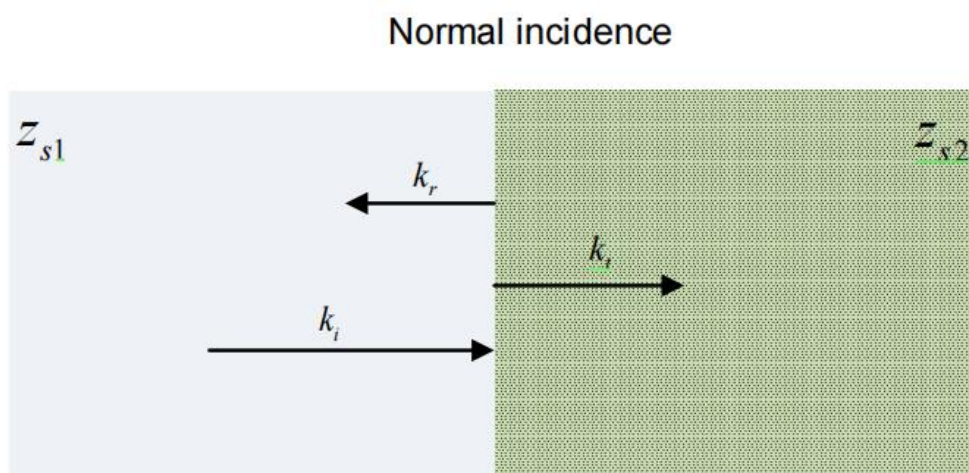
και χρονικά διασκορπισμένο, έχουμε διάχυτη ανάκλαση, και η εμπλεκόμενη δομή ονομάζεται διαχυτής [12], [13].

Όταν σε ένα ηχοαπορροφητικό υλικό προσπίπτει ένα ακουστικό κύμα που πριν διαδίδονταν στον αέρα, τρία ακουστικά μεγέθη είναι σημαντικά ώστε να μελετήσει κανείς τι θα συμβεί στο κύμα αυτό: η ειδική ακουστική εμπέδηση του υλικού (με δεδομένη την αντίστοιχη του αέρα), ο συντελεστής ανάκλασης και ο συντελεστής απορρόφησης.



Εικόνα 8: Πρόσπτωση ηχητικού κύματος σε υλικό.

Η κατανόηση αυτών των ακουστικών μεγεθών είναι σημαντική για τη μελέτη των ηχοαπορροφητικών υλικών.



Εικόνα 9: Ανάκλαση και διάθλαση σε περίπτωση κάθετης πρόσπτωσης [12].

Σε ένα ακουστικό σύστημα, η ακουστική πίεση θεωρείται το αίτιο, ενώ το αποτέλεσμα είναι η κίνηση των «σωματιδίων» του ακουστικού μέσου. Επομένως, σε αναλογία με τα ηλεκτρικά κυκλώματα, μπορεί κανείς να ορίσει την ακουστική εμπέδηση, Z , ως το λόγο της ακουστικής πίεσης, p , προς τη ταχύτητα όγκου, U , (ροή του ακουστικού όγκου) [12]:

$$Z = \frac{p}{U} \quad (11)$$

Η Z είναι μιγαδικό μέγεθος και εξαρτάται από τη συχνότητα. Όντας εξαρτώμενη από την περιοχή μέσω της οποίας ορίζεται η ροή, η Z δεν είναι χαρακτηριστικό του ακουστικού μέσου.

Από την άλλη, η ειδική ακουστική εμπέδηση, z_s , που μερικές φορές αναφέρεται ως ακουστική εμπέδηση επιφάνειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει ένα ακουστικό μέσο. Ορίζεται ως ο λόγος της ακουστικής πίεσης, p , προς τη σωματιδιακή ταχύτητα, u , σε ένα δεδομένο σημείο (Εξίσωση (12)). Το z_s είναι μιγαδικό μέγεθος και εξαρτάται από τη συχνότητα, η μονάδα μέτρησης του $[z_s] = 1 \text{ kg/m}^2 \text{ s} = 1 \text{ rayl}$ [12].

$$z_s = \frac{p}{u} \quad (12)$$

Ωστόσο, η χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση, δηλαδή η ειδική ακουστική εμπέδηση υπό την παραδοχή της αρμονικής διάδοσης επιπέδου κύματος, είναι πραγματική και ανεξάρτητη της συχνότητας και δίνεται ως:

$$z_c = \rho c \quad (13)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα c η ταχύτητα του ήχου στο συγκεκριμένο μέσο.

Η χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση είναι από τις ιδιότητες όγκου (bulk properties) που είναι χαρακτηριστικές του υλικού και περιγράφουν την αλληλεπίδραση ενός υλικού με τον ήχο. Οι bulk ιδιότητες είναι ανεξάρτητες από τις διαστάσεις του υλικού, επομένως για έναν απορροφητή είναι ανεξάρτητες από το μέγεθος του. Στην περίπτωση όμως των ανισότροπων υλικών οι bulk ιδιότητες είναι συνάρτηση της κατεύθυνσης. Σημαντικές bulk ιδιότητες είναι η χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση, z_c , ο κυματοαριθμός διάδοσης, k_c , ο ενεργός συντελεστής όγκου, K_e , η ενεργός πυκνότητα του πορώδους ρ_e , όπου e : effective. Ο όρος ενεργός (effective) στην, ρ_e , χρησιμοποιείται για να δηλώσει την πυκνότητα που «αντιλαμβάνεται» το ηχητικό κύμα και όχι την συνήθη πυκνότητα του μέσου [12]. Ο ενεργός συντελεστής όγκου είναι αντίστροφος της συμπίεστότητας, δηλαδή ορίζεται ως ο λόγος της πίεσης που εφαρμόζεται σε ένα υλικό προς την προκύπτουσα κλασματική μεταβολή του όγκου του. Τα ρ_e και K_e ορίζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 (Παράγραφος 2.1.3.4). Για έναν πορώδη απορροφητή, η ενεργή πυκνότητα και ο ενεργός συντελεστής όγκου είναι αλληλένδετα με τη χαρακτηριστική εμπέδηση, z_c , και τον κυματοαριθμό διάδοσης, k_c , όπως φαίνεται από τις Εξισώσεις (14), (15):

$$z_c = \sqrt{K_e \rho_e} \quad (14)$$

$$k_c = \omega \sqrt{\rho_e / K_e} \quad (15)$$

Γνωρίζοντας τις bulk ιδιότητες, η διάδοση του ηχητικού κύματος εντός του ακουστικού μέσο μπορεί να προβλεφθεί.

Επί της διεπιφάνειας δύο ακουστικών μέσων, η ειδική ακουστική εμπέδηση αναφέρεται ως εμπέδηση επιφάνειας (surface impedance), υπονοώντας ότι υπολογίζεται στην επιφάνεια ενός πορώδους τοίχου [12]. Γενικά, η εμπέδηση στην επιφάνεια ενός απορροφητή εξαρτάται από τις bulk ιδιότητες του πορώδους μέσου, τη γεωμετρία του και τις συνθήκες τοποθέτησης του απορροφητή. Η εμπέδηση επιφάνειας είναι γενικά μιγαδική, το πραγματικό μέρος της (ακουστική αντίσταση) σχετίζεται με απώλειες ενέργειας, ενώ το φανταστικό μέρος της (ακουστική αντίδραση) σχετίζεται με αλλαγές φάσης ή μηχανισμούς αποθήκευσης ενέργειας. Η ακουστική εμπέδηση επιφάνειας μας δίνει περισσότερες πληροφορίες για τις απορροφητικές ιδιότητες του υλικού σε σύγκριση με τον συντελεστή απορρόφησης [12].

1.4 Συντελεστής ηχοαπορρόφησης α .

Η Εικόνα 9 μας δείχνει δύο ακουστικά μέσα 1 και 2, που διασυνδέονται μέσω μιας επίπεδης επιφάνειας και χαρακτηρίζονται από τις σύνθετες αντιστάσεις επιφάνειας z_{s1} και z_{s2} , υποθέτουμε ότι η επιφάνεια διεπαφής είναι αδιάστατη και μη απορροφητική. Τότε εάν το μέσο 2 είναι απορροφητής, θα μπορούσαμε να αναφερθούμε στον μεταδιδόμενο ήχο ως και απορροφώμενο ήχο.

Όταν ένα αρμονικό επίπεδο κύμα, \vec{k}_i , από το μέσο 1 προσπίπτει στο μέσο 2, εν μέρει ανακλάται, \vec{k}_r , και εν μέρει διαθλάται (μεταδίδεται), \vec{k}_t . Εάν τα μέτρα της έντασης ήχου που αντιστοιχούν στον προσπίπτοντα, ανακλώμενο, μεταδιδόμενο και απορροφημένο ήχο είναι I_i, I_r, I_t, I_a , και οι αντίστοιχες ηχητικές ενέργειες είναι W_i, W_r, W_t και W_a , τότε μπορεί κανείς να ορίσει τον συντελεστή ανάκλασης, a_r , το συντελεστή μετάδοσης, a_t , και το συντελεστή απορρόφησης a_a ως [12]:

$$a_r = \frac{W_r}{W_i} = \frac{I_r}{I_i}, \tau = \alpha_t = \frac{W_t}{W_i} = \frac{I_t}{I_i}, \alpha = \alpha_a = \frac{W_a}{W_i} = \frac{I_a}{I_i} \quad (16)$$

Για την περίπτωση της κάθετης πρόσπτωσης είναι:

$$I = p_{rms}^2 / z_s \quad (17)$$

Οπότε, από την Εξίσωση (17) και τις Εξισώσεις (16), παίρνουμε:

$$a_t = \frac{p_{t,rms}^2 z_{s1}}{p_{i,rms}^2 z_{s2}} \quad \& \quad a_r = \frac{p_{r,rms}^2}{p_{i,rms}^2} \quad (18)$$

Χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες οριακές συνθήκες, έχουμε επίσης:

$$a_t = \frac{4z_{s1}z_{s2}}{(z_{s1} + z_{s2})^2} \quad \& \quad a_r = \frac{(z_{s2} - z_{s1})^2}{(z_{s2} + z_{s1})^2} \quad (19)$$

Ο λόγος της ανακλώμενης από την προσπίπτουσα πίεση αναφέρεται συνήθως ως συντελεστής ανάκλασης πίεσης (ή συντελεστής ανάκλασης), R και περιλαμβάνει πληροφορίες πλάτους και φάσης από το ανακλώμενο ηχητικό κύμα, p_r , και το προσπίπτον ηχητικό κύμα, p_i [12]:

$$R = \frac{p_r}{p_i} \quad (20)$$

Όπως έχουμε αναφέρει νωρίτερα η διεπαφή δεν απορροφά, $W_a = 0$, οπότε από την διατήρηση της ενέργειας έχουμε $W_i = W_r + W_t$ δηλαδή, $\alpha_r + \alpha_t = 1$. Ωστόσο, εάν το μέσο 2 είναι απορροφητικό, τότε η μεταδιδόμενη ισχύς απορροφάται, οπότε το συντελεστή μετάδοσης, τον ονομάζουμε αλλιώς συντελεστής απορρόφησης α , και μιας και $a_r = |R|^2$ μπορεί να εκφραστεί ως [12]:

$$\alpha = 1 - a_r = 1 - |R|^2 \quad (21)$$

Ένα υλικό θεωρείται κάλος απορροφητής όταν η τιμή του α είναι μεγαλύτερη από 0,75, ως εκ τούτου η ακρίβεια της τιμής του συντελεστή απορρόφησης, α , είναι ιδιαίτερα σημαντική για το κάθε ηχοαπορροφητικό υλικό λόγω του ότι είναι ένας καθοριστικός παράγοντας για την συμπεριφορά του στη διαμόρφωση της ακουστικής ενός χώρου, αλλά και στις διάφορες εφαρμογές του, όπως ρύθμιση του θορύβου. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συνήθως για να υπολογίσουμε τον συντελεστή απορρόφησης, α , είναι ο θάλαμος αντήχησης (Reverberation Chamber), η μέθοδος ανάκλασης (Reflection Method) και ο σωλήνας εμπέδησης (Impedance Tube) [12], [13]. Συγκεκριμένα για τα πορώδη υλικά οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι ο θάλαμος αντήχησης και ο σωλήνας εμπέδησης και από τις δύο αυτές μεθόδους μπορούμε να υπολογίσουμε χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν τα ηχοαπορροφητικά υλικά, όπως το συντελεστή απορρόφησης ήχου, το συντελεστή ανάκλασης και την ειδική ακουστική εμπέδηση του υλικού. Το πιο σύνθητες χαρακτηριστικό που αναφέρεται από επιστήμονες και μηχανικούς σε σχέση με τα ηχοαπορροφητικά υλικά είναι ο συντελεστής απορρόφησης του ήχου. Ο συντελεστής απορρόφησης είναι πιθανόν για το ίδιο υλικό να διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή, αλλά και από μέθοδο μέτρησης σε μέθοδο μέτρησης [3].

1.4.1 Θάλαμος αντήχησης (Reverberation chamber).

Θάλαμος αντήχησης θεωρείται ένας κλειστός χώρος συγκεκριμένων διαστάσεων με την πιο κάτω συμπεριφορά. Ας υποθέσουμε αρχικά μια πηγή που παράγει έναν ήχο εντός ενός κλειστού χώρου. Όταν ο ήχος προσκρούσει για πρώτη φορά σε κάποιο τοίχωμα του χώρου ένα μέρος του ήχου ανακλάται προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, ένα άλλο απορροφάται και ένα άλλο διαχέεται. Το μέρος που ανακλάται, αλλά και το μέρος που διαχέεται, συνεχίζουν να διαδίδονται εντός του κλειστού αυτού χώρου και να υφίστανται την ίδια διαδικασία κάθε φορά που φτάνουν σε ένα τοίχωμα. Όμως, επειδή μέρος του ήχου απορροφάται με κάθε πρόσπτωση σε τοίχωμα, σταδιακά ο ήχος “σβήνει”. Με άλλα λόγια, σε έναν κλειστό χώρο η στάθμη της πίεσης μετά το μηδενισμό της πηγής δε μηδενίζεται ακαριαία, αλλά λόγω των διαφορετικών ανακλάσεων στα τοιχώματα του χώρου φθίνει με το χρόνο. Στην περίπτωση που, αφού λειτουργήσει για αρκετό διάστημα η πηγή ήχου εντός του χώρου, το ακουστικό πεδίο είναι διάχυτο, με ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας και συνεπώς σταθερή στάθμη του ήχου μέσα στο χώρο, ο χώρος αυτός θεωρείται Θάλαμος Αντήχησης [15]. Οι θάλαμοι αντήχησης είναι κατά κύριο λόγο μεγάλων διαστάσεων και έχουν έντονα ανακλαστικά τοιχώματα. Πρακτικά, στόχος της σχεδίασής τους είναι η επικράτηση του αντηχητικού πεδίου σε σχέση με το απ’ ευθείας πεδίο της πηγής όσο γίνεται πιο κοντά στην πηγή.

1.4.2 Σωλήνας εμπέδησης (Impedance tube).

Ο σωλήνας στάσιμων κυμάτων (standing wave tube), αλλιώς σωλήνας εμπέδησης (Impedance Tube) ή σωλήνας Kundt (Kundt’s tube), είναι μία από τις παλαιότερες και πιο γνωστές διατάξεις για τη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της ειδικής ακουστικής εμπέδησης υλικών. Από ένα μεγάφωνο δημιουργείται διάδοση επίπεδου κύματος στον σωλήνα εμπέδησης που στην άλλη άκρη του έχει τοποθετηθεί το δείγμα του υπό μελέτη υλικού. Ένα στάσιμο κύμα δημιουργείται εντός του σωλήνα. Η ειδική ακουστική εμπέδηση του δείγματος μεταβάλλει τον τρόπο με τον οποίο ανακλάται ο ήχος και, μετρώντας το στάσιμο κύμα που προκύπτει, είναι δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης ανά συχνότητα και της επιφανειακής εμπέδησης του δείγματος [14],[15]. Εκτενής αναφορά θα γίνει στο Κεφάλαιο 3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ηχοαπορροφητικά υλικά και ιδιότητες

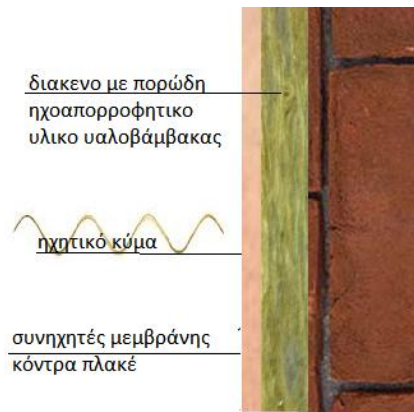
Στο κεφάλαιο αυτό θα μιλήσουμε για τα ηχοαπορροφητικά υλικά και εν συνεχεία θα εστιάσουμε στα πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά, κάποια εκ των οποίων λαμβάνουν μέρος στο πείραμα μας.

2.1 Ηχοαπορροφητικά υλικά και διατάξεις.

Γενικά, τα δομικά υλικά, οι επικαλύψεις τοιχωμάτων, ακόμα και τα επιχρίσματα μπορούν να επιτυγχάνουν ηχοαπορρόφηση, έστω και ελάχιστη. Η ανάγκη για μείωση του θορύβου σε βιομηχανικούς χώρους ή σε χώρους εργασίας και η κατάλληλη ακουστική σχεδίαση αιθουσών παραγωγής/αναπαραγωγής ήχου/φωνής, όπως π.χ. μέγαρα μουσικής, θεατρικές αίθουσες, αίθουσες διαλέξεων, πολυχώροι, στούντιο, κέντρα διασκέδασης κλπ. έχει ως προαπαιτούμενο να χρησιμοποιούνται ειδικά ηχοαπορροφητικά υλικά και διατάξεις ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακουστική συμπεριφορά. Τα οποία διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: συνηχητές μεμβράνης, συνηχητές Helmholtz και πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά.

2.1.1 Συνηχητές μεμβράνης.

Οι διατάξεις αυτές αποτελούνται από ύφασμα ή από λεπτά φύλλα υποπροϊόντων ξύλου, όπως κόντρα πλακέ ή μοριοσανίδες, λεπτά ξύλα, γυψοσανίδα ή λεπτά μεταλλικά φύλλα, τα οποία τοποθετούνται σε απόσταση από μια σταθερή άκαμπτη επιφάνεια ή από ένα συμπαγές υλικό. Όταν ο ήχος προσπίπτει στη μεμβράνη προκαλεί την ταλάντωση της, την οποία όμως αποσβένει τόσο η δομή του υλικού, όσο και η στερέωσή του (είναι συνήθως στερεωμένη σε κάποιο πλαίσιο), όσο και ο εγκλωβισμένος στο διάκενο αέρας, μέσω τριβών που αναπτύσσονται, με τελικό αποτέλεσμα τη μετατροπή της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα [17], [18].



Εικόνα 10: Συνηχητές μεμβράνης.

Η ηχοαπορρόφηση των συνηχητών μεμβράνης είναι μέγιστη στην συχνότητα συντονισμού f_r [Hz] που καθορίζεται από την επιφανειακή μάζα m του φύλλου της μεμβράνης και το πάχος του διάκενου L και δίνεται από τη Εξίσωση (22), η οποία ισχύει μόνο στην περίπτωση που στο διάκενο υπάρχει αέρας [13],[18].

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{mL}} \quad (22)$$

Όπου m η επιφανειακή πυκνότητα του φύλλου της μεμβράνης (kg/m^2), ρ η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3), L η απόσταση από το ακλόνητο στοιχείο (τοίχο) σε (m), c = η ταχύτητα του ήχου (m/s). Η εξίσωση (22) δεν ισχύει για ελαστικά υλικά, τα οποία επιτρέπουν τη διάδοση καμπτικών κυμάτων. Η συχνότητα συντονισμού για τα υλικά ορθογώνιας επιφάνειας, δίνεται από την Εξίσωση (23), [19].

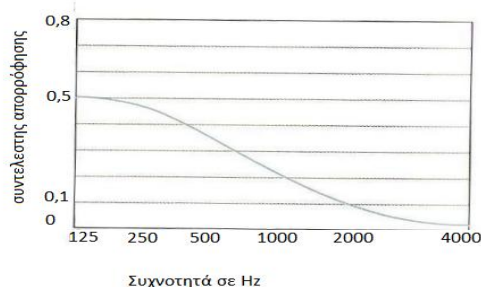
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{mL} + \frac{\pi^4}{m} \left[\left(\frac{g}{a} \right)^2 + \left(\frac{q}{b} \right)^2 \right] \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)}} \quad (23)$$

όπου, E το μέτρο του Young της μεμβράνης, a , b οι διαστάσεις της επιφάνειας, h το πάχος σ ο λόγος του Poisson και g , q ακέραιοι αριθμοί που προσδιορίζουν το σχήμα της επιφάνειας [19].

Οι συνηχητές μεμβράνης εμφανίζουν σημαντική ηχοαπορρόφηση στις χαμηλές συχνότητες. Για να διερευνηθεί η περιοχή συχνοτήτων όπου η ηχοαπορρόφηση είναι ικανοποιητική, προστίθεται συνήθως πορώδες ηχοαπορροφητικό υλικό στο διάκενο μεταξύ μεμβράνης και τοίχου, έτσι όμως το πλάτος του μεγίστου μειώνεται, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η επιφανειακή πυκνότητα m του υλικού της μεμβράνης τόσο μεγαλύτερη είναι και η ακαμψία

της, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η δυνατότητα ταλάντωσης της και έτσι μειώνεται η απορροφητική ικανότητα του συνηχητές μεμβράνης [17].

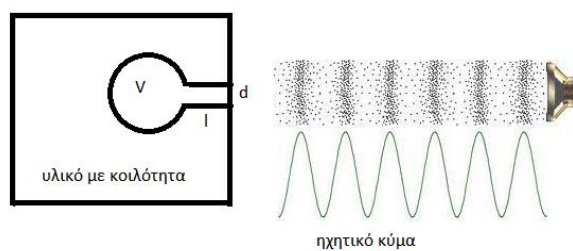
Χαρακτηριστική είναι η καμπύλη του συντελεστή απορρόφησης του συνηχητή μεμβράνης που απεικονίζεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Συντελεστής απορρόφησης για συνηχητές μεμβράνης σε σχέση με την συχνότητα Ηz [14].

2.1.2 Συνηχητές κοιλότητας Helmholtz.

Κοιλότητες μπορούμε να συναντήσουμε σε πλειάδα υλικών, τα χαρακτηριστικά των κοιλοτήτων αυτών είναι ο όγκος τους, V , το εμβαδόν του στομίου τους (εμβαδόν «λαιμού»), S , και το μήκος του λαιμού, l . Στην Εικόνα 12 βλέπουμε ένα τυπικό παράδειγμα υλικού με κοιλότητα με διατομή και μήκος λαιμού d και l , αντίστοιχα, και όγκου V .



Εικόνα 12: Συνηχητές κοιλότητας Helmholtz.

Όταν ήχος προσπίπτει στο στόμιο της κοιλότητας και εισέρχεται μέσα σε αυτή, διεγείρει τον αέρα που βρίσκεται μέσα της να ταλαντωθεί στη φυσική συχνότητα ταλάντωσης του συνηχητή, ενώ σαν αποτέλεσμα των τριβών υπάρχει απόσβεση του ήχου. Ο συντελεστής απορρόφησης ήχου α των δομών αυτών έχει μέγιστη απορρόφηση γύρω από τη συχνότητα συντονισμού της κοιλότητας f_0 που υπολογίζεται ως [13]:

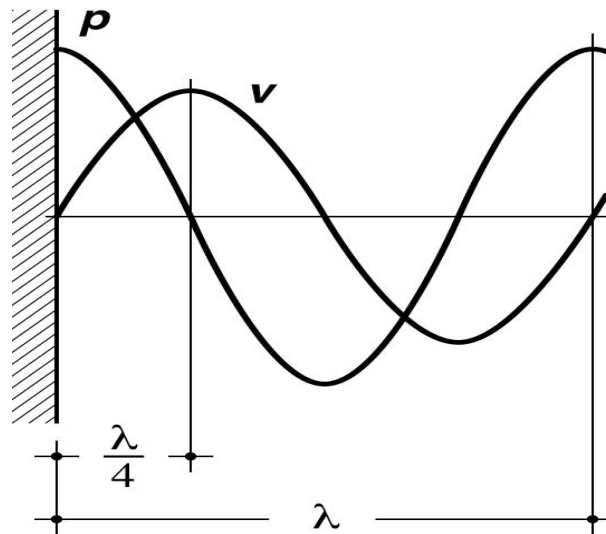
$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{d}{Vl}} \quad (24)$$

Από την Εξίσωση (24) συμπεραίνουμε ότι η συχνότητα μέγιστης ηχοαπορρόφησης μπορεί να ρυθμιστεί μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του συνηχητή κοιλότητας [13].

Οι συνηχητές κοιλότητας χρησιμοποιούνται για ηχοαπορρόφηση συγκεκριμένων συχνοτήτων λόγω του ότι η ηχοαπορροφητική τους ικανότητα περιορίζεται σε ένα μικρό εύρος συχνοτήτων γύρω από την συχνότητα συντονισμού [2], [18]. Η προσθήκη πορώδους ηχοαπορροφητικού εντός της κοιλότητας αυξάνει το εύρος ζώνης των συχνοτήτων όπου γίνεται ηχοαπορρόφηση αλλά μειώνει το μέγιστο της ηχοαπορρόφησης.

2.1.3 Πορώδη ηχοαπορροφητικά.

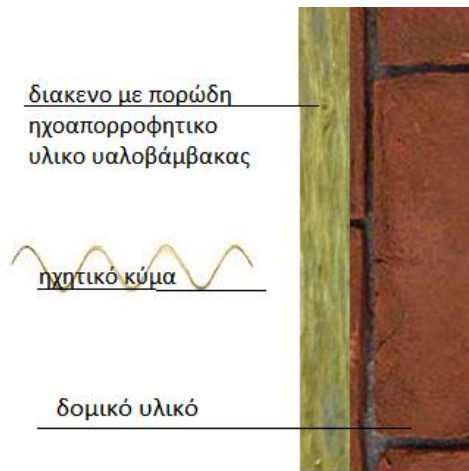
Πορώδη απορροφητικά θεωρούνται τα υλικά με πόρους κάθε είδους ή τα ινώδη υλικά, όπως υφάσματα, χαλιά, ορυκτοβάμβακας (πετροβάμβακας), υαλοβάμβακας, ακουστικός αφρός και άλλα. Τα υλικά αυτά συμβάλουν στη μείωση της ακουστικής ενέργειας όταν ηχητικά κύματα διέρχονται μέσα από αυτά. Όταν ακουστικά υλικά έχουν πορώδη δομή τότε μετατρέπουν την ηχητική ενέργεια σε θερμότητα. Αυτό συμβαίνει λόγω της τριβής μεταξύ των μορίων του μέσου όπου διαδίδονται τα ηχητικά κύματα (αέρα), όταν διέρχονται από τη δομή του υλικού και, των τοιχωμάτων της δομής των πόρων, μετατρέποντας την ηχητική ενέργεια σε θερμότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που διανύουν τα ηχητικά κύματα στην πορώδη δομή του ακουστικού υλικού, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της ηχητικής ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμότητα (απορροφάται). Για να είναι αποτελεσματική η απορρόφηση θα πρέπει να υπάρχει διασύνδεση των διαδρομών του αέρα μέσα στο υλικό, οπότε είναι απαραίτητη η δομή ανοιχτών πόρων. Για να λειτουργήσει ένα πορώδες υλικό ως καλός ηχοαπορροφητής και να επιφέρει σημαντική απορρόφηση θα πρέπει να τοποθετηθεί σε σημείο όπου η σωματιδιακή ταχύτητα του ηχητικού κύματος είναι υψηλή (ιδανικά μέγιστη) [20].



Εικόνα 13: Στάσιμο κύμα μπροστά σε τοίχο [21].

Όταν ένα επίπεδο ηχητικό κύμα προσπίπτει κάθετα σε έναν άκαμπτο τοίχο ο οποίος χαρακτηρίζεται ως ιδανικός ανακλαστήρας ($\alpha = 0$), τότε το κύμα ανακλάται πλήρως. Στο όριο μιας ακλόνητης επιφάνειας ο αέρας δεν μπορεί να κινηθεί και έτσι στο σημείο αυτό η σωματιδιακή ταχύτητα του κύματος είναι μηδέν. Η ηχητική πίεση που αναπτύσσεται σε αυτή τη θέση είναι η μέγιστη. Το πρώτο μέγιστο της σωματιδιακής ταχύτητας του κύματος βρίσκεται σε απόσταση ενός τετάρτου μήκους κύματος από τον τοίχο $\lambda/4$ (Εικόνα 13) [21].

Όταν πορώδεις απορροφητές τοποθετούνται σε μηδενική απόσταση από άκαμπτο τοίχο (Εικόνα 14) για να απορροφήσουν τα ηχητικά κύματα θα πρέπει να έχουν συγκεκριμένο πάχος, ώστε η ηχοαπορροφητική επίδρασή τους να κατεβαίνει έως συγκεκριμένη συχνότητα (μεγαλύτερο πάχος σημαίνει ότι το μέγιστο $\lambda/4$ που βρίσκεται εντός του υλικού αυξάνεται, οπότε η αντίστοιχη συχνότητα μειώνεται). Όταν ο απορροφητής τοποθετηθεί σε απόσταση από τον τοίχο, το πάχος του μπορεί να μειωθεί ανάλογα και πάλι να παρέχει ηχοαπορρόφηση σε χαμηλότερες συχνότητες [21].



Εικόνα 14: Εφαρμογή πορώδη απορροφητή ήχου.

Τα πορώδη υλικά κυρίως προσφέρουν ηχοαπορρόφηση υψηλών συχνοτήτων. Είναι επίσης ικανά να απορροφούν ήχους χαμηλότερης συχνότητας, αλλά έως ένα όριο όπου το πάχος του υλικού που απαιτείται για την απορρόφηση χαμηλών συχνοτήτων δεν είναι εφικτό.

Σε κάθε περίπτωση πάντως η ηχοαπορρόφηση από πορώδες/ινώδες υλικό είναι ένας συνδυασμός πολλών και σύνθετων χαρακτηριστικών του υλικού. Οι ηχοαπορροφητικές ιδιότητες των πορώδων υλικών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή των ινών, την τεχνολογία η οποία καθορίζει το πώς διατάσσονται οι ίνες, τη διαδικασία συγκόλλησης, καθώς και τον συνδετικό παράγοντα. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε βασικές παραμέτρους που καθορίζουν την συμπεριφορά του ήχου μέσα στα πορώδη απορροφητικά υλικά, οι οποίες τελικά διαμορφώνουν το συντελεστή ηχοαπορρόφησης [13].

2.1.3.1 Αντίσταση ροής σ (flow resistivity).

Η αντίσταση ροής σ [$\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$ ή Rayls] (Εξίσωση (25)) αντιπροσωπεύει τη δυσκολία του αέρα να διαπεράσει από τους πόρους των πορώδων υλικών και, δεδομένου ότι ο ήχος είναι η μηχανική ταλάντωση των σωματιδίων του αέρα, η αντίσταση ροής δίνει το μέτρο της δυσκολίας να διαδοθεί ο ήχος μέσα σε πορώδη υλικά [3], [13].

$$\sigma = \Delta p / u \quad (25)$$

Αν η ταχύτητα ροής δεν είναι μικρή, τότε παράγοντες μη γραμμικοί θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η αντίσταση ροής θα σταματήσει για ηχητική πίεση κυμάτων άνω των επιπέδων των 140 [dB].

Η αντίσταση ροής είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους οι οποίες καθορίζουν την ηχοαπορρόφηση των υλικών, είναι η παράμετρος η οποία ποικίλει μεταξύ παρόμοιων απορροφητικών υλικών και ως εκ τούτου καθορίζει την απορρόφηση τους [22].

Υπάρχουν αρκετές εμπειρικές και μη εξισώσεις στη βιβλιογραφία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της αντίστασης ροής.

2.1.3.2 Πορώδες ενός υλικού ε (porosity).

Όταν προσδιορίζουμε το πορώδες ενός υλικού (αραιότητα της ύλης ή της στερεάς δομής), οι κλειστοί πόροι δεν θα πρέπει να περιλαμβάνονται στον συνολικό όγκο των πόρων καθώς είναι σχετικά αδιαπέραστοι σε ηχητικά κύματα (οι κλειστοί πόροι βρίσκονται πιο συχνά στα αφρώδη υλικά, ακόμη και αυτά που έχουν σχεδιαστεί για να είναι ανοιχτής κυψέλης). Το πορώδες ενός υλικού είναι μια βασική παράμετρος. Ορίζουμε ως πορώδες, ε , το λόγο του όγκου που λαμβάνει μέρος στη διάδοση του ήχου προς το συνολικό όγκο του υλικού (Εξίσωση (26)). Το εύρος των τιμών του πορώδους είναι μεταξύ 0,7 – 0,99 για ένα ακουστικό υλικό (πορώδες μέσο) από το οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε τη ρευστή φάση (πόροι) και τη στερεά φάση (σκελετός) [3],[13].

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_t} \quad (26)$$

Στην Εξίσωση (26) V_t είναι ο συνολικός όγκος του υλικού και V_p ο όγκος του κενού χώρου (όγκος πόρων).

Για την μέτρησή του πορώδους, δυο από τις μεθόδους που την προσεγγίζουν χρησιμοποιούνται ευρέως. Η πρώτη είναι η βαρυμετρική μέθοδος (Gravimetric method). Για τον προσδιορισμό του όγκου των πόρων η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ικανότητα πλήρους πλήρωσης των πόρων του δείγματος με νερό [23].

Ο προσδιορισμός της «υγρής» πυκνότητας (wet density) γίνεται ως:

$$\rho_{wet} = \frac{m_{solid} + m_{porefluid}}{V_{total}} \quad (27)$$

Για την δεύτερη περίπτωση της «στεγνής» μεθόδου (Dry method) ο όγκος προσδιορίζεται με ζύγιση των δειγμάτων μετά από ξήρανση και διαίρεση της

μάζας με τη «στέγνη» πυκνότητα του δείγματος (Dry density), ενώ ο προσδιορισμός στεγνής πυκνότητας γίνεται ως [24]:

$$\rho_{dry} = \frac{m_{solid}}{V_{total}} \quad (28)$$

Ένα υλικό με καλή απορρόφηση τείνει να έχει και υψηλό πορώδες. Ο πετροβάμβακας θεωρείται από τα υλικά τα οποία που έχουν υψηλό πορώδες, κοντά στο 0,98.

Συνήθως όταν σχεδιάζουμε ένα ηχοαπορροφητικό υλικό οι παράμετροι του πορώδους και της αντίστασης ροής στοχεύουμε να είναι αντίθετες. Αν και το πορώδες είναι μείζονος σημασίας σε υλικά που χρησιμοποιούνται κατά κόρον, η τιμή του πορώδους δεν μεταβάλλεται έντονα από υλικό σε υλικό και είναι κοντά στη μονάδα 1 [13].

2.1.3.3 Σχήμα των πόρων, χαρακτηριστικά μήκη Λ και Λ' .

Δευτερεύον παράγοντας, αλλά εξίσου σημαντικός, είναι το σχήμα των πόρων, το οποίο επηρεάζει τη διάδοση του ήχου και ως εκ τούτου την απορρόφησή του από το πορώδες υλικό. Διαφορετικά σχήματα πόρων έχουν διαφορετικές επιφάνειες επομένως διαφορετικά θερμικά και ιξώδη αποτελέσματα.

Οι πόροι δεν συμμορφώνονται με απλά γεωμετρικά σχήματα, κατά συνέπεια τα σχήματα των πόρων εντοπίζονται συνήθως εμπειρικά μέσω αποτελεσμάτων από ακουστικές μετρήσεις, τόσο για την πυκνότητα όσο και για τον συντελεστή όγκου του υλικού. Οι παράγοντες που χαρακτηρίζουν το σχήμα των πόρων είναι τα λεγόμενα χαρακτηριστικά μήκη Λ και Λ' . Το χαρακτηριστικό μήκος Λ μπορεί να βρεθεί για απλά σχήματα πόρων ως [13]:

$$\Lambda = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{8\eta k_s}{\varepsilon \sigma}} \quad (29)$$

όπου s είναι μία σταθερά, k_s το ιξώδες του αέρα, και ε το πορώδες. Το s κυμαίνεται μεταξύ 0,3 και 3. Για κυκλικούς πόρους ισούται με 1, για τετράγωνους με 1,07 για τριγωνικούς 1,14 και για σχισμές 0.78. Στην περίπτωση που το σχήμα των πόρων είναι ακανόνιστο και η δομή τους πιο περίπλοκη το χαρακτηριστικό μήκος είναι το Λ' και υπολογίζεται από την Εξίσωση (30), όπου S_p και V_p είναι η επιφάνεια και ο όγκος των πόρων αντίστοιχα [13], [22]:

$$\Lambda' = 2 \frac{V_p}{S_p} \quad (30)$$

2.1.3.4 Ελικοειδές ενός υλικού (tortuosity).

Ο προσανατολισμός των πόρων σε σχέση με το προσπίπτον ηχητικό πεδίο είναι ένα επιπλέον χαρακτηριστικό το οποίο έχει επίδραση στη διάδοση ήχου εντός του πορώδους υλικού. Η παράμετρος που μετράει το ποσό «μπερδεμένα», περίπλοκα ή ελικοειδή είναι τα μονοπάτια των πόρων όπου μεταφέρεται ο αέρας μέσα στο ηχοαπορροφητικό υλικό ονομάζεται ελικοειδές (ελικοειδής δομή) του υλικού (tortuosity), συμβολίζεται με k_s και υπολογίζεται από την Εξίσωση (31) ή εναλλακτικά από την (32) [13],

$$k_s = 1/\sqrt{\varepsilon} \quad (31)$$

$$k_s = 1 + \frac{1-\varepsilon}{2\varepsilon} \quad (32)$$

Όσο πιο περίπλοκη είναι η διαδρομή διάδοσης μέσα στο υλικό, τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση (γιατί στο ίδιο βάθος υλικού αντιστοιχεί μεγαλύτερο μήκος αλληλεπίδρασης του ήχου με το υλικό). Επιπλέον, η ελικοειδής δομή επηρεάζει την ευκολία του ήχου να διεισδύει στο υλικό. Για απλούς κυλινδρικούς πόρους, όλοι ευθυγραμμισμένοι προς την ίδια κατεύθυνση, ο υπολογισμός του ελικοειδούς σχετίζεται με τη γωνία ϕ μεταξύ των πόρων και του προσπίπτοντος ήχου:

$$k_s = 1/\sigma \nu^2(\phi) \quad (33)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του υλικού (αντίσταση ροής, πορώδες, ελικοειδές και χαρακτηριστικά μήκη), είναι δυνατός ο υπολογισμός της ειδικής ακουστικής εμπέδησης και του κυματάριθμου διάδοσης. Για να υπολογίσουμε αυτούς τους παράγοντες θα πρέπει πρώτα να μας είναι γνωστοί οι εξής παράγοντες: η ενεργός πυκνότητα του πορώδους ρ_e και ο ενεργός συντελεστής όγκου K_e . Η ενεργός πυκνότητα του πορώδους ρ_e (e: effective) υλικού υπολογίζεται ως [13]:

$$\rho_e = k_s \rho_0 \left[1 + \frac{\sigma \varepsilon}{j \omega \rho_0 k_s} \sqrt{1 + \frac{4 j k_s^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \varepsilon^2}} \right] \quad (34)$$

Ο ενεργός συντελεστής όγκου K_e (e: effective) μετράει την αντίσταση του υλικού σε μια ενιαία ομοιόμορφη συμπίεση και υπολογίζεται ως [13]:

$$K_e = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 + \frac{8\eta}{j\Lambda'^2 N_p \omega \rho \sqrt{1 + \frac{j\rho\omega N_p \Lambda'^2}{16\eta}}} \right]} \quad (35)$$

Όπου γ είναι ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων (≈ 1.4), P_0 είναι η ατμοσφαιρική πίεση $\approx 101,320$ [Nm⁻²] and N_p είναι ο αριθμός Prandtl, ο οποίος υπολογίζεται ως [13]:

$$N_p = \left(\frac{\delta_v}{\delta_h} \right)^2 \quad (36)$$

όπου δ_v και δ_h είναι το μέγεθος από τα ιξώδη και θερμικά οριακά στρώματα αντίστοιχα, τα οποία υπολογίζονται ως [3],[13]:

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}} \quad (37)$$

και

$$\delta_h = \sqrt{\frac{2\kappa}{\rho c_p \omega}} \quad (38)$$

Στις πιο πάνω εξισώσεις, k_s είναι το ελικοειδές του υλικού, η το ιξώδες του αέρα, ω η γωνιακή συχνότητα, ρ η πυκνότητα του αέρα, $\kappa \approx 2.41 \times 10^{-2}$ [WmK⁻¹] είναι η θερμική αγωγιμότητα του αέρα και $c_p \approx 1.01$ [Jkg⁻¹K⁻¹] είναι η ειδική θερμότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση, Λ' μήκος για περίπλοκα σχήματα πόρων και Λ μήκος για απλά σχήματα πόρων [13].

Η ειδική ακουστική εμπέδηση z_c δίνεται από την Εξίσωση (14) και ο κυματάριθος διάδοσης k_c υπολογίζεται από την Εξίσωση (15) (Κεφάλαιο 1, Παράγραφος 1.3).

Οι παραπάνω παράμετροι των πορωδών ηχοαπορροφητικών υλικών συντελούν ώστε το κάθε υλικό να έχει τις δικές του ιδιότητες και διαφορετικό συντελεστή απορρόφησης.

Υλικά όπως ο πετροβάμβακας (mineral wool/rock wool), ο υαλοβάμβακας, ο αφρός ανοιχτής κυψέλης (open cell foam), χαλιά, κουρτίνες κλπ. θεωρούνται ευρέως πορώδη υλικά. Πορώδες υλικό μπορεί να θεωρηθεί και το έδαφος.

2.1.4 Πετροβάμβακας (mineral/rock wool).

Ο πετροβάμβακας (Εικόνα 15) είναι πορώδες υλικό που παρουσιάζει μεγάλη απορρόφηση, είναι φτιαγμένος από άμμο, πέτρα βασαλτικής και ανακυκλωμένο γυαλί. Οι πρώτες ύλες λειώνονται σε υψηλή θερμοκρασία και τοποθετούνται μέσα σε νημάτια. Τα νημάτια συνδέονται μεταξύ τους για να δώσουν στο προϊόν ένα φυσικό σχήμα, περίπου το 1–5 % του βάρους του τελικού προϊόντος θεωρείται ότι αναλογεί στο συνδετικό υλικό [13].

Ο πετροβάμβακας ή αλλιώς ορυκτοβάμβακας είναι ένα οικονομικό υλικό, εύκολο να κατασκευαστεί και μπορεί μερικώς να ανακυκλωθεί, μπορεί να έχει τη μορφή ημιάκαμπτων σανίδων όπως στην Εικόνα 15 ή ενός ελαφρού καλύμματος.

Η ακουστική απόδοση του πετροβάμβακα εξαρτάται από την πυκνότητα του και βέβαια το πάχος του (όπως συμβαίνει για όλα τα πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά). Μικρή πυκνότητα σημαίνει μικρή απορρόφηση στις υψηλές συχνότητες. Βέβαια η πυκνότητα δεν είναι το μόνο στοιχείο που μπορεί να επηρεάσει την ακουστική απόδοση του, η διάμετρος της ίνας και η σύσταση της είναι σημαντικά χαρακτηριστικά για την αύξηση της ηχοαπορρόφησης [13].



Εικόνα 15: Πάνελ πετροβάμβακα [26].

2.1.5 Υαλοβάμβακας (glass wool).

Ο υαλοβάμβακας (Εικόνα 16) αποτελείται από λεπτές ίνες γυαλιού και χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικό ή ενισχυτικό σε συνθετικά προϊόντα, όπως τα «πολυμερή ενισχυμένα με ίνες» (fiber-reinforced polymers FRP) ή τα «πλαστικά ενισχυμένα με γυαλί» (glass-reinforced plastic GRP). Οι ίνες γυαλιού

και η παρασκευή υαλοβάμβακα έγινε εφικτή όταν ειδικά εργαλεία έκαναν την εμφάνισή τους [27].

Οι ίνες του υαλοβάμβακα διαμορφώνονται όταν λεπτές λωρίδες πυριτικού (ή άλλης σύστασης) γυαλιού που εξωθούνται παράγοντας πολλές ίνες με μικρή διάμετρο. Το γυαλί, ακόμη και ως ίνα, είναι άμορφο στερεό (χωρίς κρυσταλλική δομή) [27].

Η ακουστική απορρόφηση που επιτυγχάνεται καθορίζεται από την σύνθεση της ίνας τον προσανατολισμό της και τις διαστάσεις της, από την πυκνότητα και από την ποσότητα των συστατικών της, όπως επίσης και την φύση του συνδετικού υλικού που χρησιμοποιείται [27].



Εικόνα 16: Ρολό υαλοβάμβακα [28].

2.1.6 Πολυεστερική ίνα.

Ο πολυεστέρας είναι μια συνθετική ίνα. Οι ίνες πολυεστέρα σχηματίζονται από χημική αντίδραση μεταξύ οξέος και αλκοόλης. Στην αντίδραση αυτή, δύο ή περισσότερα μόρια συνδυάζονται για να δημιουργήσουν ένα μεγάλο μόριο, του οποίου η δομή επαναλαμβάνεται καθ' όλο το μήκος του. Οι ίνες πολυεστέρα μπορούν να σχηματίσουν σε πολύ μεγάλο βαθμό μόρια ιονισμού, τα οποία είναι πολύ σταθερά και ισχυρά [29].

Οι πολυεστερικές ίνες είναι ελαστικές, υδρόφοβες και δύσκαμπτες. Οι πολυεστερικές ίνες είναι οι κύριες συνθετικές ίνες που χρησιμοποιούνται στον τομέα της βιομηχανικής κατασκευής και μπορούν να βρεθούν σε διάφορους τομείς εφαρμογής. Χρησιμοποιούνται σε μίγματα με βαμβάκι και μαλλί συνήθως για την παραγωγή υφασμάτων και ρουχισμού. Οι ιδιότητες του πολυεστέρα είναι μεταξύ άλλων καλή αντοχή και ανοχή στην τριβή και ελαστικότητα, που σημαίνει ότι μπορεί να ανακάμψει ύστερα από καταπόνηση, διώχνει την υγρασία και στεγνώνει γρήγορα. Χρησιμοποιούνται επίσης ως ίνες πλήρωσης, μόνωσης, στην οικιακή επίπλωση, οι χρήσεις τους κυμαίνονται από υφάσματα ,κουρτίνες μέχρι καλύμματα επίπλων, μαξιλάρια ή γέμιση μαξιλαριών κ.α. [29].

Η πολυεστερική ίνα είναι ανθεκτική στη θερμότητα, στα ανόργανα οξέα, τα ήπια αλκάλια, τα οξειδωτικά, την υπεριώδη ακτινοβολία, γεγονός που συνετέλεσε στη ραγδαία αύξηση της παραγωγής και χρήσης της. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα είναι από τους βασικούς λόγους για τους οποίους η πολυεστερική ίνα χρησιμοποιείται επίσης ευρέως για την παραγωγή πάνελ (Εικόνα 17) με κύρια χαρακτηριστικά την ηχοαπορρόφηση και τη θερμομόνωση [30].



Εικόνα 17: Ρολό Πολυεστερικής ίνας [31].

Η σύνθεση των πολυεστέρων επιτυγχάνεται γενικά με αντίδραση πολυσυμπύκνωσης [31],[32]. Η γενική χημική εξίσωση παραγωγής της είναι:



2.1.7 Αερογέλη (Aerogels).

Η γέλη αέρα ή αλλιώς αερογέλη (Εικόνα 18) είναι πορώδες στέρεο υλικό που δημιουργείται από μια γέλη η οποία έχει την ιδιότητα να αντικαθιστά το υγρό με αέριο. Έχει υψηλό ποσοστό πόρων, σχεδόν το 95% της μάζας της, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται κυρίως ως ηχοαπορροφητικό. Δυστυχώς, η ελαφριά αερογέλη είναι εύθραυστη, τα πιο πυκνά δείγματα αυτής είναι λιγότερο κατάλληλα ως ηχοαπορροφητικά επειδή δεν έχουν κατάλληλη αντίσταση ροής (flow resistivity) [13],[33].



Εικόνα 18: Αεροζέλ Silica σε μορφή μπλοκ [34].

2.1.8 Μη υφαντά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα (*nonwoven textiles*).

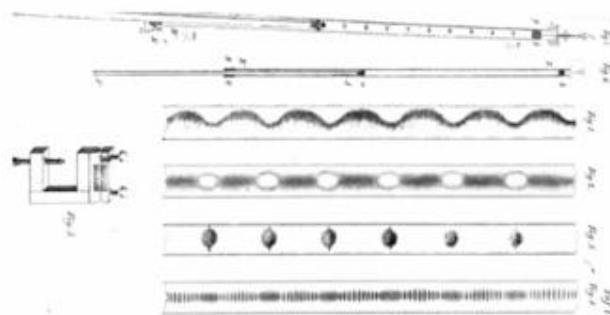
Τα μη υφαντά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα (*nonwoven textiles*) (Εικόνα 19) αποτελούν επίσης πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά. Ένα μη υφαντό κλωστοϋφαντουργικό προϊόν κατασκευάζεται απευθείας από ίνες, όπου μέθοδοι μηχανικών, θερμικών και χημικών κολλήσεων χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του. Οι ίνες εντός τους είναι παράλληλες, σταυρωτές ή τυχαία πλεγμένες μεταξύ τους και συνδέονται με εφαρμογή κόλλας ή θερμοπλαστικών ινών υπό εφαρμογή θερμότητας και πίεσης. Οι ηχοαπορροφητικές ιδιότητες των μη υφαντών κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή των ινών, την τεχνολογία την οποία καθορίζει το πώς πρέπει να διατάσσονται οι ίνες, την διαδικασία συγκόλλησης καθώς και τον συνδετικό παράγοντα [25],[31],[32].



Εικόνα 19: Μη υφαντά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα [32].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Σωλήνας εμπέδησης (impedance tube)

Ο σωλήνας Kundt (Εικόνα 20) είναι ένα πειραματικός ακουστικός εξοπλισμός που εφευρέθηκε το 1866 από τον Γερμανό φυσικό August Kundt για τις ανάγκες των μετρήσεων σχετικά με την ταχύτητα του ήχου σε αέρια ή σε ράβδο. Στις μέρες μας, χρησιμοποιείται για να δείξει στάσιμα κύματα και ακουστικές δυνάμεις [33]. Ο σωλήνας εμπέδησης είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός για τον προσδιορισμό του συντελεστή απορρόφησης ήχου, α , πορώδων υλικών. Είναι μια μέθοδος αρκετά χρήσιμη μιας και οι επιθυμητές μετρήσεις γίνονται σε περιβάλλον που θεωρείται ότι μπορεί να είναι ελεγχόμενο και οι συνθήκες καλά ορισμένες. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι ο εξοπλισμός για τις συγκεκριμένες μετρήσεις είναι απλός και δεν χρειάζονται ειδικοί θάλαμοι, πάρα μόνο ένα απλός χώρος. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι τα αποτελέσματα εξάγονται από ένα μικρό δείγμα υλικού, ίσο με την διάμετρο του σωλήνα, το οποίο δεν είναι πάντα αντιπροσωπευτικό για το ίδιο το υλικό σε μεγάλες διαστάσεις, λόγω της ιδιαιτερότητας αυτής και βάσει των αποτελεσμάτων που έχουν εξαχθεί από πλειάδα μετρήσεων μέσω του σωλήνα εμπέδησης. Μετρήσεις με τον εξοπλισμό των σωλήνων Kundt γίνονται για κυρίως πορώδη απορροφητικά υλικά [33].



Εικόνα 20: Σχήματα σωλήνων Kundt του 1866 από τον αρχικό εξοπλισμό [34].

Ο σημερινός τρόπος λειτουργίας του σωλήνα Kundt χρησιμοποιεί ένα μεγάφωνο, δημιουργείται διάδοση επίπεδου κύματος στο σωλήνα εμπέδησης (impedance tube), το επίπεδο κύμα διαδίδεται μέσα σε αυτόν και, αφού ανακλαστεί από την επιφάνεια πρόσκρουσης- δείγμα (υπό εξέταση υλικό), ένα στάσιμο κύμα δημιουργείται εντός του σωλήνα. Η ειδική ακουστική εμπέδηση του δείγματος μεταβάλλει τον τρόπο με τον οποίο ανακλάται ο ήχος και έτσι, μετρώντας το προκύπτον στάσιμο κύμα, είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο συντελεστής απορρόφησης ήχου, α , καθώς και η ακουστική εμπέδηση

επιφάνειας του δείγματος. Αυτή η τεχνική έχει κατοχυρωθεί με το διεθνές πρότυπα ISO 10534-2 [13].

Η αναγκαιότητα διάδοσης επίπεδων κυμάτων μέσα σε στέρεο σωλήνα επιβάλλει πολλούς περιορισμούς:

1. Οι απώλειες μέσα στο σωλήνα θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν ώστε η διάδοση των στάσιμων κυμάτων να μην έχει σημαντική εξασθένηση. Γνωρίζουμε ότι κατασκευαστικά το σημαντικού πάχους μέταλλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δομικό υλικό και για έλεγχο του θορύβου στις μεσαίες και τις υψηλές συχνότητες. Για σωλήνες εμπέδησης που πρόκειται να λειτουργήσουν στις χαμηλές συχνότητες, απαιτείται ειδική κατασκευή για να αποφευχθούν σημαντικές απώλειες. Για παράδειγμα, κατάλληλοι είναι αλουμινένιοι σωλήνες με παχύ τοίχωμα ή ατσάλινοι σωλήνες. Σε οποιοδήποτε μέγεθος, θα πρέπει ο σωλήνας να είναι λείος στο εσωτερικό του και καθαρός για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες [13].
2. Ο σωλήνας πρέπει να έχει σταθερή διατομή στην περιοχή μέτρησης, όπου περιλαμβάνονται οι θέσεις που τοποθετείται το δείγμα και το μικρόφωνο. Αν και το σχήμα του δεν έχει ιδιαίτερη σημασία, προτιμώνται οι κυκλικοί σωλήνες μιας και φαίνεται να είναι λιγότερο επιρρεπείς σε προβλήματα όπου τα τοιχώματα των πορωδών απορροφητικών υλικών τέμνονται, συναντώνται (cross mode). Οι τετράγωνοι σωλήνες θεωρούνται εξίσου χρήσιμοι λόγω του ότι η δημιουργία τετράγωνων υπό εξέταση δειγμάτων είναι πιο εύκολη [13].
3. Το μεγάφωνο θα πρέπει να απέχει από το πρώτο μικρόφωνο απόσταση λίγο μεγαλύτερη από μερικές διαμέτρους του σωλήνα, έτσι ώστε σε περίπτωση που υπάρχουν cross modes από το μεγάφωνο, να έχουν χρόνο να αποσβεστούν. Μερικές φορές είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί απορροφητικό υλικό στο σωλήνα, στην πλευρά του μεγάφωνου, ώστε να μειωθεί η αντήχηση μέσα στο σωλήνα [13].
4. Η θέση του μικροφώνου δεν θα πρέπει να είναι πολύ κοντά στο υπό εξέταση δείγμα έτσι ώστε τυχόν αποσβενώμενα κύματα από ανάκλαση να έχουν χρόνο να σβήσουν. Για ένα ομοιογενές, ιστροπικό δείγμα, αυτό σημαίνει ότι το πρώτο μικρόφωνο μέτρησης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον μισή διάμετρο (ή πλάτος) του σωλήνα μακριά από το δείγμα. Για δείγματα που είναι δομημένα και ανισοτροπικά, η επιφάνεια του δείγματός δεν θα πρέπει να είναι κοντά στα μικρόφωνα, η απόσταση θα πρέπει να είναι 2 διαμέτρους μακριά από το δείγμα [13].

Στο Πίνακα 1 που ακολουθεί βλέπουμε τους τύπους των δειγμάτων και το διάστημα μεταξύ αυτών και των μικροφώνων.

Πίνακας 1: Τύπος δειγμάτων και διάστημα δείγματός από το μικρόφωνων [13].

Τύπος δείγματος	Διάστημα δείγματός - μικροφώνου
Μη δομημένο	½ διάμετρος ή ½ μέγιστη πλευρική διάσταση
Ήμιπλευρική δομή	1 διάμετρος ή 1 μέγιστη πλευρική διάσταση
Έντονα ασύμμετρο	2 διαμέτρους ή 2 φορές τη μέγιστη πλευρική διάσταση

5. Η μεγαλύτερη συχνότητα f_u (upper) η οποία μπορεί να μετρηθεί στο σωλήνα καθορίζεται από την Εξίσωση (40):

$$f_u = \frac{c}{2d} \quad (40)$$

όπου d η διάμετρος του σωλήνα και c η ταχύτητα του ήχου. Για να ισχύει αυτή η εξίσωση δεν θα πρέπει να υπάρχουν διασταυρώσεις στο σωλήνα, το πρώτο mode εμφανίζεται όταν $\lambda/2$ ταιριάζει σε όλο το σωλήνα. Αυτό ισοδύναμα σημαίνει ότι η διάμετρος του σωλήνα θα πρέπει να είναι μικρότερη από $\lambda/2$. Επίσης, το μήκος του σωλήνα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από $3\lambda/4$.

Αυτό σημαίνει ότι για να καλυφτεί ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων θα πρέπει να υπάρξουν διαφορετικοί σωλήνες με διαφορετικές διαμέτρους [13].

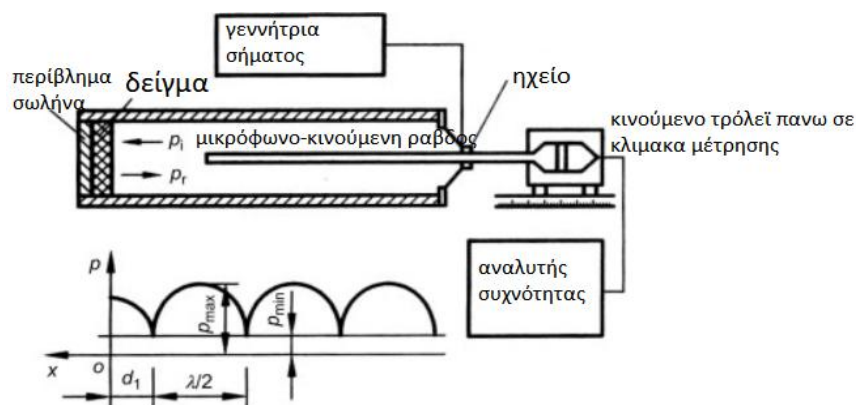
Το πρόβλημα αυτό το ξεπερνάμε χρησιμοποιώντας πολλαπλά μικρόφωνα σε διαφορετικές θέσεις του σωλήνα ώστε να μπορούμε να μετρήσουμε υψηλότερες συχνότητες. Το πεδίο του ήχου μέσα στο σωλήνα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένα άθροισμα του επιπέδου κύματος και των υψηλότερων τρόπων λειτουργίας [13].

3.1 Προσδιορισμός του συντελεστή α .

Ο προσδιορισμός του συντελεστή α γίνεται κυρίως μέσω δύο μεθόδων, της μεθόδου στάσιμου κύματος (Standing wave method) και της μεθόδου συνάρτησης μεταφοράς (Transfer function method). Στις μέρες μας η μέθοδος που πλέον κυριαρχεί είναι η μέθοδος συνάρτησης μεταφοράς αν και υπάρχουν και άλλες μέθοδοι που κερδίζουν έδαφος τα τελευταία χρόνια [13].

3.1.1 Μέθοδος στάσιμου κύματος (Standing wave method).

Η μέτρηση του συντελεστή απορρόφησης ήχου α με την μέθοδο στάσιμου κύματος ακολουθεί την διάταξη της Εικόνας 21, και αποτελείται από έναν άκαμπτο κυκλικής ή τετράγωνης διατομής σωλήνα με λεία εσωτερική επιφάνεια, ένα ηχείο που τοποθετείται στο ένα άκρο του σωλήνα, ενώ το δείγμα βρίσκεται στο άλλο άκρο του. Για τη μέτρηση της ηχητικής πίεσης χρησιμοποιείται μικρόφωνο το οποίο είναι συνδεδεμένο σε κινούμενο σωλήνα - ράβδο, για τη λήψη της κατανομής της ηχητικής πίεσης. Το μικρόφωνο μπορεί να κινηθεί σε συγχρονισμό με ολόκληρη τη ράβδο για να μετρήσει τις ηχητικές πιέσεις σε διαφορετικές θέσεις στο σωλήνα [13],[39].



Εικόνα 21: Σωλήνας Kundt για μέτρηση συντελεστή α και ειδικής ακουστικής εμπέδησης με τη μέθοδο στάσιμου κύματος [39].

Η γεννήτρια σήματος ακουστικών συχνοτήτων στέλνει ηλεκτρικό σήμα στο ηχείο, το οποίο το μετατρέπει σε ηχητικό κύμα. Υποθέτουμε ότι επικρατούν συνθήκες διάδοσης επίπεδων κυμάτων μέσα στο σωλήνα και το δείγμα είναι τοποθετημένο στη θέση $x = 0$ πριν από άκαμπτο τοίχωμα του σωλήνα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 21. Η συνολική προκύπτουσα πίεση μετά την υπέρθεση των δύο κυμάτων που ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις δίνεται από την Εξίσωση ως [12]:

$$p = A(e^{jkx} + R e^{-jkx}) \quad (41)$$

όπου R , είναι ο συντελεστής ανάκλασης πίεσης (Εξίσωση (20)) και A είναι μιγαδική σταθερά. Ο πρώτος όρος της Εξίσωσης (41) αντιστοιχεί στο προσπίπτον, ενώ ο δεύτερος στο ανακλώμενο κύμα [12].

Το μικρόφωνο πάνω στη κινούμενη ράβδο μπορεί να ανιχνεύσει τη μέγιστη ηχητική πίεση p_{max} του κύματος και την ελάχιστη ηχητική πίεση p_{min} [12], [13], [39]. Η βασική αρχή αυτής της μεθόδου είναι η μέτρηση μεγίστων και ελαχίστων της ακουστικής πίεσης με ένα απλό μικρόφωνο. Εφόσον, λόγω της απορρόφησης, το πλάτος της ανακλώμενης ηχητικής πίεσης p_r είναι μικρότερο από αυτό που προσπίπτει p_i , η ελάχιστη συνισταμένη πίεση θα είναι $p_{min} = |p_i| - |p_r|$, ενώ στα σημεία που αντιστοιχεί το μέγιστο θα είναι $p_{max} = |p_i| + |p_r|$. Η μέγιστη πίεση p_{max} εμφανίζεται όταν οι δυο όροι της Εξίσωσης

(42) είναι σε φάση, ενώ η ελάχιστη πίεση p_{min} εμφανίζεται όταν είναι εκτός φάσης. Μιας και το πλάτος του ανακλώμενου κύματος είναι μικρότερο από του προσπίπτοντος, ο λόγος στάσιμου κύματος, s , (standing wave ratio) ορίζεται ως:

$$s = \frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{|p_i| + |p_r|}{|p_i| - |p_r|} = \frac{1 + |R|}{1 - |R|} \quad (42)$$

Μετακινώντας το μικρόφωνο, μπορούμε να βρούμε τις θέσεις όπου υπάρχουν τα μέγιστα και τα ελάχιστα της ακουστικής πίεσης και να εξάγουμε το λόγο s . Τέλος, από την Εξίσωση (42), αναδιατάσσοντας τους όρους, ο συντελεστής ανάκλασης για μία συγκεκριμένη συχνότητα προκύπτει ως [12], [13],[15]:

$$|R| = \frac{s-1}{s+1} \quad (43)$$

από τον οποίο συντελεστής απορρόφησης, α , υπολογίζεται με βάση την Εξίσωση (21).

Η διατομή του σωλήνα πρέπει να είναι μικρότερη από το μήκος κύματος του ήχου για να σχηματιστούν επίπεδα κύματα στο σωλήνα. Το μήκος του σωλήνα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μισό του μήκους κύματος για να σχηματιστεί κοιλία κύματος και δεσμός για ένα στάσιμο κύμα (δηλαδή η εμφάνιση τουλάχιστον μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης ηχητικής πίεσης). Επομένως, τα άνω και κάτω όρια των μετρήσιμων συχνοτήτων για τον σωλήνα στάσιμου κύματος υπολογίζονται, αντίστοιχα, ως:

$$f_{max} = 0.6 \cdot c / D \quad (44)$$

$$f_{min} = 0.5 \cdot c / L \quad (45)$$

Όπου c είναι η ταχύτητα μετάδοσης του ηχητικού κύματος στον σωλήνα (η ταχύτητα του ήχου στον αέρα), D είναι η διάμετρος του άκαμπτου σωλήνα και L είναι το μήκος του σωλήνα. Η ταχύτητα του ήχου στον αέρα μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη Εξίσωση (46), όπου T [K] είναι η απόλυτη θερμοκρασία στο σωλήνα ($T = 273 + \Theta$, με Θ τη θερμοκρασία σε °C) [39]:

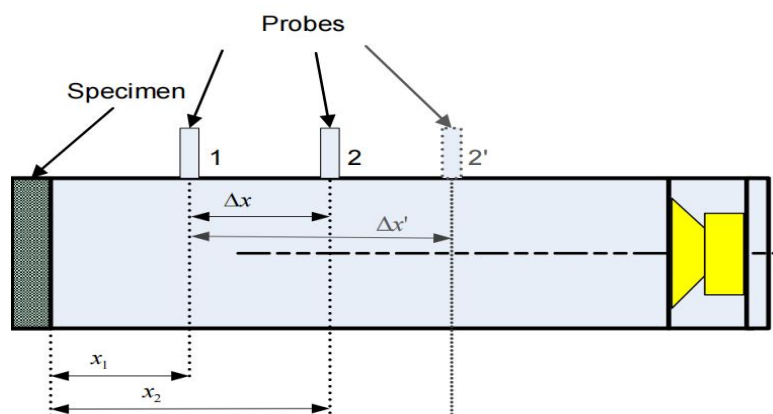
$$c = 343.2 \sqrt{\frac{T}{293.5}} \approx 20.033 \sqrt{T} \quad (46)$$

Με αυτή τη μέθοδο μπορούμε κάνουμε την μέτρηση μόνο για μια συχνότητα την φορά.

Επίσης, αν στο σωλήνα αναπτυχθούν πάνω από ένα ελάχιστα, είναι δυνατό να μετρηθεί και η φάση του συντελεστή ανάκλασης και στη συνέχεια να υπολογιστεί η ακουστική εμπέδηση επιφάνειας κάθετης πρόσπτωσης.

3.1.2 Μέθοδος συνάρτησης μεταφοράς (The transfer function method).

Η μέθοδος συνάρτησης μεταφοράς διεξάγεται επίσης σε σωλήνες Kundt όπως και των στάσιμων κυμάτων, όπου το συρόμενο μικρόφωνο αντικαθίσταται από δύο μικρόφωνα τοποθετημένα στα τοιχώματα του σωλήνα όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 22. Στο ένα άκρο του σωλήνα υπάρχει ένα ηχείο και στο άλλο άκρο του σωλήνα τοποθετείται το εξεταζόμενο απορροφητικό υλικό· η πηγή ήχου δημιουργεί επίπεδα κύματα στο σωλήνα. Δυο μικρόφωνα μετρούν την ηχητική πίεση μέσα στο σωλήνα σε δύο θέσεις και υπολογίζουν την συνάρτηση μεταφοράς της ακουστικής πίεσης μεταξύ των θέσεων αυτών [12], [13].



Εικόνα 22: Σωλήνας Kundt για μέτρηση συντελεστή α με την μέθοδο συνάρτησης μεταφοράς -transfer function method [12].

Μέσα στο σωλήνα, σε κάθε θέση x , η συνολική ακουστική πίεση $p(x)$ σε οποιοδήποτε σημείο αντιστοιχεί στην υπέρθεση αυτής του προσπίπτοντος κύματος $p_I(x)$ και της ακουστικής πίεσης $p_R(x)$ του κύματος που ανακλάται από το δείγμα. Η συνολική ηχητική πίεση $p(x)$ σε οποιοδήποτε σημείο x του σωλήνα συνεπώς δίνεται ως [13],[40]:

$$p(x) = p_I(x) + p_R(x) \quad (47)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς H_{21} της ακουστικής πίεσης μεταξύ των θέσεων x_1 και x_2 (Εικόνα (22)) υπολογίζεται ως [12], [13], [40]:

$$H_{21} = \frac{p(x_2)}{p(x_1)} = \frac{e^{jkx_2} + \text{Re}^{-jkx_2}}{e^{jkx_1} + \text{Re}^{-jkx_1}} \quad (48)$$

Λύνοντας την Εξίσωση (48) ως προς το συντελεστή ανάκλασης έχουμε [12], [13], [40]:

$$R = \frac{H_{21}e^{jkx_1} - e^{jkx_2}}{e^{-jkx_2} - H_{21}e^{-jkx_1}} = \frac{H_{21} - H_L}{H_R - H_{21}} e^{j2kx_1} \quad (49)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς πρόσπτωσης και η συνάρτηση μεταφοράς ανάκλασης δίνονται αντιστοιχία από τις Εξισώσεις (50), (51) και έχοντας γνωστά τα παραπάνω μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής απορρόφησης ήχου από την Εξίσωση (21) [12], [13],[40].

$$H_L = e^{jk\Delta x} \quad (50)$$

$$H_R = e^{-jk\Delta x} \quad (51)$$

όπου $k = \omega/c$ το μήκος κύματος, $\omega = \text{γωνιακή συχνότητα}$, c η ταχύτητα του ήχου, $\Delta x = x_2 - x_1$ η απόσταση μεταξύ των μικροφώνων και $j = \sqrt{-1}$ [12],[13],[40].

$$z_n = \rho c \frac{1 + R}{1 - R} \quad (52)$$

Η Εξίσωση (52) μας δίνει τη σχέση για τον υπολογισμό ακουστική εμπέδηση επιφάνειας κάθετης πρόσπτωσης Z_n , όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες και το γινόμενο (ρc) αντιπροσωπεύει την χαρακτηριστική εμπέδηση [12].

Στη μέθοδο συνάρτησης μεταφοράς τα 2 μικρόφωνα πρέπει να τοποθετούνται πολύ προσεκτικά, διότι τόσο η πολύ κοντινή, όσο και η πολύ μακρινή απόσταση μεταξύ τους μπορεί να οδηγήσει σε μη-ακριβείς μετρήσεις. Εάν είναι πολύ κοντά το ένα στο άλλο, η διαφορά πίεσης μπορεί να είναι πολύ μικρή για να μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια και αυτό οδηγεί στον καθορισμό ενός κάτω ορίου συχνότητας $f_l > c_o/20\Delta x$. Από την άλλη, αν η απόσταση μεταξύ τους είναι πολύ μεγάλη, υπάρχει η πιθανότητα να καταγράφουν σχεδόν ταυτόσημες τιμές πίεσης καθώς $\Delta x \rightarrow \lambda$. Έτσι ένα άνω όριο συχνότητας τίθεται $f_h < 0.45c_o/\Delta x$. Αυτά τα όρια συχνότητας συνήθως ξεπερνιούνται χρησιμοποιώντας πάνω από 2 μικρόφωνα για την κάλυψη της συχνοτικής

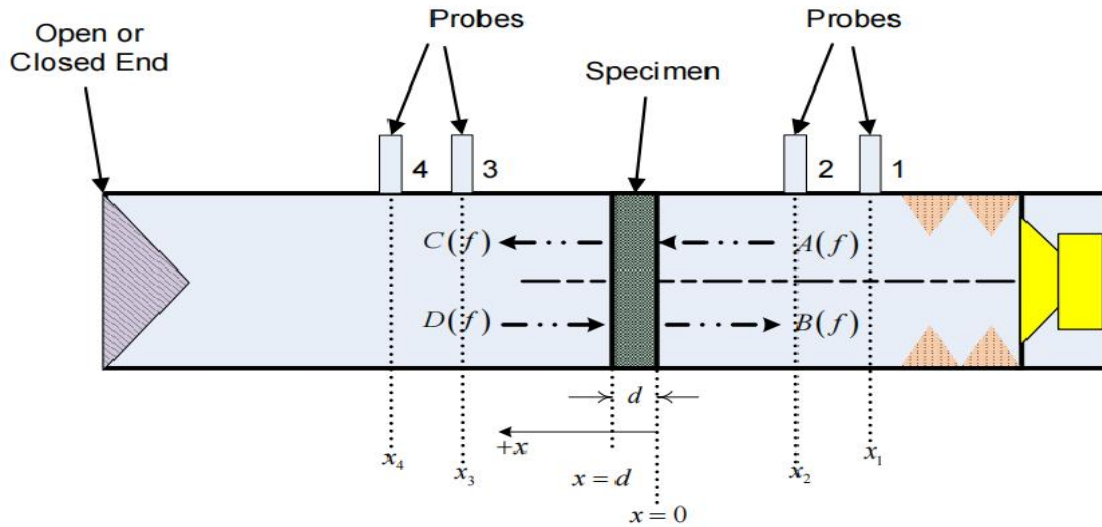
περιοχής ενδιαφέροντος. Η χρήση 3 μικροφώνων με κατάλληλες αποστάσεις μεταξύ τους είναι τυπική (Εικόνα 22) [12].

Η πηγή ήχου μπορεί να αναπαράγει είτε λευκό θόρυβο είτε κάποιο ντετερμινιστικό σήμα όπως maximum length sequences (MLS) ή log chirp (logarithmically swept sine) [12].

Με βάση τα σημερινά δεδομένα η μέθοδος της συνάρτησης μεταφοράς είναι πιο εύχρηστη και προηγμένη σε σύγκριση με τη μέθοδο στάσιμων κυμάτων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μετρήσεων που επιτυγχάνονται με τη μέθοδο αυτή, τόσο για την ειδική ακουστική εμπέδηση όσο και για το συντελεστή απορρόφησης ήχου, για πορώδη απορροφητικά δείγματα συγκεκριμένων διαστάσεων, ερευνητές έχουν αποφανθεί ότι είναι ουσιαστικά ίδια με αυτά ενός δείγματος με άπειρες πλευρικές διαστάσεις [12], [13], [40].

3.1.3 Μέθοδος Απωλειών Μετάδοσης (Transmission Loss).

Η μέθοδος απωλειών μετάδοσης (transmission loss) πραγματοποιείται με σωλήνα εμπέδησης χρησιμοποιώντας όμως δύο ζεύγη μικρόφωνων (Εικόνα 23). Από τα μικρόφωνα μετρούνται και τα ανακλώμενα και τα μεταδιδόμενα κύματα ώστε να ληφθεί η απώλεια μετάδοσης κάθετης πρόσπτωσης (TL_n). Η χαρακτηριστική εμπέδηση, z_c , και ο χαρακτηριστικός κυματαριθμός διάδοσης, k_c προσδιορίζονται από την μέθοδο αυτή. Παρόλο που υπάρχουν διάφορες παραλλαγές, η μέθοδος transmission loss των Song και Bolton είναι ευρέως αποδεκτή [12].



Εικόνα 23: Υλοποίηση της μεθόδου απωλειών μετάδοσης με ρύθμιση τεσσάρων μικροφώνων [12].

Το υπό εξέταση υλικό πάχους, d , τοποθετείται στον σωλήνα και τέσσερα επίπεδα κύματα με πλάτη, A , B , C και D , αλληλεπιδρούν με το υπό εξέταση υλικό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23. Σε ανηχοϊκό περιβάλλον, δηλαδή για $D = 0$, θα είχαμε $TL_n(f) = 10 \log_{10} (W_i/W_t)$, ή $TL_n(f) = 10 \log_{10} (|A^{anech.}/C^{anech.}|^2)$, όπου W_i και W_t είναι η προσπίπτουσα στο δείγμα και η διαδιδόμενη από την άλλη πλευρά του δείγματος ηχητική ισχύς, αντίστοιχα [12].

Επειδή διαφορετικές συνθήκες τερματισμού θα οδηγούσαν σε διαφορετικά αποτελέσματα, η απώλεια μετάδοσης θα πρέπει να εκφράζεται ως προς το υπό εξέταση υλικό [12]. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον ορισμό του πίνακα μεταφοράς που είναι χαρακτηριστικός για ένα ακουστικό υλικό.

Ο πίνακας, \mathbf{G} , που συνδέει τα οδεύοντα προς τα εμπρός και προς τα πίσω ακουστικά κύματα ορίζεται ως [12]:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} \quad (53)$$

Σε κάθε θέση x στα δεξιά του δείγματος, $x \leq 0$, η ακουστική πίεση, $p(x)$ και η σωματιδιακή ταχύτητα $u(x)$ είναι [12]:

$$p(x) = A(f)e^{-jkx} + B(f)e^{jkx} \quad (54)$$

$$u(x) = (A(f)e^{-jkx} - B(f)e^{jkx}) / \rho c \quad (55)$$

Ομοίως, για κάθε θέση αριστερά του δείγματος, $x \geq d$, η ακουστική πίεση, $p(x)$ και η σωματιδιακή ταχύτητα $u(x)$ είναι [12]:

$$p(x) = C(f)e^{-jkx} + D(f)e^{jkx} \quad (56)$$

$$u(x) = (C(f)e^{-jkx} - D(f)e^{jkx}) / \rho c \quad (57)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα, c είναι η ταχύτητα του ήχου, f η συχνότητα και k ο κυματαριθμός για τον αέρα μέσα στο σωλήνα.

Τότε τα A , B , C και D , μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\begin{aligned} A &= \frac{j(p(x_1)e^{jkx_2} - p(x_2)e^{jkx_1})}{2 \sin k(x_1 - x_2)}, & C &= \frac{j(p(x_3)e^{jkx_4} - p(x_4)e^{jkx_3})}{2 \sin k(x_3 - x_4)}, \\ B &= \frac{j(p(x_2)e^{-jkx_1} - p(x_1)e^{-jkx_2})}{2 \sin k(x_1 - x_2)}, & D &= \frac{j(p(x_4)e^{-jkx_3} - p(x_3)e^{-jkx_4})}{2 \sin k(x_3 - x_4)}. \end{aligned} \quad (58)$$

Έτσι, τα πλάτη A , B , C και D μπορούν να υπολογιστούν από τις τέσσερις μετρήσεις μικροφώνου. Αφού προσδιοριστούν τα πλάτη, η ακουστική πίεση και η σωματιδιακή ταχύτητα μπορούν να εκτιμηθούν, και από τις δύο πλευρές του υπό εξέταση δείγματος, χρησιμοποιώντας τις Εξισώσεις (54), (55), (56) και (57) για τις θέσεις $x = 0$ και $x = d$. Η διάδοση μέσω του δείγματός μας μπορεί να περιγράψει από τον πίνακα μεταφοράς, \mathbf{T} , [12]:

$$\begin{bmatrix} p \\ u \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ u \end{bmatrix}_{x=d} \quad (59)$$

Εκτελώντας δύο σειρές μετρήσεων υπό διαφορετικές συνθήκες τερματισμού, η πρώτη σε άκαμπτο άκρο (r) και η δεύτερη σε ανοιχτό άκρο (o), στο αριστερό άκρο του σωλήνα της Εικόνας 23 και λύνοντας το γραμμικό σύστημα εξισώσεων της Εξίσωσης (60) βρίσκουμε τις συνιστώσες του πίνακα μεταφοράς \mathbf{T} [12]:

$$\begin{bmatrix} p^r & p^o \\ u^r & u^o \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^r & p^o \\ u^r & u^o \end{bmatrix}_{x=d} \quad (60)$$

Ο πίνακας \mathbf{G} μπορεί στη συνέχεια να προσδιοριστεί από το σύστημα:

$$\begin{bmatrix} A^r & A^o \\ B^r & B^o \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C^r & C^o \\ D^r & D^o \end{bmatrix}_{x=d} \quad (61)$$

όπου το στοιχείο G_{11} αντιστοιχεί στην απώλεια μετάδοσης για κάθετη πρόσπτωση, οπότε λύνοντας τη Εξίσωση (61) προκύπτουν οι απώλειες μετάδοσης κάθετης πρόσπτωσης (σε dB):

$$TL_n(f) = 20 \log_{10}(G_{11}) = 20 \log_{10} \left(\frac{A^r D^o - A^o D^r}{C^r D^o - C^o D^r} \right) \quad (62)$$

ή ισοδύναμα $TL_n = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{2} \left| T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho_o c} + \rho_o c T_{21} + T_{22} \right| \right)$ [12].

Ο Πίνακας μεταφοράς κάθετης πρόσπτωσης για ένα στρώμα πεπερασμένου βάθους, d , ομοιογενούς, ισότροπου πορώδους υλικού (άκαμπτου ή χαλαρού) είναι [12]:

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k_{c,p} d & j \rho_p c_p \sin k_{c,p} d \\ j \sin k_{c,p} d / \rho_p c_p & \cos k_{c,p} d \end{bmatrix} \quad (63)$$

$k_{c,p}$ είναι ο χαρακτηριστικός κυματαριθμός του ακουστικού υλικού, ρ_p είναι η πυκνότητα και c_p είναι η ταχύτητα του ήχου στο υπό εξέταση υλικό.

Από την Εξίσωση (63) μπορούμε να υπολογίσουμε το χαρακτηριστικό μέγεθος $k_{c,p}$ ως [12]:

$$k_{c,p} = \frac{1}{d} \cos^{-1} T_{11} \quad \text{ή} \quad k_{c,p} = \frac{1}{d} \sin^{-1} \sqrt{-T_{12} T_{21}} \quad (64)$$

Ενώ η χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση $z_{c,p} = \rho_p c_p$ υπολογίζεται ως [12]:

$$z_{c,p} = \sqrt{\frac{T_{12}}{T_{21}}} \quad (65)$$

3.1.4 Μέθοδος ελάχιστου μέσου τετραγώνου (Least mean square method).

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην μέθοδο της συνάρτησης μεταφοράς (transfer function), ενώ για την κάλυψη όλου του εύρους συχνοτήτων ενός σωλήνα εμπέδησης χρησιμοποιούνται τρεις μετρήσεις μικροφώνου. Σε ένα εύρος συχνοτήτων θα υπάρχει επικάλυψη αποτελεσμάτων λόγω των 2 μετρήσεων, οπότε και τα 2 αποτελέσματα εφαρμόζονται και το καθένα θα δώσει μια διαφορετική απάντηση. Με την εφαρμογή του ελάχιστου μέσου τετραγώνου δίνεται η δυνατότητα να έχουμε μια εξίσωση η οποία μας δίνει ένα αποτέλεσμα από τα τρία μικρόφωνα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για περισσότερα μικρόφωνα. Ο συντελεστής ανάκλασης τότε δίνεται ως [13]:

$$R = - \frac{\sum_{n=1}^{M-1} \sum_{m=n+1}^M (e^{-jk(L-z_n)} H_{nm} - e^{-jk(L-z_m)}) (e^{-jk(L+z_n)} H_{nm} - e^{-jk(L+z_m)})^*}{\sum_{n=1}^{M-1} \sum_{m=n+1}^M |e^{-jk(L+z_n)} H_{nm} - e^{-jk(L+z_m)}|^2} \quad (66)$$

όπου H_{nm} είναι η συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ των μικροφώνων n και m και z_n , z_m είναι οι αποστάσεις από n και m μεταξύ μικροφώνων και δείγματος, το σύμβολο (*) υποδεικνύει το σύνθετο συζυγές.

3.1.5 Συντελεστής Μείωσης Θορύβου (NRC).

Ο Συντελεστής Μείωσης Θορύβου - NRC (noise reduction coefficient) δηλώνει την ηχητική ενέργεια που απορροφάται κατά την πρόσκρουση του ήχου σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια. $NRC = 0$ υποδηλώνει τέλεια ανάκλαση ενώ $NRC = 1$ υποδηλώνει τέλεια απορρόφηση αυτές οι τιμές μπορεί να υπερβούν το 1,00 όταν δοκιμάζονται σε δείγματα με μεγάλο πάχος ή δείγματα με μεγάλους χώρους αέρα. Η τιμή NRC στρογγυλοποιείται με την πλησιέστερη αύξηση 0,05. Συγκεκριμένα, ο NRC είναι ο μέσος όρος τεσσάρων συντελεστών ηχοαπορρόφησης μίας συγκεκριμένης επιφάνειας στις συχνότητες 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz και 2000 Hz. Αυτές οι συχνότητες περιλαμβάνουν τις θεμελιώδεις συχνότητες και τους πρώτους τόνους της τυπικής ανθρώπινης ομιλίας, επομένως το NRC είναι ένας αξιόπιστος δείκτης που δείχνει πόσο καλά μια συγκεκριμένη επιφάνεια μπορεί να απορροφήσει την ανθρώπινη φωνή. Για ένα ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων για εφαρμογές όπως η μουσική ή ο έλεγχος του μηχανικού θορύβου ο δείκτης αυτός δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστος [41].

Από την Εξίσωση (67) μπορούμε να υπολογίσουμε το NRC.

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2500}}{4} \quad (67)$$

Όπου, α_{250} , α_{500} , α_{1000} , α_{2500} ο συντελεστής απορρόφησης του υλικού στην αντίστοιχη συχνότητα.

3.1.6 Μέσος όρος Απορρόφησης Ήχου (Sound Absorption average).

Μια άλλη μέτρηση απορρόφησης που χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο είναι ο μέσος όρος απορρόφησης ήχου SAA. Ο SAA είναι ο μέσος όρος των συντελεστών απορρόφησης για τις δώδεκα ζώνες του ενός τρίτου της οκτάβας από 200 Hz έως 2500 Hz με στρογγυλεμένη ακρίβεια 0,01. Αν και ο SAA αντικαθιστά τον NRC, σύμφωνα με το ASTM C 423, από το έτος 2000, το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφία εξακολουθεί να χρησιμοποιεί τιμές NRC. Η εξίσωση υπολογισμού του SAA δίνεται από την Εξίσωση (68) όπου a_i η απορρόφηση στην εκάστοτε συχνότητα όπου $i=200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500$ [41].

$$\frac{1}{12} \sum_{i=200Hz}^{i=2500Hz} a_i \quad (68)$$

Οι τιμές του συντελεστή μείωσης θορύβου (NRC) και του μέσου όρου απορρόφησης ήχου (SAA) υποδεικνύουν το επίπεδο ηχοαπορρόφησης που παρέχεται από το προϊόν που δοκιμάζεται. Ορισμένοι κατασκευαστές καθορίζουν το NRC και τον συντελεστή απορρόφησης με τη μέθοδο SAA με τιμές που είναι μεγαλύτερες από 1,0, λόγω του τρόπου με τον οποίο υπολογίζονται οι συντελεστές απορρόφησης ανά συχνοτική ζώνη στο εργαστήριο. Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να αυξήσουν τεχνητά τους συντελεστές απορρόφησης με τιμές πάνω από 1,0, ωστόσο τιμές μεγαλύτερες της μονάδας που υπονοούν ότι η ενέργεια που απορροφάται από ένα υλικό είναι μεγαλύτερη από αυτή που προσπίπτει πάνω του είναι αδύνατο να συμβούν. Επομένως, οποιοδήποτε δημοσιευμένος συντελεστής απορρόφησης ή τιμές NRC μεγαλύτερες από 1,0 δεν θα πρέπει να θεωρείται ως μεγαλύτερο από 1,0 [13].

3.2 Σωλήνας εμπέδησης SCS9020B/K/T60/TL.

Το “Acoustic Material Properties Measurement System SCS9020B – Kundt/ T60/ TL Tubes”, είναι μια ολοκληρωμένη σειρά εργαλείων hardware και software που πραγματοποιεί μετρήσεις όπως συντελεστή απορρόφησης α , κύρια εμπέδηση (standard Impedance), ειδική εμπέδηση z_0 , συνάρτηση γάμμα (Gamma function) και συνάρτηση απωλειών μετάδοσης (Transmission Loss function) [42].

Στο πείραμα που θα πραγματοποιήσουμε θα χρησιμοποιήσουμε τους σωλήνες SCS9020B/K/TL Impedance tube, παρακάτω θα παρουσιάσουμε τον εξοπλισμό, τις προδιαγραφές καθώς και τις ρυθμίσεις του.

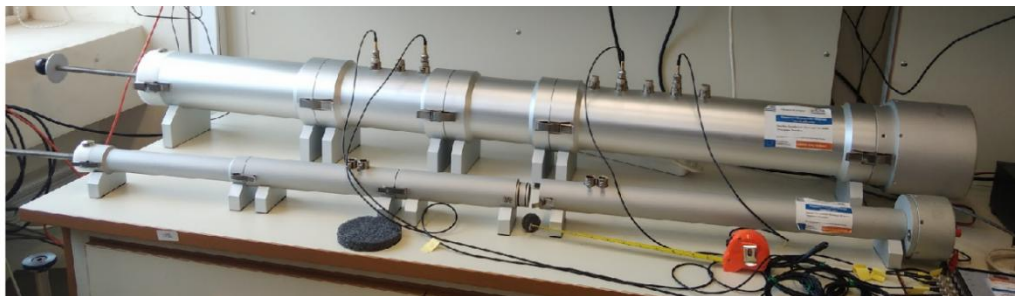
3.2.1 SCS9020B/ K/ T60/ TL hardware.

Το σύστημα **SCS9020B Kundt** από την οπτική της δομής, έχει κατασκευαστεί έτσι ώστε τα συνολικά κομμάτια του σωλήνα να είναι τα ελάχιστα. Εννέα (9) κυλινδρικά στοιχεία χρειάζονται για να πραγματοποιηθούν δύο διαφορετικά συστήματα μέτρησης [39].

1. “Kundt tubes”.
2. “TL tubes”.



Εικόνα 24: Διάταξη σωλήνων Kundt για μέτρηση συντελεστή α , σωλήνας 1, 100 mm διάμετρος, σωλήνας 2, 28 mm διάμετρος.



Εικόνα 25: Διάταξη σωλήνων Kundt για μέτρηση transmission loss TL.

Οι σωλήνες SCS9020B – Kundt/ T60/ TL επιτρέπουν μετρήσεις ακριβείας για πορώδη υλικά. Ανάλογα από ποια θα είναι η διάταξη των σωλήνων SCS9020B όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 24 και Εικόνα 25, μπορούν να εκτελεστούν μια σειρά μετρήσεων για τις ακουστικές ιδιότητες διαφόρων υλικών.

Στο πείραμα που θα ακολουθήσει η διάταξη του συστήματος SCS9020B-Kundt που θα λάβει μέρος για τις μετρήσεις του συντελεστή απορρόφησης ήχου, α , σε πορώδη υλικά είναι αυτή που απεικονίζεται στην Εικόνα 24. Το πλήρες σύστημα συντίθεται από δύο σειρές σωλήνων με διάμετρο 100 mm και 28 mm, οι οποίες αποτελούνται η κάθε μια από 3 [100 mm] και 2 [28 mm] κυλινδρικούς σωλήνες, αντίστοιχα, και ένα μεγάφωνο για κάθε διάμετρο [43].

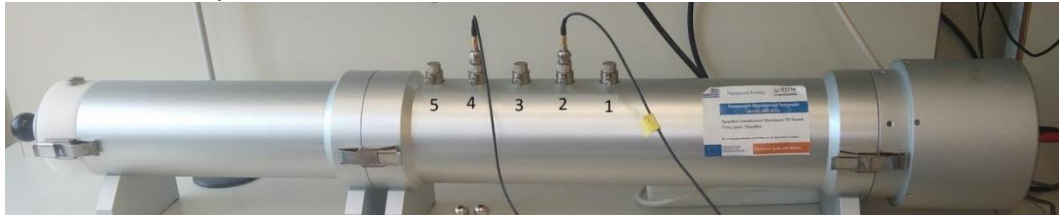
Ο κλασικός Kundt tube ή “Transfer Function TF” περιέχει μια ακουστική πηγή ευρείας μπάντας, επίπεδου κύματος, έναν θάλαμο μέτρησης που περιέχει δύο υποδοχές μικροφώνου και μια ρυθμιζόμενη υποδοχή για τα δείγματα. Τα αποτελέσματα της συνολικής ακουστικής πίεσης $p(x)$ υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την μέθοδο “FFT Transfer Function”.

Οι σωλήνες μπορούν να διακριθούν σε 2 λειτουργικά είδη:

1. Θάλαμοι μέτρησης – με κατάλληλους υποδοχείς μικροφώνου τοποθετημένους σε καθορισμένη απόσταση από το άκρο του σωλήνα [43].

2. Σε ρυθμιζόμενες θήκες δειγμάτων με κινούμενο έμβολο ακριβείας στο εσωτερικό. Τα άγκιστρα ασφάλισης εξασφαλίζουν σταθερή και χωρίς απώλειες ζεύξη μεταξύ των σωλήνων [39].

Ο μεγάλος σωλήνας (100 mm) έχει 5 υποδοχείς μικροφώνων, εκ των οποίων δύο μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάθε φορά. Οι μη χρησιμοποιημένες υποδοχές θα πρέπει να έχουν σφραγιστεί με έναν τερματισμό όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 26 [43].



Εικόνα 26: Ο μεγάλος σωλήνας (100 mm) με 5 υποδοχείς μικροφώνων.

Το υποσύστημα υποδοχής δείγματος αποτελείται από έναν κύλινδρο συγκράτησης δείγματος και ένα έμβολο-βιδωτό, αυτό το υποσύστημα μπορεί να συνενωθεί σταθερά με τον ακουστικό θάλαμο μέσω μερικών άγκιστρων ασφάλισης. Το έμβολο μέσα στον κύλινδρο συγκράτησης δείγματος μπορεί να μετακινηθεί εμπρός και πίσω κατά μήκος του κυλίνδρου με έλξη ή ώθηση, αντίστοιχα. Μια ταχύτερη τοποθέτηση του εμβόλου μπορεί να επιτευχθεί πατώντας το μεταλλικό κουμπί στο πλαστικό πώμα (Εικόνα 27), το οποίο απελευθερώνει το πιστόνι τροφοδοσίας του εμβόλου και τραβώντας ή σπρώχνοντας τον στρόφαλο επιλέγουμε την επιθυμητή θέση.[43]



Εικόνα 27: Έμβολο - πιστόνι κυλινδρικού σωλήνα.

Οι σωλήνες μικρής διαμέτρου 28 mm (Εικόνα 28) είναι κατασκευασμένοι με όμοιο τρόπο όπως οι μεγάλης διαμέτρου, εκτός από τις υποδοχές των μικροφώνων όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 2. Τα ηχεία έχουν

σχεδιαστεί για να ταιριάζουν με ακρίβεια στην άκρη του αντίστοιχου σωλήνα. Το μέγεθος του μεγάλωνου για τον σωλήνα διαμέτρου 100 mm και του 28 mm παρουσιάζουν διαφορετικές τεχνικές σύζευξης [43].



Εικόνα 28: Ο μικρός σωλήνας (28 mm) με δύο υποδοχείς μικροφώνων.

3.2.2 Πρότυπα συμμόρφωσης ISO.

Η μέθοδος μέτρησης του σωλήνα Kund SCS9020B αναφέρεται στο πρότυπο ISO¹ 10534-2, όπου η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα σωλήνα εμπέδησης, δύο θέσεις μικροφώνων και ένα σύστημα ψηφιακής ανάλυσης συχνότητας για τον προσδιορισμό του συντελεστή ηχοαπορρόφησης των ηχοαπορροφητικών υλικών για κάθετη πρόσπτωση ήχου. Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό της εμπέδησης ακουστικής επιφάνειας ή της επιφανειακής απορρόφησης υλικών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ακουστική εμπέδηση ενός ηχοαπορροφητικού υλικού σχετίζεται με τις φυσικές του ιδιότητες, όπως αντίσταση ροής, πορώδες, ελαστικότητα και πυκνότητα [44].

Η μέθοδος δοκιμής είναι παρόμοια με τη μέθοδο δοκιμής που καθορίζεται στο ISO 10534-1, καθώς χρησιμοποιεί έναν σωλήνα εμπέδησης με μια πηγή ήχου συνδεδεμένη στο ένα άκρο και το δείγμα προς ανάλυση τοποθετημένο στο σωλήνα στο άλλο άκρο. Η μέθοδος δοκιμής προορίζεται να παρέχει μια εναλλακτική και γενικά μια πολύ ταχύτερη τεχνική μέτρησης από αυτή του ISO 10534-1 και στο πρότυπο ASTM² E1050-08 (Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System) η μέθοδος δοκιμής για την ακουστική εμπέδηση και την απορρόφηση ακουστικών υλικών χρησιμοποιεί έναν σωλήνα, ένα μεγάφωνο μιας συγκεκριμένης συχνότητας που διέρχεται από το σωλήνα, εντός του οποίου βρίσκεται το προς ανάλυση υλικό όπου πρέπει να μετρηθεί ο συντελεστής απορρόφησης του, επίσης η μέθοδος χρησιμοποιεί 2 μικρόφωνα εντός του δοκιμαστικού σωλήνα, που μετρούν τα ηχητικά κύματα που περνούν μέσα από το εν λόγω υλικό, πόσο απορροφούνται και πόσο ανακλώνται. Το εύρος συχνοτήτων εξαρτάται από τη διάμετρο του σωλήνα και στην απόσταση των μικροφώνων που υπάρχει μεταξύ τους. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη δοκιμή ASTM C 384, αλλά αυτή θεωρείται πολύ πιο αποτελεσματική και ταχύτερη στον προσδιορισμό του συντελεστή απορρόφησης [44], [45].

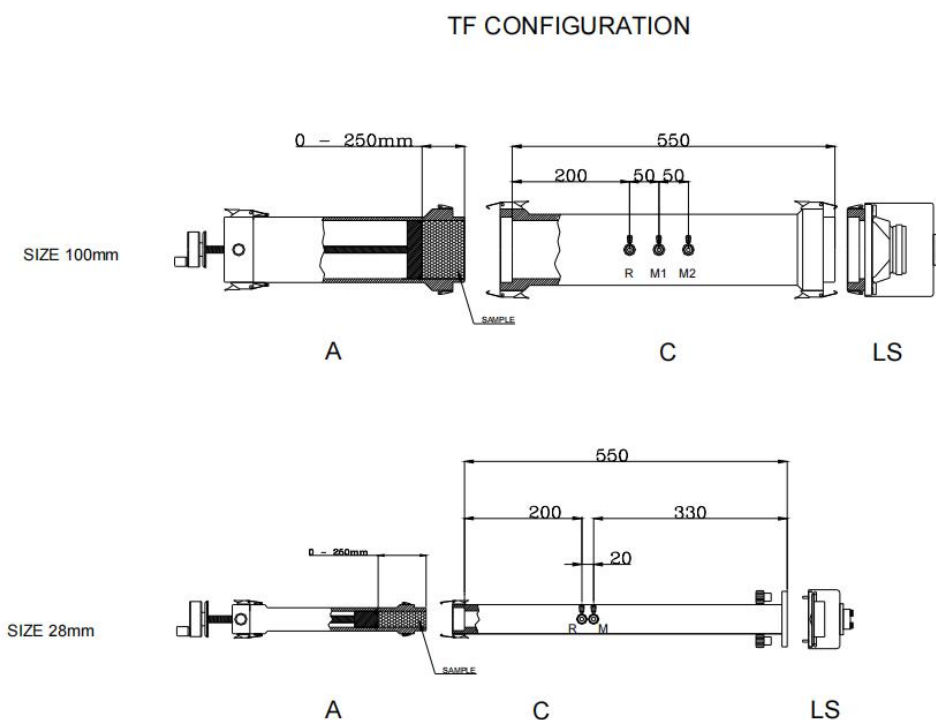
¹ International Organization for Standardization

² American Society for Testing and Material

Σύμφωνα με τον ISO 10534-2 ο σωλήνας εμπέδησης θα πρέπει να πληρεί κάποια κριτήρια σχετικά με τις διαστάσεις του έτσι ώστε στο εσωτερικό του να δημιουργηθούν στάσιμα κύματα. Συγκεκριμένα για σωλήνα με κυκλική διατομή, συνιστάται να επιλεγεί μήκος μεγαλύτερο κατά 3 φορές από τη διάμετρο του σωλήνα ώστε να ικανοποιείται η Εξίσωση (69), ο σωλήνας θα πρέπει να είναι αρκετά μακρύς ώστε να δημιουργεί επίπεδα ηχητικά κύματα μεταξύ της πηγής και του δείγματος επίσης θα πρέπει να έχει ομοιόμορφη διατομή σε όλο του το μήκος και λεία τοιχώματα χωρίς πόρους και εγχοπές.

$$3d > 300 \text{ mm} \quad (69)$$

Για τον σωλήνα $d = 100 \text{ mm}$ το μήκος του σωλήνα είναι 550 mm για μέτρηση απορρόφηση συντελεστή α ήχου. Για τον σωλήνα $d = 28 \text{ mm}$ το μήκος του σωλήνα είναι επίσης 550 mm για τη μέτρηση συντελεστή απορρόφησης ήχου α . Η Εικόνα 29 μας δείχνει τα μήκη των σωλήνων [43].



Εικόνα 29: Διάταξη συνάρτησης μεταφοράς, πάνω σωλήνας διάμετρος 100 mm/ κάτω 28 mm και μήκη για το κάθε σωλήνα [43].

Το πρότυπο συνιστά επίσης τη χρήση μικροφώνων του ίδιου τύπου σχεδιασμένα για ελεύθερα ηχητικά πεδία και διάμετρο μικρότερη από το 20 % της απόστασης μεταξύ τους για σωλήνες εμπέδησης κυκλικής διατομής [43].

3.2.3 Εύρος συχνοτήτων - Υπολογισμός θέσης μικροφώνου.

Το εύρος συχνοτήτων που δουλεύουμε έχει επιλεχτεί σύμφωνα με τα πρότυπο ISO 10534-2 , το εύρος της συχνότητας λειτουργίας, f , καθορίζεται ως:

$$f_l < f < f_u \quad (70)$$

όπου

- f_l (lower) είναι η χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας του σωλήνα.
- f είναι η συχνότητα λειτουργίας.
- f_u (upper) είναι η υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας του σωλήνα.

Το f_l περιορίζεται από την ακρίβεια του εξοπλισμού για την επεξεργασία του σήματος. Το f_u επιλέγεται έτσι ώστε να αποφεύγονται τα στάσιμα κύματα κατά την διάδοση.

Το ανώτατο όριο συχνότητας για κυκλικούς σωλήνες εξαρτάται από την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα και από την ταχύτητα του ήχου c . Από την Εξίσωση (71) μπορούμε να υπολογίσουμε το f_u για τη διάμετρο του σωλήνα μας d : 28 mm και d : 100 mm [42],[43].

$$f_u d \leq 0.58c \quad (71)$$

$f_u = 1,98$ kHz για διάμετρο σωλήνα $d = 100$ mm και $f_u = 7,105$ kHz για $d = 28$ mm.

3.2.3.1 Όριο χαμηλών - υψηλών συχνοτήτων για διάμετρο σωλήνα $d : 100$ mm.

Η απόσταση s [m] μεταξύ των μικροφώνων θα πρέπει να επιλεχτεί σε συνάρτηση της f_l και σύμφωνα με τους κανόνες του ISO 10534-2 σχετικά με την απόσταση έτσι ώστε να ισχύει η εξής [42]:

$$s < 0,05 \lambda_l \quad (72)$$

Για $s = 150$ mm και διάμετρο σωλήνα $d: 100$ m, $f_l = 120$ Hz, αντίστοιχα για την f_u από την Ανίσωση (71) προκύπτει $f_u = 1540$ Hz, οπότε η Ανίσωση (70) ισχύει.

$$s < 0,45 \lambda_u \quad (73)$$

Η Ανίσωση (70) είναι συσχετισμένη σύμφωνα με το ISO 10534-2 με ένα δυναμικό εύρος 65 dB, στις μέρες έχουμε δυναμικό εύρος μεγαλύτερο από 90 dB

ή και 120 dB, οπότε μας επιτρέπεται να λάβουμε υπόψιν μας ότι το όριο του f_l είναι μεταξύ 1% και 3% [42].

3.2.3.2 Όριο χαμηλών - υψηλών συχνοτήτων για διάμετρο σωλήνα $d : 28 \text{ mm}$.

Η σχέση που θα πρέπει να ικανοποιείται για τον σωλήνα διαμέτρου $d : 28 \text{ mm}$ δίνεται από την Εξίσωση (74).

$$f_l = 5\% \lambda \quad \text{ή} \quad f_l = 3\% \lambda \quad (74)$$

Η απόσταση $s \text{ [m]}$ μεταξύ των μικροφώνων είναι $s = 20 \text{ mm}$, οπότε $f_l = 5\% \lambda = 860 \text{ Hz}$ ή $f_l = 3\% \lambda = 520 \text{ Hz}$ και $f_u = 7100 \text{ Hz}$ από την Ανίσωση (71).

Με βάση τις διαμέτρους των σωλήνων και το εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1,6 kHz και 520 Hz – 7,1 kHz για ήχους χαμηλής και υψηλής συχνότητας, αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι στο εύρος συχνοτήτων μεταξύ 1,0 kHz και 1,6 kHz αποτελεί περιοχή επικάλυψης των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από τους σωλήνες μικρής και μεγάλης διαμέτρου, οπότε στην περιοχή αυτή ενδέχεται να υπάρχουν διακυμάνσεις των αποτελεσμάτων. Ως εκ τούτου, για να αυξηθεί η ακρίβεια, πολλοί ερευνητές προτείνουν να υπολογιστούν οι τιμές του συντελεστή ηχοαπορρόφησης με βάση τους μέσους όρους των μετρούμενων δεδομένων [42].

Με σκοπό να αυξήσουμε την ακρίβεια των μετρήσεων κυρίως για τις υψηλές συχνότητες οι οπές που συνιστώνται για χρήση είναι οι $\Theta 4$ και $\Theta 2$ ή $\Theta 3$ και $\Theta 1$, όπως φαίνονται στην Εικόνα 26. Συγκεκριμένα για τους σωλήνες SCS9020B Kundt η τοποθέτηση των μικρόφωνων ακολουθεί το πρότυπο της ASTM, χρησιμοποιώντας τις θέσεις 4 και 2 της Εικόνας 26 για το σωλήνα διαμέτρου 100 mm, στον οποίο η απόσταση μεταξύ των μικροφώνων είναι 100 mm, για την κάλυψη του εύρους συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz. Η τοποθέτηση των μικροφώνων πρέπει να είναι άκαμπτη, ακριβής και σφραγισμένη [42].

3.2.4 SCS90-SERIES/9020B δοκιμασμένα χαρακτηριστικά και επιδόσεις.

Οι λεπτομέρειες της δοκιμαστικής διαδικασίας και της επεξεργασίας σήματος επιλέγονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται αβεβαιότητα της τάξης του 1% ή καλύτερη (λιγότερο) και για τη φάση της συνάρτησης μεταφοράς, σε όλες τις αναφερόμενες συχνότητες, 0,6° ή καλύτερη (λιγότερο) σύμφωνα πάντα με το ISO 10534-2.

Η SCS προτείνει στους χρήστες να προβούν πρώτα στις μετρήσεις των χαμηλών συχνοτήτων με τα δείγματα του πειράματος και έπειτα στις μετρήσεις των υψηλών συχνοτήτων. Επίσης συνιστούν τα δείγματα να τοποθετούνται με την ίδια σειρά [42], [43].

3.2.5 Συντήρηση Σωλήνα.

Σημαντικό κεφάλαιο είναι η συντήρηση των σωλήνων καθώς και όλων των άλλων εξαρτημάτων τους, όπως τα μικρόφωνα και τα δείγματα. Θα πρέπει ο καθαρισμός των σωλήνων να γίνεται ανά τακτά διαστήματα ώστε να αποφευχθεί οι εξωτερικές συνθήκες του περιβάλλοντος να επηρεάσουν τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα να μην είναι ακριβή και αξιόπιστα. Ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δοθεί στα υλικά που χρησιμοποιούμε για καθαρισμό και λίπανση των οργάνων. Συγκεκριμένα, ο καθαρισμός θα πρέπει να πραγματοποιείται από υφάσματα τα οποία δεν θα προκαλέσουν εκδορές ή βαθουλώματα στον εξοπλισμό. Ο τρόπος με τον οποίο θα ανατοποθετήσουμε τα μικρόφωνα ή και τις μεταξύ των σωλήνων συνδέσεις θα πρέπει να είναι αρκετά προσεκτικός, ώστε να μην υπάρξουν αστοχίες. Τα άγκιστρα, ή αλλιώς γάντζοι, ασφάλισης μπορούν να ανοίξουν για να εξαχθεί το έμβολο - πώμα από τον κύλινδρο, με τη σειρά για να επιτρέπεται ο εσωτερικός καθαρισμός του σωλήνα και η εξέταση του. Προσέχουμε να εισάγουμε ξανά απαλά το έμβολο στον κύλινδρο ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε ζημιά του δακτυλίου. Συνιστάται η λίπανση του εμβόλου και του κυλίνδρου πριν την επανασυναρμολόγηση [43].

3.2.6 Τοποθέτηση δειγμάτων εσωτερικά του σωλήνα.

Η τοποθέτηση των δειγμάτων στο σωλήνα είναι ένα σημείο το οποίο θέλει ιδιαίτερη προσοχή και σύμφωνα με το SCS 9020B προτείνονται δύο μέθοδοι για την τοποθέτηση των δειγμάτων.

1. Τοποθετούμε το δείγμα σε μια ίσια επιφάνεια και μετράμε το ύψος του. Μετακινούμε το έμβολο να έχει το ίδιο βάθος με το ύψος του υλικού που προ μετρήσαμε. Τέλος, εισάγουμε το υλικό στον σωλήνα και βεβαιωνόμαστε ότι η εξωτερική επιφάνεια του δείγματος δεν υπερβαίνει την άκρη του σωλήνα [43].

2. Μετακινούμε το έμβολο για να έχουμε μια βαθύτερη κοιλότητα, εισάγουμε το δείγμα και μετακινούμε το έμβολο αργά προς τα έξω μέχρι το δείγμα είναι σχεδόν ευθυγραμμισμένο με την άκρη του σωλήνα (Εικόνα 30). Προσδιορίζουμε το πραγματικό βάθος της κοιλότητας μετρώντας το με χάρακα. Όπως η εισαγωγή του δείγματος μέσα στο δοκιμαστικό σωλήνα γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, έτσι και η εξαγωγή του θα πρέπει να γίνει προσεχτικά, το δείγμα δεν

θα πρέπει να τραβηχτεί με κάποιο εργαλείο ή με τα δάχτυλά, μια εξαγωγή ασφαλή μπορεί να καταστρέψει είτε το δείγμα είτε μέρος του σωλήνα [43].



Εικόνα 30: Ευθυγραμμισμένη τοποθέτηση δείγματος σε Σωλήνα Kundt.

Η εξαγωγή του δείγματός θα πρέπει να γίνεται πάντα με την χρήση του πιστονιού - εμβόλου συγκράτησης και στις δύο μεθόδους το δείγμα θα πρέπει να δείχνει όπως φαίνεται στην Εικόνα 30 [43].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Δείγματα, υλικά και κοπή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τα πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά που θα συμμετάσχουν στο πείραμα μας καθώς θα γίνει αναφορά και στα χαρακτηριστικά τους. Για την εύρεση των πορωδών υλικών που λαμβάνουν μέρος στο πείραμα μας έχει πραγματοποιηθεί διαδικτυακή έρευνα με βασικό κριτήριο να είναι πορώδη, τα δείγματα μας παραδόθηκαν στη μορφή κατασκευασμένης πλάκας, έτσι όπως διατίθενται και στο εμπόριο. Ένα πολύ σημαντικό πρακτικό θέμα της πειραματικής αυτής διαδικασίας ήταν η προετοιμασία – κοπή των δειγμάτων στις επιθυμητές διαστάσεις για την εφαρμογή τους στους σωλήνες Kundt· το κάθε υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε είναι αναγκαίο να κοπεί σε κυλίνδρους δύο διαμέτρων: 100 mm για τον σωλήνα διαμέτρου 100 mm (120 Hz – 1540 Hz) και σε 28 mm για τον σωλήνα διαμέτρου 28 mm (520 Hz – 7100 Hz) αντίστοιχα.

4.1 Κοπή υλικών.

Η διαδικασία της κοπής των υλικών ήταν ιδιαίτερα απαιτητική. Μέσω διαδικτυακής έρευνας βρέθηκαν διάφορες μέθοδοι με τις οποίες θα μπορούσε κάποιος να κόψει τα δείγματα. Μερικές από αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

4.1.1 Κοπή λέιζερ -*Laser cut.*

Ένα μηχάνημα κοπής λέιζερ (Εικόνα 31) βασίζεται στη λεγόμενη CNC (Computerized Numerical Control) τεχνική, όπου αυτοματοποιημένοι έλεγχοι μέσω υπολογιστών σε βιομηχανικά εργαλεία προσφέρουν ακρίβεια, επαναληπτικότητα και αποτελεσματικότητα. Η κοπή υλικών με μηχανές λέιζερ είναι μια διαδικασία χωρίς επαφή, βασίζεται στη θερμότητα όπου μια δέσμη υψηλής ενέργειας λέιζερ εστιάζει στο εκάστοτε υλικό και εκτελεί κοπή ακριβείας σε επιθυμητά σχήματα και σχέδια. Μια μηχανή κοπής λέιζερ μπορεί να εκτελέσει πολλαπλές διαδικασίες σε μια σειρά υλικών όπως μέταλλο, γυαλί, πλαστικό αφρό, πολύτιμους λίθους, ξύλο και χαρτί κ.α. χωρίς να απαιτούνται ειδικά σχεδιασμένα εργαλεία που θα προσαρμόζονται πάνω στο μηχάνημα [46].



Εικόνα 31: CNC λείζερ (laser cutter) [46].

4.1.2 CNC μηχανές κοπής - CNC cutting machines.

Οι μηχανές κοπής CNC (CNC cutting machines) (Εικόνα 32) βασίζονται στην τεχνική CNC που προαναφέραμε. Ένα ελεγχόμενο CNC σύστημα μπορεί να είναι πολλά πράγματα, όπως π.χ. ένα λείζερ, αλλά θα μπορούσε επίσης να είναι ένας κόφτης πλάσματος, ένας δρομολογητής, ένα μαχαίρι σύρματος, μία πρέσα, ένας τόννος, ένας συγκολλητής κ.α. Οι μηχανές CNC μηχανικής κοπής βασίζονται στην επαφή, η διαφορά με τους δρομολογητές χειρός είναι ότι προσδίδουν την ευελιξία και την ακρίβεια που συναντάμε στην αυτοματοποιημένη κοπή CNC. Όπως και οι κόφτες λείζερ, μπορούν να κόψουν υλικά όπως πλαστικό, αφρό, ξύλο, σύνθετα υλικά, ακρυλικό και είναι ιδανικές για κοπή χάλυβα, αλουμινίου και άλλων μεταλλικών πλακών [46].



Εικόνα 32: CNC cutting machine [46].

4.1.3 Κοπή διάτρησης (Punch cut).

Η τεχνική της κοπής διάτρησης είναι σχετικά μια οικονομική μέθοδος για την δημιουργία οπών. Σε ένα διατρητή (Εικόνα 33) προσαρμόζουμε το εκάστοτε μέγεθος οπής που θέλουμε να δημιουργήσουμε και μέσω της πίεσης που του ασκούμε στη λαβή δημιουργούμε το δείγμα. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει αρκετά μειονεκτήματα μιας και δεν προσδίδει ιδιαίτερο βάθος στην κοπή και η ποικιλία στα υλικά που μπορεί να κόψει είναι σχετικά μικρή [47].



Εικόνα 33: Διατρητής σπών [48].

4.1.4 Κυκλικό κοπίδι με ξυράφι.

Η τεχνική που τελικά υιοθετήσαμε για την κοπή των δειγμάτων βασίστηκε στο ειδικό κοπίδι κύκλων Lion NT Cutter C-1500P, όπως αυτό που απεικονίζεται στην Εικόνα 34, το οποίο μπορεί να κόψει κυκλικά δείγματα διαμέτρου από 18 mm έως 170 mm [49].

Η τεχνική κοπής είναι η εξής: αρχικά είναι αναγκαίο να αντικατασταθεί η λεπίδα που παρέχεται με το συγκεκριμένο κοπίδι με λεπίδα ξυραφιού, επειδή η κοπή που παρέχει το ξυράφι είναι πιο ακριβής και οδηγεί σε στρωτά και λεία δείγματα. Στο κοπίδι κύκλων πρώτα προσαρμόζουμε το ξυράφι ώστε το αρχικό βάθος κοπής για το εκάστοτε δείγμα να είναι περίπου 3 mm, έπειτα επιλέγουμε τη διάμετρο που θέλουμε να κόψουμε (28 mm ή 100 mm) και στη συνέχεια εφαρμόζουμε το κοπίδι πάνω στην εκάστοτε πορώδη πλακά και ξεκινάμε να γυρίζουμε περιστροφικά την λαβή που συγκρατεί το ξυράφι, κρατώντας τον άξονα του κοπιδιού σταθερό. Αφού έχει ολοκληρωθεί μια τουλάχιστον περιστροφή, σταδιακά αυξάναμε το μήκος του ξυραφιού ώστε να κόψει το δείγμα στο επιθυμητό βάθος 20 mm – 50 mm. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στη περίπτωση όπου το ξυράφι συναντά μεγάλη αντίσταση κατά την περιστροφική κίνηση που πραγματοποιείται προς μια ορισμένη κατεύθυνση, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ολοκληρωθεί η κοπή. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω της σύνθεσης των ινών του κάθε υλικού και στην μορφολογία του. Η αντίσταση του υλικού υπάρχει πιθανότητα να μειωθεί αλλάζοντας την φορά περιστροφής του κοπιδιού.

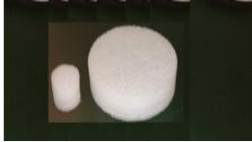






Εικόνα 34: Κοπίδι κύκλων Lion NT Cutter C-1500P με κοπή από 1,8 cm - 17 cm [49].

4.2 Δείγματα.

Ο συνολικός αριθμός δειγμάτων που μελετήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία είναι 5. Η κάθε πλάκα διαφέρει από την άλλη τόσο στη πυκνότητα, όσο και στην σύνθεσή της. Στον Πίνακα 2 αναφέρονται η σύνθεση, η πυκνότητα και το πάχος του κάθε δείγματος ξεχωριστά.

Πίνακας 2: Δείγματα πειράματος σύνθεση, πυκνότητα και πάχος αντίστοιχα.

Αρίθμηση Δειγμάτων	Ονομασία Δείγματος / χαρακτηριστικά	Πυκνότητα [kg/m ³]	Πάχος [mm]
sample 1 	Demo material – Αποτελούμενο από πολυεστερικές ίνες	200	20
sample 2 	Πετροβάμβακας – Θερμομονωτικός ορυκτοβάμβακας που παράγεται βιομηχανικά από την τήξη ορυκτών πετρωμάτων, υάλου ή σκωρίας	100	50 / 20
sample 3 	Πετροβάμβακας – Θερμομονωτικός ορυκτοβάμβακας που παράγεται βιομηχανικά από την τήξη ορυκτών πετρωμάτων, υάλου ή σκωρίας	150	50 / 20
sample 4 	Ηχοαπορροφητικό και θερμομονωτικό υλικό από 100% αναγεννημένες και θερμοσυγκολλημένες ίνες πολυεστέρα	40	20
sample 5 	Θερμομονωτικό, ηχοαπορροφητικό υλικό από ίνες πολυεστέρα.	34	30

4.2.1 Sample 1.

Το πρώτο δείγμα, “sample 1”, είναι το demo material το οποίο συνόδευε τον εργαστηριακό εξοπλισμό σωλήνων Kundt, είναι ηχοαπορροφητικό υλικό από πολυεστερικές ίνες πυκνότητας 200 kg/m^3 και πάχους 20 mm [43].

4.2.2 Sample 2.

Το δεύτερο δείγμα, “sample 2”, είναι πετροβάμβακας με πυκνότητα 100 kg/m^3 , είναι μονωτικό υλικό που παράγεται από τη τήξη και την ινοποίηση πετρωμάτων.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, το δείγμα παράγεται από ορυκτά πετρώματα που αρχικά τήκονται σε ηλεκτρική κάμινο στους $1520 \text{ }^\circ\text{C}$ και στη συνέχεια ινοποιούνται, με την προσθήκη συγκολλητικής ρητίνης, λαδιού και ειδικών πυριτικών ενώσεων για υδροφιλισμό, με σκοπό να αποκτήσουν συνεκτικότητα, ελαστικότητα και υδροαπωθητικότητα. Είναι φυσικό, ανόργανο και ινώδες υλικό που κύρια χαρακτηριστικά του είναι οι ηχομονωτικές και οι θερμομονωτικές ιδιότητες του, το σημείο μάλθωσης των ινών ξεπέρνα τους $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ και σε περίπτωση φωτιάς το υλικό παραμένει άκαυστο. Το δείγμα είναι σύμφωνο με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13162 [51].

4.2.3 Sample 3.

Το τρίτο δείγμα, “sample 3”, είναι και αυτό πετροβάμβακας, η μόνη διαφορά του από το sample 2 είναι ότι έχει μεγαλύτερη πυκνότητα: 150 kg/m^3 [52].

4.2.4 Sample 4.

Το τέταρτο δείγμα, “sample 4”, παράγεται από 100% θερμοσυγκολλημένες και αναγεννημένες ίνες πολυεστέρα με πυκνότητα 40 kg/m^3 . Βασικά χαρακτηριστικά του τέταρτου δοκιμίου είναι ότι αυξάνει την ηχομονωτική αξία ελαφρών δομικών στοιχείων, παρέχοντας παράλληλα και πολύ καλή θερμομόνωση, είναι πλήρως ανακυκλώσιμο, εύκαμπτο, δεν σπάει και δεν διαλύεται από καλωδιώσεις και σωληνώσεις. Είναι ανθεκτικό σε χημικά, γήρανση, σε υπεριώδεις ακτίνες, υγρασία, και μικροοργανισμούς, είναι μη τοξικό, άοσμο, υποαλλεργικό και δεν περιέχει επικίνδυνες ίνες για την υγεία [53].

4.2.5 Sample 5.

Το τελευταίο δείγμα, “sample 5”, έχει πυκνότητα 34 kg/m^3 , είναι θερμο-ηχομονωτικό υλικό νέας γενιάς και κατασκευάζεται από θερμοσυγγολυτικά στρώματα πολυεστερικών ινών μεγάλης αντοχής έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλη ηχοαπορροφητικότητα και θερμομόνωση, χαρακτηριστικά του είναι ότι δεν επηρεάζεται από τις υπεριώδεις ακτίνες και την υγρασία, δεν προσβάλλεται από μούχλα ή βακτηρίδια, είναι εύκαμπτο υλικό, δεν παραμορφώνεται, είναι ελαφρύ και εύκολο στην

χρήση. Σημαντικό χαρακτηριστικό του ότι είναι αυτοσβενύμενο υλικό και δεν αναδίδει τοξικά αέρια σε περίπτωση φωτιάς [54].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πειραματικό μέρος

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τα βήματα που ακολουθήσαμε έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις για τα πορώδη ηχοαπρροφητικά δείγματα του Πίνακα 2.

Αρχικά θα παρουσιάσουμε τον εξοπλισμό, τη διάταξη και το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί το πείραμα μας και εν συνεχεία θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε.

5.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός.

I. Σωλήνες Kundt

Ο σωλήνας με την αρίθμηση 1 στην Εικόνα 35 είναι ο σωλήνας Kundt με διάμετρο 100 mm, ενώ ο σωλήνας με αρίθμηση 2 σωλήνας είναι ο σωλήνας Kundt με διάμετρο 28 mm [37].



Εικόνα 35: Kundt tubes TF διαμέτρου 100 mm και 28 mm.

II. Μικρόφωνα

Τα μικρόφωνα που τοποθετούνται στους υποδοχείς των σωλήνων είναι τα UC-53A με προενισχυτή NH-22 (Εικόνα 36) [51].



Εικόνα 36: Μικρόφωνο UC-53A με προενισχυτή NH-22 [51].

III. Ενισχυτής AS220

Ο ενισχυτής AS220 (Εικόνα 37), 2 καναλιών και απόκριση συχνότητας (Frequency Response) : 20 Hz – 20 kHz, διαθέτει εισόδους jack 6,3 mm, XLR, RCA και εξόδους speaker, και μπόρνες με δυνατότητα σύνδεσης και γυμνού καλωδίου [56].



Εικόνα 37: Ενισχυτής AS220, πάνω η πρόσοψη του AS220, κάτω η πίσω όψη του ενισχυτή ήχου [56].

IV. Μονάδα απόκτησης/αναπαραγωγής σήματος DT-9837A / SCS-SDT4.

Η μονάδα DT-9837A / SCS-SDT4 (Εικόνα 38) είναι μια μονάδα δυναμικής απόκτησης σήματος (dynamic data acquisition unit), υψηλής ακρίβειας, για μετρήσεις θορύβου κραδασμών και ακουστικών ήχων. Είναι φορητή και συνδέεται μέσω USB με ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Υποστηρίζει IEPΕ εισόδους, 4 ταυτόχρονα 24-bit Delta-Sigma A/D κανάλια, και πραγματοποιεί υψηλής ποιότητας μετρήσεις στις ακουστικές συχνότητες [53]. Υποστηρίζει μεγάλες συχνότητες δειγματοληψίας (έως 105,4 kHz) ανά

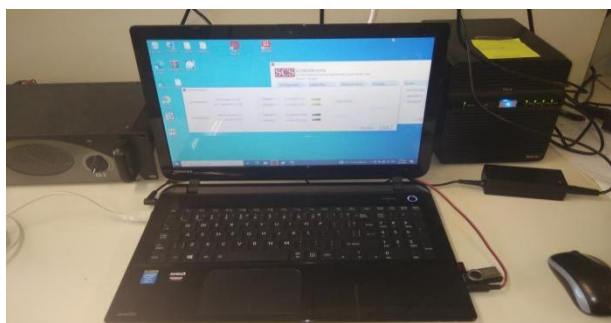
κανάλι, παρέχει είσοδο ταχόμετρου στη ροή δεδομένων A/D, ενώ περιλαμβάνει μια έξοδο συγχρονισμού με 24-bit μετατροπέα D/A για την απόκτηση σήματος με συγχρονισμό σε πολλαπλές μονάδες και μια έξοδο σήματος με 24-bit μετατροπέα D/A για την αναπαραγωγή σήματος [53].



Εικόνα 38: Μονάδα απόκτησης/αναπαραγωγής σήματος Model DT-9837A / SCS-SDT4 [53].

V. Υπολογιστής με κάρτα ήχου

Η κάρτα ήχου του εργαστηριακού υπολογιστή τύπου Laptop (Εικόνα 39) εξάγει από το πρόγραμμα noise generator του SCS9020 software του εξοπλισμού μας τον ροζ θόρυβο που οδηγείται στον ενισχυτή AS220.



Εικόνα 39: Η/Υ τύπου laptop με κάρτα ήχου.

5.2 Διάταξη εξοπλισμού.

Η συνδεσμολογία των παραπάνω μονάδων φαίνεται στην Εικόνα 40. Από το πρόγραμμα SCS αναπαράγεται ροζ θόρυβος, ο οποίος οδηγείται από την κάρτα ήχου του laptop στην είσοδο 1 του ενισχυτή AS220. Η έξοδος από το κανάλι 1 (ch1) του AS220 συνδέεται μέσω καλωδίων στην είσοδο του ηχείου του σωλήνα Kundt. Ανάλογα σε ποιο φάσμα συχνοτήτων δουλεύουμε συνδέουμε και τον αντίστοιχο σωλήνα: για τις χαμηλές συχνότητες 120 Hz – 1540 Hz τον σωλήνα διαμέτρου 100 mm, ενώ για τις υψηλές συχνότητες 520 Hz – 7100 Hz συνδέουμε το σωλήνα διαμέτρου 28 mm. Με τον

ίδιο τρόπο, αντίστοιχα, ανταλλάσσουμε και τα μικρόφωνα mic 1, 2 στον εκάστοτε σωλήνα που χρησιμοποιούμε.

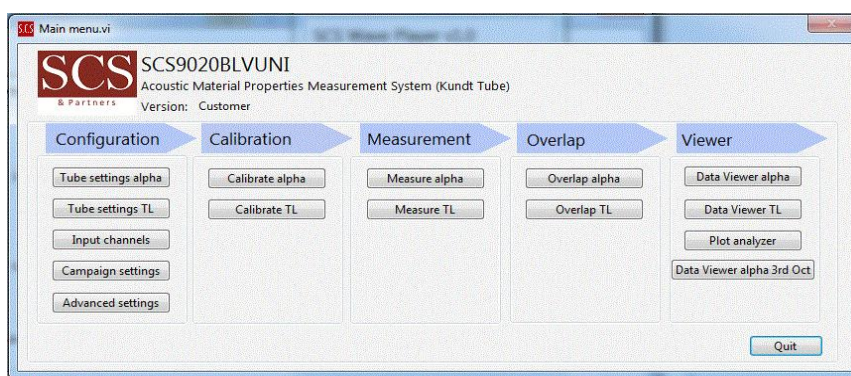
Τα μικρόφωνα mic 1, 2 συνδέονται στις αντίστοιχες εισόδους της μονάδα απόκτησης/αναπαραγωγής σήματος DT-9837A / SCS-SDT4, η οποία κατ' επέκταση συνδέεται με το laptop μέσω USB καλωδίου.



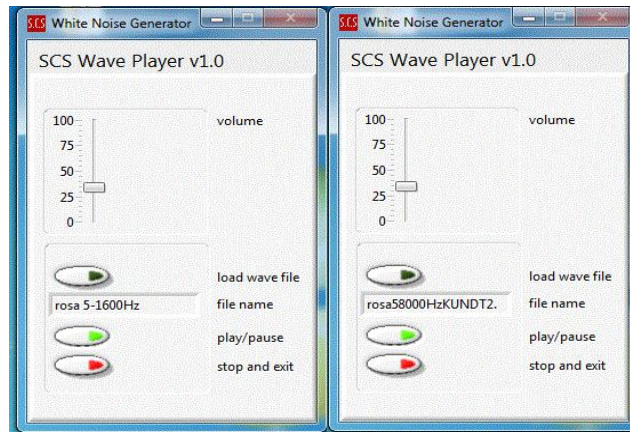
Εικόνα 40: Διάταξη και συνδεσμολογία εργαστηριακού εξοπλισμού για μέτρηση του συντελεστή ηχοαπορρόφησης α .

5.3 Πρόγραμμα μετρήσεων SCS 9020.

Το πρόγραμμα με το οποίο πραγματοποιούνται οι ζητούμενες μετρήσεις του πειράματος μας είναι το SCS 9020 σε συνδυασμό με το SCS9020 noise generator. Το κύριο μενού του προγράμματος SCS 9020 φαίνεται στην Εικόνα 41 και του SCS9020 noise generator στην Εικόνα 42, αντίστοιχα.



Εικόνα 41: Κύριο μενού SCS 9020.

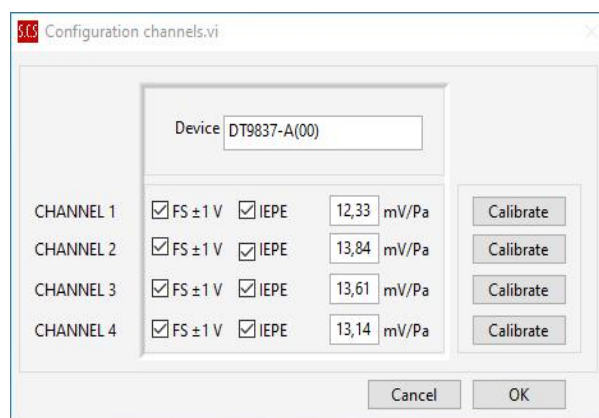


Εικόνα 42: White Noise Generator.

5.4 Στάδια Πειραματικής Διαδικασίας.

1. Διαμόρφωση καναλιών (*Channels' Configuration*).

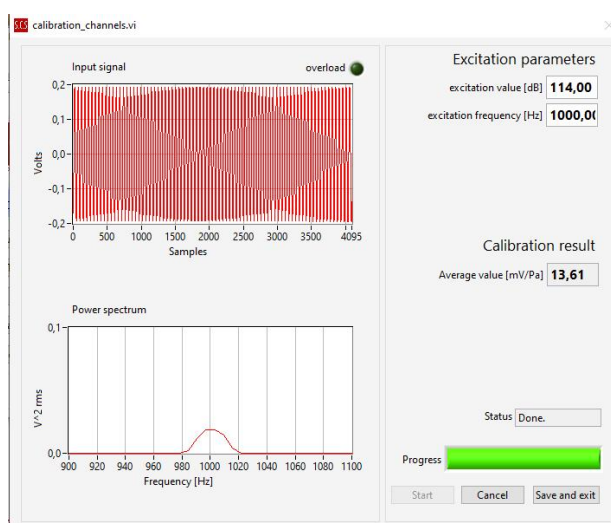
Για την εκπόνηση του πειράματός μας και για τη διασφάλιση της ακρίβειας των μετρήσεων μας ακολουθήθηκαν μία σειρά από βήματα στο πρόγραμμα SCS 9020. Το πρώτο βήμα είναι η βαθμονόμηση των μικροφώνων. Μέσω του προγράμματος SCS 9020 επιλέγουμε από το interface, όπως δείχνει η Εικόνα 41, την επιλογή input channels που μας εμφανίζει το μενού βαθμονόμησης που βλέπουμε στην Εικόνα 43. Παράλληλα, έχουμε συνδέσει τα μικρόφωνα από την πλευρά του BNC συνδετήρα τους με τη μονάδα απόκτησης σήματος DT-9837A / SCS-SDT4, ενώ στον calibrator type 1251 [58] του εργαστηρίου (Εικόνα 44) τοποθετούμε το κάθε μικρόφωνο με τη σειρά του. Μπορούμε να βαθμονομήσουμε έως και 4 μικρόφωνα, όσα και τα κανάλια του DT-9837A / SCS-SDT4. Επιλέγουμε το μικρόφωνο που θέλουμε να βαθμονομήσουμε (channel 1, 2, 3 ή 4), στη συσκευή του calibrator βλέπουμε τις πληροφορίες του σήματος διέγερσης (στάθμη 114 dB και συχνότητα 1000 Hz) που θα πρέπει να εισάγουμε στο πρόγραμμα όπως δείχνει η Εικόνα 45, προτού ξεκινήσουμε τη βαθμονόμηση [43].



Εικόνα 43: Μενού βαθμονόμησης.



Εικόνα 44: Βαθμονομητής μικροφώνων, sound calibrator Norsonic type 1251 [53].



Εικόνα 45: Interface των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης.

2. Διαμόρφωση α (Configuration alpha).

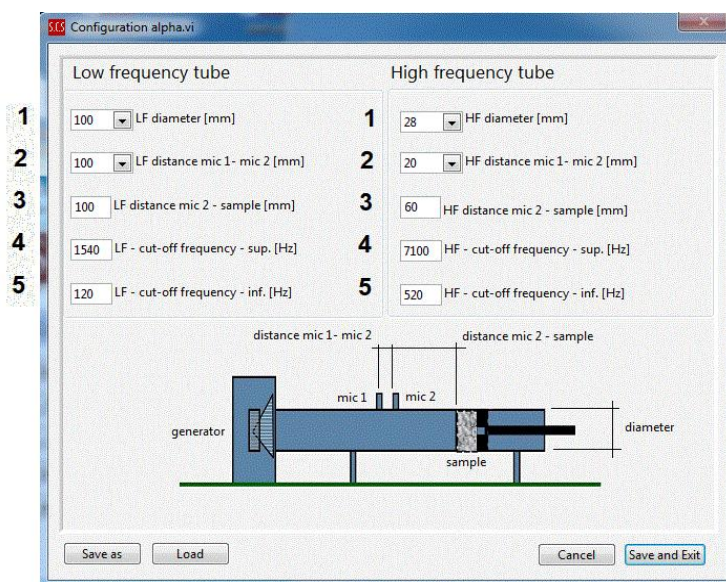
Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης των μικροφώνων, το επόμενο βήμα είναι να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους του συστήματος μας έτσι ώστε να είναι οι κατάλληλες για την μέτρηση alpha measurement που θα πραγματοποιήσουμε.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των σωλήνων εμπέδησης που θα πρέπει να καταχωρηθούν στο σύστημα προτού ξεκινήσουν οι μετρήσεις μας είναι τα παρακάτω (το γράμμα «Φ» συμβολίζει τη διάμετρο):

1. **Απόκριση συχνότητας** : 120 Hz – 1540 Hz για τον σωλήνα Φ100 mm και 520 Hz – 7100 Hz για τον σωλήνα Φ28 mm.
2. **Απόσταση μικροφώνου - δείγμα** : Σωλήνας Φ100 mm → 100 mm / σωλήνας Φ28 mm → 60 mm.
3. **Απόσταση μικροφώνου 1 - μικροφώνου 2**: Σωλήνας με Φ100 mm → 100 mm / σωλήνας με Φ28 mm → 20 mm.

4. **Μήκος δείγματος :** Σωλήνας με Φ100 mm έως 250 mm / σωλήνας με Φ28 mm έως 250 mm.

Η Εικόνα 46 δείχνει τις παραμέτρους όπου θα πρέπει να καταχωρηθούν τα πιο πάνω χαρακτηριστικά για τον κάθε σωλήνα [42][43].



Εικόνα 46: Ρύθμιση παραμέτρων [39].

Η ρύθμισή των παραμέτρων όπως φαίνεται γίνεται ξεχωριστά για το σωλήνα χαμηλών συχνοτήτων και ξεχωριστά για τον σωλήνα υψηλών συχνοτήτων.

Στην πρώτη γραμμή και για τους δυο σωλήνες επιλέγουμε την διάμετρο που έχουν οι σωλήνες Kundt.

Στην δεύτερη γραμμή καταχωρούμε το αποτέλεσμα της μέτρησης της απόστασης που έχουν μεταξύ τους το mic1 από το mic 2.

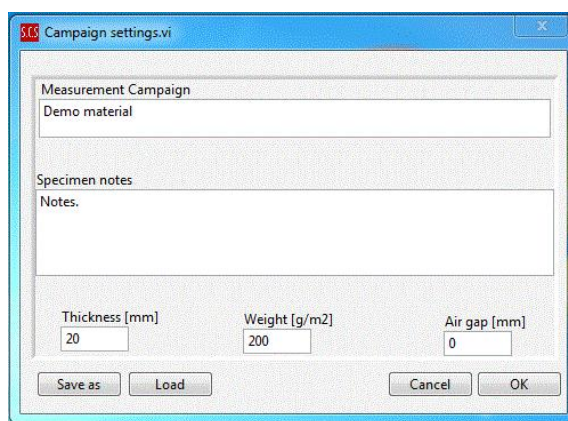
Στην τρίτη γραμμή καταχωρούμε την μέτρησή της απόστασης που έχουν το mic 2 από το δείγμα.

Στην τέταρτη γραμμή καταχωρούμε ανώτερο κατώφλι συχνότητας σε Hz (superior).

Στην πέμπτη γραμμή καταχωρούμε το κατώτερο κατώφλι συχνότητας σε Hz (inferior).

Η ανώτερη και η κατώτερη συχνότητα αξιόπιστων μετρήσεων, τόσο στις υψηλές συχνότητες όσο και στις χαμηλές συχνότητες, έχουν προσδιοριστεί στο Κεφάλαιο 3, με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού μας. Αφού καταχωρήσουμε τις παραπάνω παραμέτρους επιλέγουμε Save and Exit και προχωράμε στο επόμενο βήμα, το οποίο είναι να καταχωρίσουμε τα χαρακτηριστικά του δείγματος από την επιλογή campaign settings. Στη Εικόνα 47 βλέπουμε το μενού του campaign settings [42], [43].

3. Ρύθμισης δείγματος (Campaign settings).



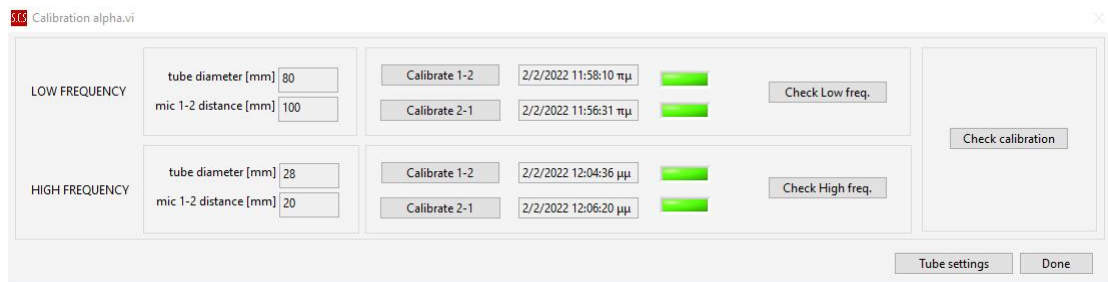
Εικόνα 47: campaign settings

Σε αυτό το μενού μπορούμε να ονοματίσουμε το δείγμα στην επιλογή measurement campaign, όπως π.χ. sample 1 (demo material), να συμπληρώσουμε κάποιες επιπλέον πληροφορίες με το χαρακτηριστικό σημειώσεις (notes), όπως επίσης να εισάγουμε το πάχος του εκάστοτε δείγματος, την πυκνότητα του καθώς και το πιθανό διάκενο αέρος που μπορούμε να ρυθμίσουμε μεταξύ του εμβόλου του σωλήνα και του δείγματος. Αφού καταχωρηθούν οι ζητούμενες τιμές προχωράμε στο επόμενο βήμα το οποίο είναι το calibrate alpha [43].

4. Βαθμονόμηση του α (calibration alpha).

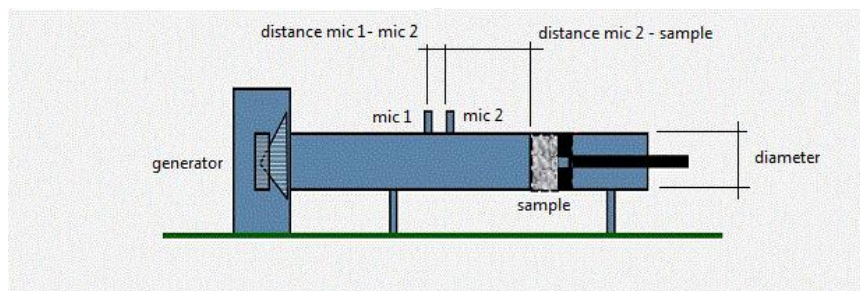
Η αρχική μέτρησή που θα γίνει είναι η βαθμονόμηση α (calibration alpha), όπου σύμφωνα με τις υποδείξεις του εγχειριδίου για τον Kundt Tube (σημειώσεις) θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί υλικό – δείγμα το οποίο έχει υψηλή ηχοαπορροφητική ικανότητα. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε το υλικό το οποίο έρχεται μαζί με τους σωλήνες Kundt, με την ονομασία demo material. Τα χαρακτηριστικά του υλικού demo material τα βλέπουμε στον Πίνακα 2. Η διαδικασία μέτρησης αυτή είναι μια διαδικασία βαθμονόμησης για την απόκτηση και αποθήκευση συναρτήσεων μεταφοράς μεταξύ των 2 μικροφώνων (σε 2 διαφορετικές διατάξεις εντός του κάθε σωλήνα) οι οποίες χρησιμοποιούνται ως αναφορά (γίνεται αντιστάθμιση των μετρήσεων με βάση αυτές τις συναρτήσεις μεταφοράς) κατά τη μέτρηση του συντελεστή ηχοαπορρόφησης, α .

Ξεκινώντας την διαδικασία του calibration alpha ακολουθούμε μία σειρά από βήματα τα οποία ολοκληρώνονται σε δυο στάδια, το πρώτο στάδιο της μέτρησης αυτής είναι το calibration alpha στις χαμηλές συχνότητες και αφού αυτό ολοκληρωθεί ξεκινάμε το δεύτερο στάδιο, το calibration alpha στις υψηλές συχνότητες. Η Εικόνα 48 μας δείχνει το μενού της βαθμονόμησης α [43].



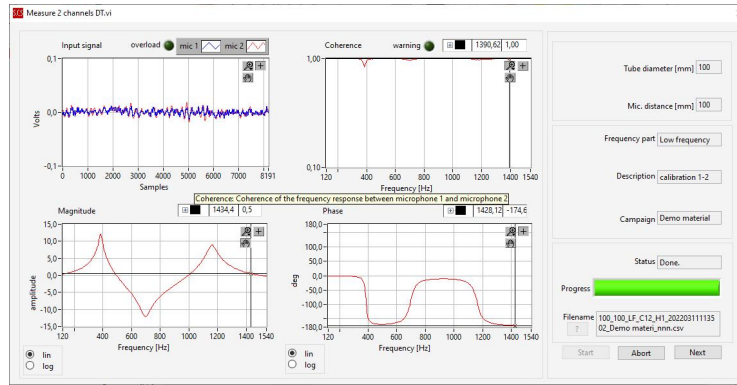
Εικόνα 48: Μενού calibration alpha.

Αφού τοποθετήσουμε το δείγμα διαμέτρου 100 mm (demo material) στον σωλήνα διαμέτρου 100 mm, στην εφαρμογή noise generator επιλέγουμε το αρχείο που θα παράγει το ροζ θόρυβο, αρχικά για εύρος συχνοτήτων 5 – 1600 Hz για τον tube Φ100 mm, και δουλεύουμε στο μενού calibration alpha, όπως δείχνει η Εικόνα 48. Αρχικά ξεκινάμε με το calibrate 1 – 2. Η αριθμηση 1 – 2 υποδεικνύει τα αντίστοιχα μικρόφωνα, το mic 1 είναι εκείνο που βρίσκεται κοντά στο ηχείο και mic 2 θεωρείται το μικρόφωνο που βρίσκεται κοντά στο δείγμα. Η Εικόνα 49 δείχνει τις θέσεις των μικροφώνων, του ηχείου και του δείγματος σωλήνα Kundt κατά τη μέτρηση συντελεστή του α [43].

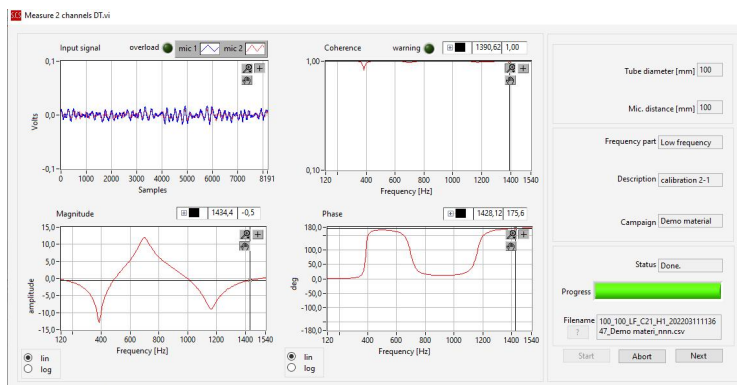


Εικόνα 49: Απεικόνιση σωλήνα kundt SCS 9020 για μέτρηση συντελεστή α .

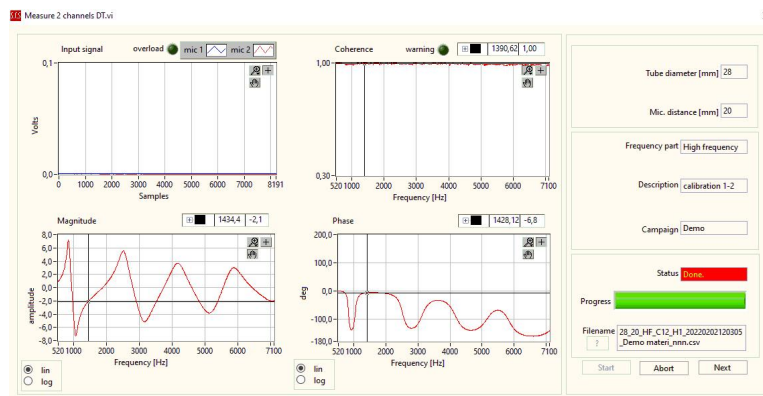
Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία του calibrate 1 – 2 τότε ξεκινά το δεύτερο στάδιο, σημαντικό πριν ξεκινήσει η μέτρησή calibration 2 – 1 θα πρέπει να γίνει η εναλλαγή της θέσης των δυο μικροφώνων. Αφού ολοκληρωθεί και η μέτρηση calibration 2 – 1, τα μικρόφωνα επανέρχονται στις αρχικές τους θέσεις. Όταν ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία μέτρησης, τότε, εξ' ορισμού, το αρχείο βαθμονόμησης α που χρησιμοποιείται είναι το τελευταίο δημιουργημένο αρχείο. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τον σωλήνα διαμέτρου 28 mm [43]. Οι Εικόνες 50-53 δείχνουν τα αποτελέσματα της διαδικασίας βαθμονόμησης συναρτήσεων μεταφοράς μεταξύ των μικροφώνων σε διαφορετική διάταξη ανά σωλήνα. Οι 2 κάτω γραφικές κάθε εικόνας δείχνουν το πλάτος και τη φάση της αντίστοιχης συνάρτησης μεταφοράς μεταξύ των συγκεκριμένων θέσεων των μικροφώνων κάθε φορά.



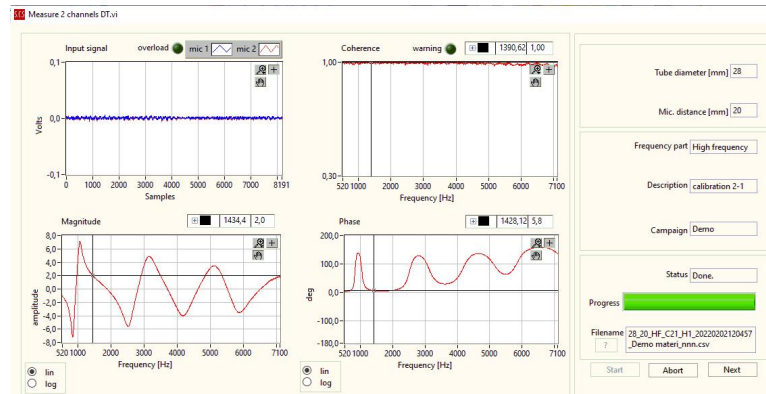
Εικόνα 50: Calibrate 1 – 2 για τις χαμηλές συχνότητες.



Εικόνα 51: Calibrate 2 – 1 για τις χαμηλές συχνότητες.

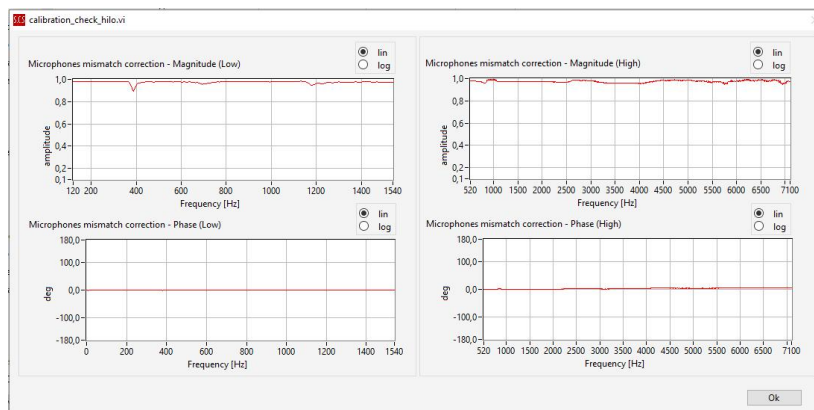


Εικόνα 52: Calibrate 1 – 2 για τις υψηλές συχνότητες.



Εικόνα 53: Calibrate 2 – 1 για τις υψηλές συχνότητες.

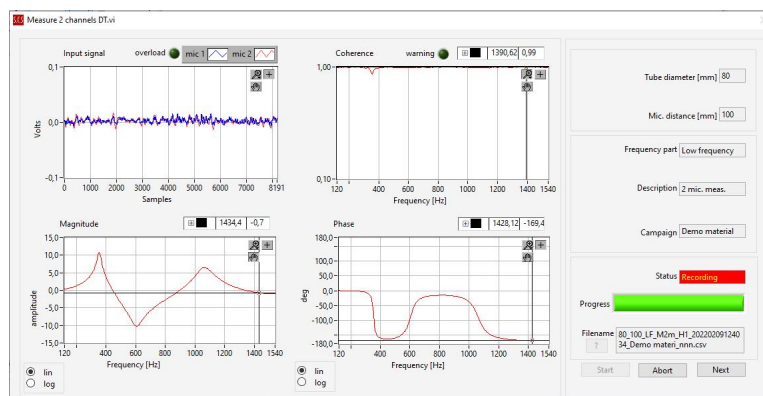
Αφού έχουν ολοκληρωθεί οι μετρήσεις βαθμονόμησης α , έχουμε την δυνατότητα να ελέγξουμε τα αποτελέσματα με την επιλογή check calibration (Εικόνα 48), και τα επιθυμητά αποτελέσματα (που υποδεικνύουν ότι η διαδικασία βαθμονόμησης έγινε σωστά) στα γραφήματα αντιστάθμισης τόσο του πλάτους (το οποίο θα πρέπει να είναι 1) όσο και της φάσης (η οποία θα πρέπει να είναι 0) θα πρέπει να είναι επίπεδά (flat) σε σχέση με τη συχνότητα [43], όπως φαίνεται στην Εικόνα 54.



Εικόνα 54: Έλεγχος calibration α , αντιστάθμιση πλάτους και φάσης για υψηλές και χαμηλές συχνότητες.

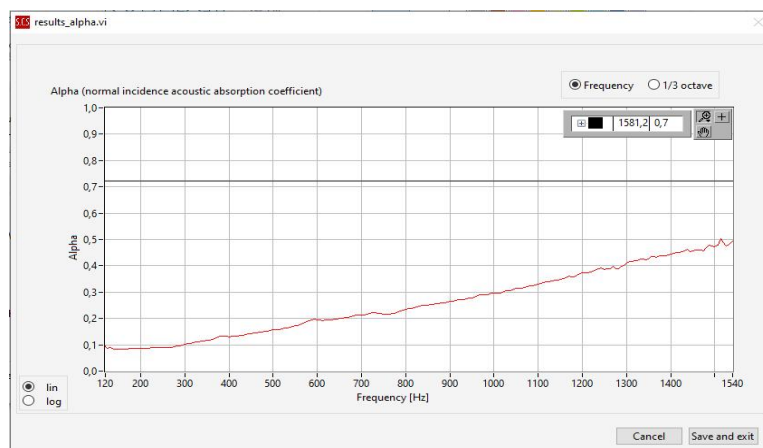
5. Μέτρηση α (Measure alpha).

Το επόμενο βήμα των μετρήσεων με το πρόγραμμα SCS, είναι το measure alpha (μέτρηση α) και αυτή η μέτρηση ολοκληρώνεται επίσης σε δυο στάδια, ένα για τις χαμηλές ($\Phi 100$ mm σωλήνας) και ένα για τις υψηλές ($\Phi 28$ mm σωλήνας) συχνότητες.



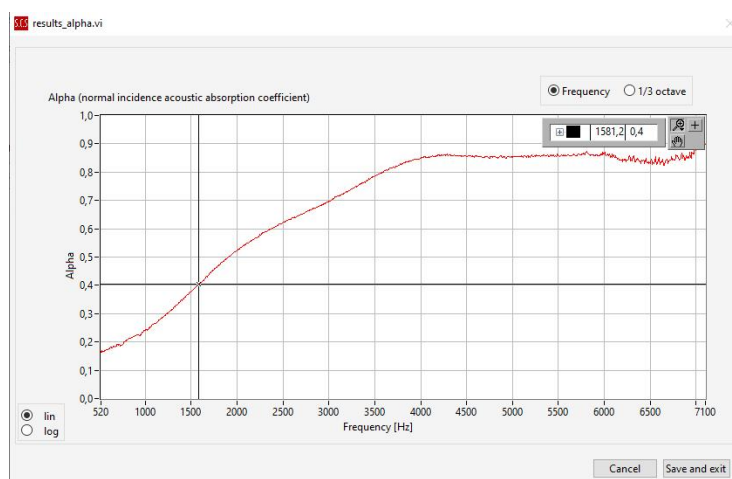
Εικόνα 55: Διαδικασία μέτρησης συντελεστή α .

Όταν ολοκληρωθεί το πρώτο στάδιο η επιλογή πεχτ στη Εικόνα 55 μας οδηγεί στα αποτελέσματα του συντελεστή απορρόφησης α για το εύρος συχνοτήτων από 120 – 1540 Hz. Στην Εικόνα 56 βλέπουμε την αποκτηθείσα καμπύλη του συντελεστή α για χαμηλές συχνότητες (120 – 1540 Hz) [43].



Εικόνα 56: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για συχνότητες 120 Hz – 1540 Hz.

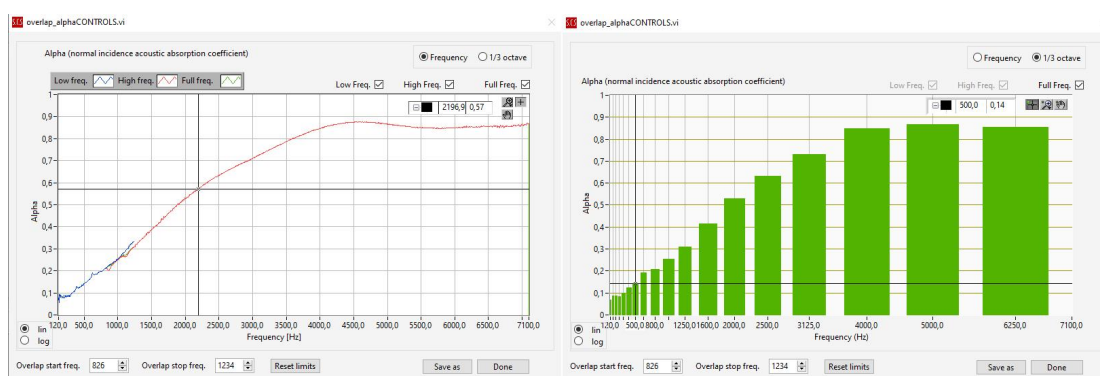
Ακολουθεί η ίδια διαδικασία για τις υψηλές συχνότητες, όπου εκεί το εύρος των συχνοτήτων είναι από 520 – 7100 Hz. Η Εικόνα 57 δείχνει την καμπύλη του συντελεστή α για τις υψηλές συχνότητες (540 – 7100 Hz) [39].



Εικόνα 57: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για συχνότητες 540 Hz – 7100 Hz.

6. Επικάλυψη (Overlap).

Η επιλογή overlap του μενού του προγράμματος SCS μας δίνει τη δυνατότητα να φορτώσουμε τα δημιουργημένα αρχεία τόσο των χαμηλών όσο και των υψηλών συχνοτήτων των μετρήσεων σχετικά με τον συντελεστή α που έχουμε πραγματοποιήσει και να έχουμε μια συνολική εικόνα της απορρόφησης. Στην Εικόνα 58 βλέπουμε την επικάλυψη του sample 1 - demo material [43].

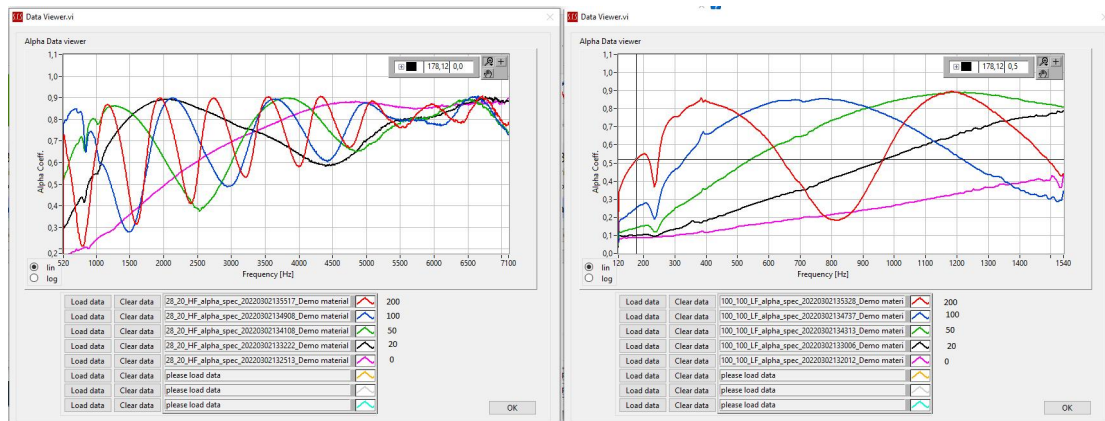


Εικόνα 58: Αριστερά συνολική καμπύλη απόκρισης του α σε όλο το εξεταζόμενο εύρος συχνοτήτων. Δεξιά συντελεστής α ανά 1/3 της οκτάβας 120 Hz – 7100 Hz.

7. Έλεγχος Δεδομένων (Data viewer).

Η τελευταία επιλογή στην μέτρηση του συντελεστή απορρόφηση με τον τρόπο των 2 μικροφώνων είναι αυτή του data viewer. Η επιλογή αυτή μας δίνει την δυνατότητα να φορτώσουμε τα δημιουργημένα αρχεία μας και να έχουμε μια συνολική εικόνα της μεταβολής του συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της συχνότητας για το υλικό που εξετάζουμε. Βέβαια έκτος αυτού μπορούμε να φορτώσουμε μετρήσεις και από

διαφορετικά δείγματα και να προβούμε σε συγκρίσεις και στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Επίσης, π.χ. για το ίδιο δοκίμιο μπορούμε να φορτώσουμε τις μετρήσεις που έχουμε πραγματοποιήσει με διάφορα διάκενα αέρος (air gaps), από τη σύγκριση των οποίων μπορούμε να οδηγηθούμε σε συμπεράσματα τόσο για τα υλικά όσο και για την τοποθέτησή τους και να εκτιμήσουμε τη μέγιστη ηχοαπορροφητικότητα που μπορούμε να εξασφαλίσουμε και σε ποιες συχνότητες. Η Εικόνα 59 είναι χαρακτηριστική του data viewer [43].



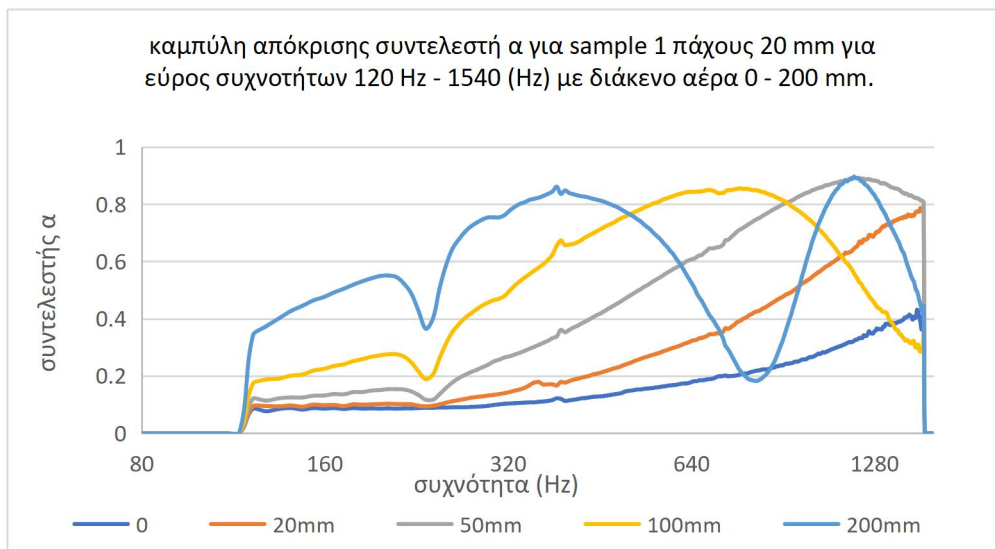
Εικόνα 59: Έλεγχος δεδομένων για το sample 1 με διάκενο αέρος, αριστερά εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz, δεξιά εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz. Οι αριθμοί στα δεξιά δείχνουν το αντίστοιχο διάκενο (0, 20, 50, 100, 200) σε mm.

5.5 Μετρήσεις.

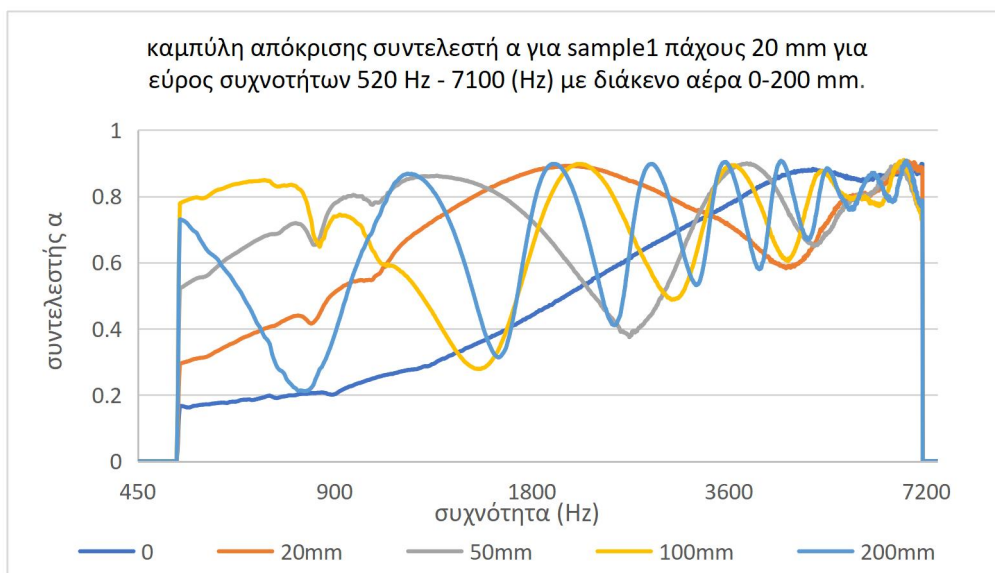
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε αναλυτικά, μέσω γραφημάτων, τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, με τον εξοπλισμό και τις διαδικασίες που ήδη παρουσιάσαμε στις ενότητες 5.1 – 5.4, για τον υπολογισμό του συντελεστή α στα δείγματα που έχουν λάβει μέρος στο πείραμα μας (Πίνακας 2), το οποίο πραγματοποιήσαμε στο εργαστήριο Τεχνολογιών Ηλεκτρονικής και υπολογιστών (ECTLab) του ΠαΔΑ, με ατμοσφαιρικές συνθήκες: υγρασία 50 % \pm 5 % και θερμοκρασία 20°C \pm 2°C.

Οι μετρήσεις του συντελεστή α πραγματοποιήθηκαν χωρίς κενό αέρος και με κενό αέρος μεταξύ του δείγματος και του ακλόνητου (τερματικού) τοίχου του σωλήνα. Τα διάκενα αέρος που εφαρμόστηκαν είναι τα εξής: 0, 20, 50, 100, 200 mm.

5.5.1 Sample 1 πάχους 20 mm και πυκνότητας 200 kg/m³.

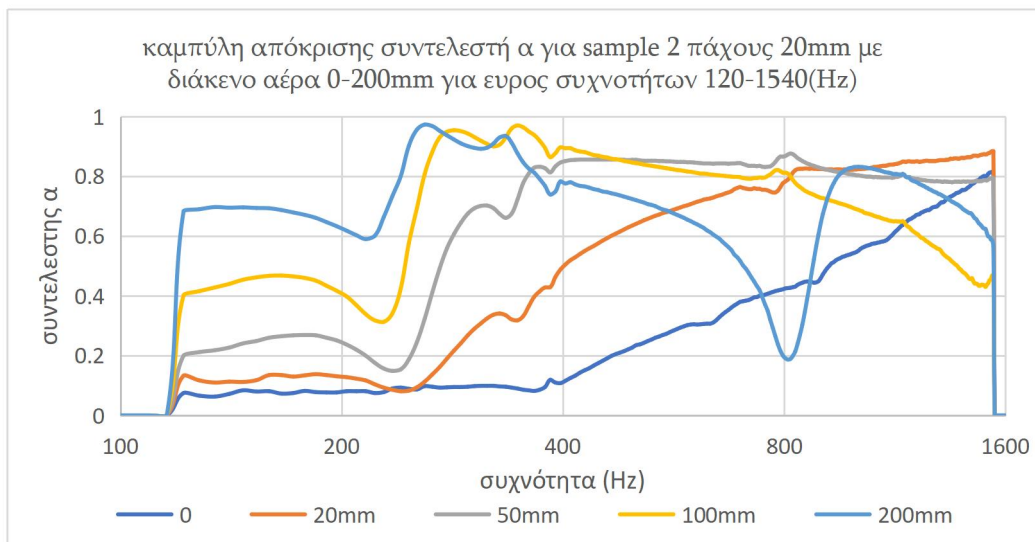


Εικόνα 60: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 1 πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz.

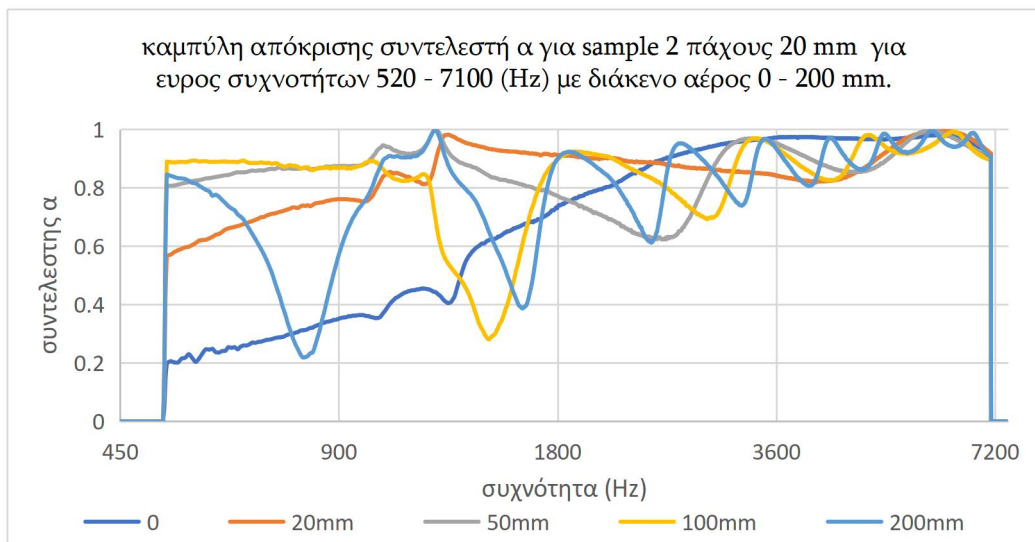


Εικόνα 61: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 1 πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.

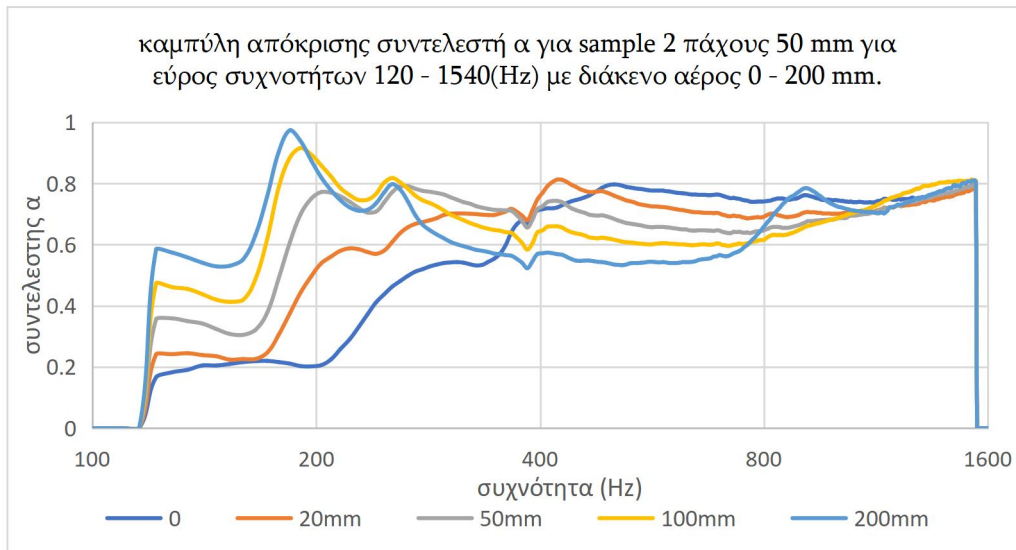
5.5.2 Sample 2 πάχους 20 mm / 50 mm και πυκνότητας 100 kg/m³.



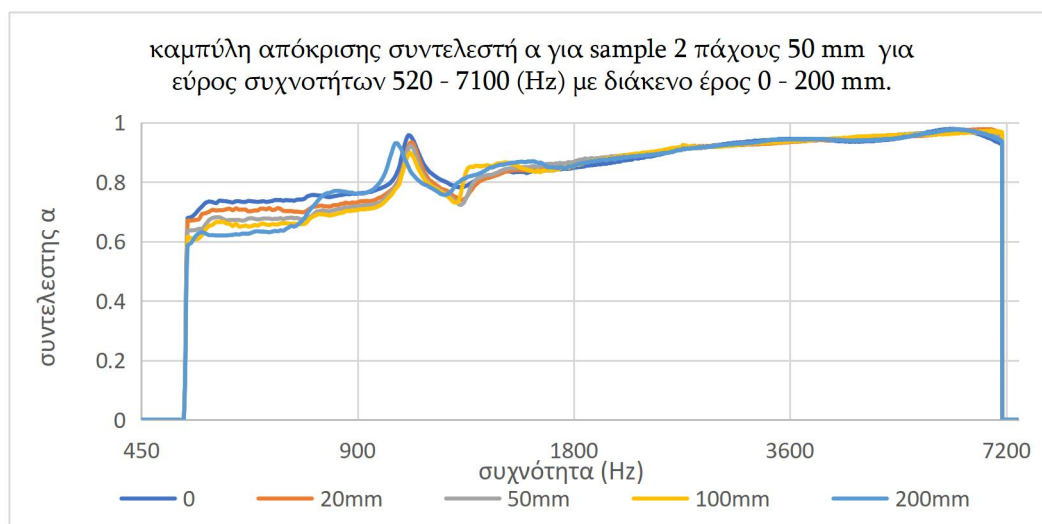
Εικόνα 62: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 2 πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz.



Εικόνα 63: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 2 πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.

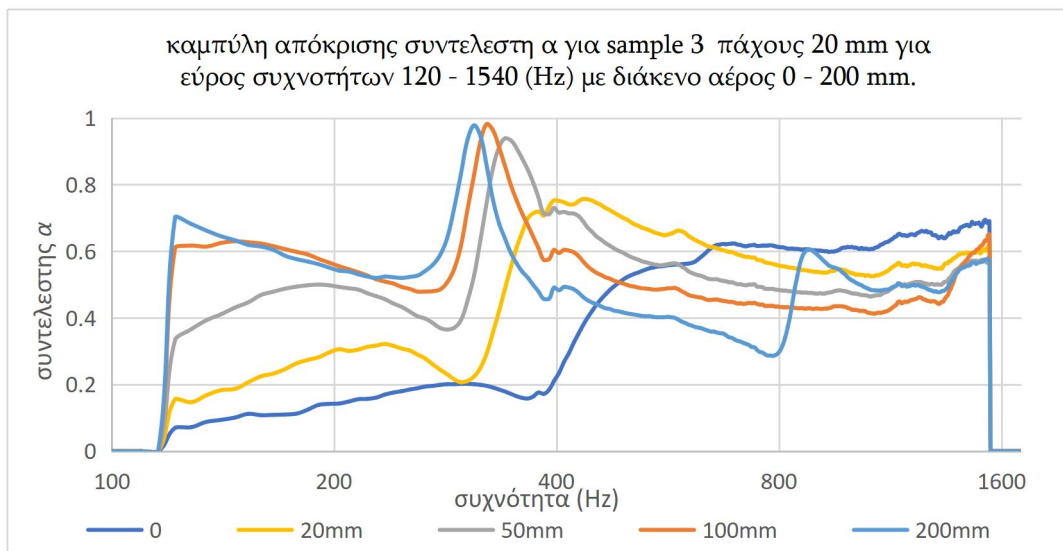


Εικόνα 64: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 2 πάχους 50 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz.

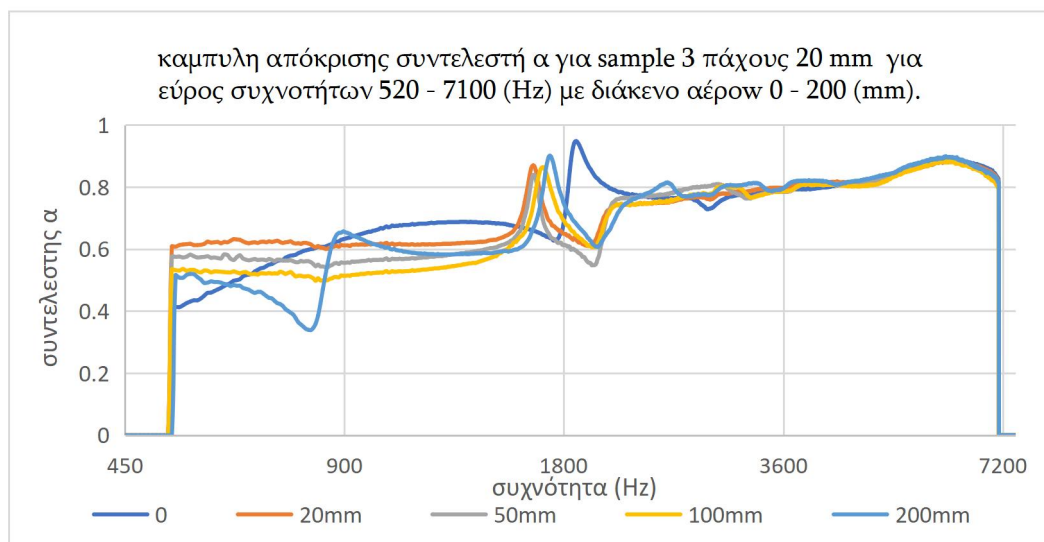


Εικόνα 65: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 2 πάχους 50 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.

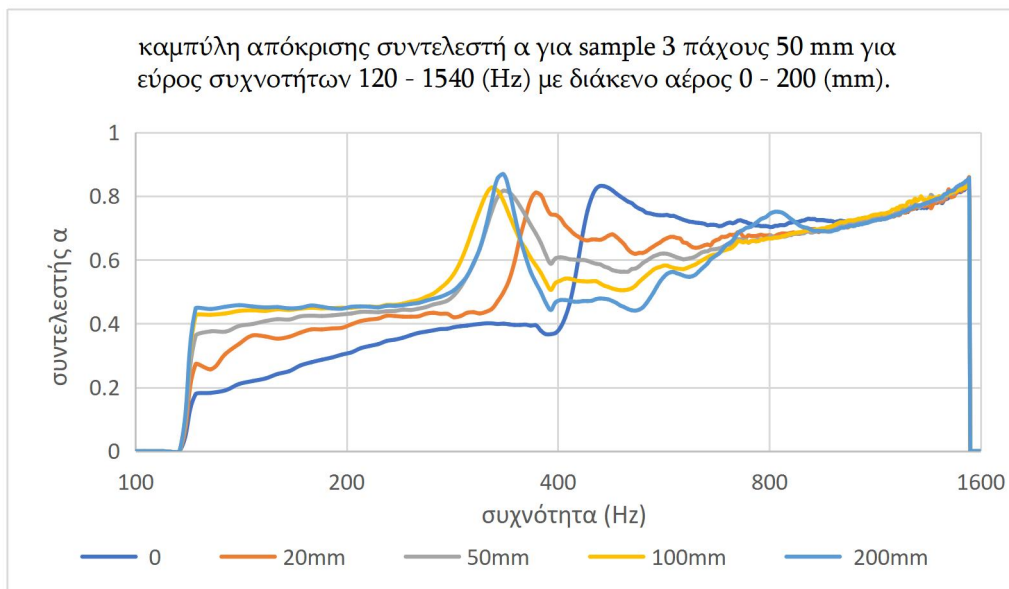
5.5.3 Sample 3 πάχους 20 mm / 50 mm και πυκνότητας 150 kg/m^3 .



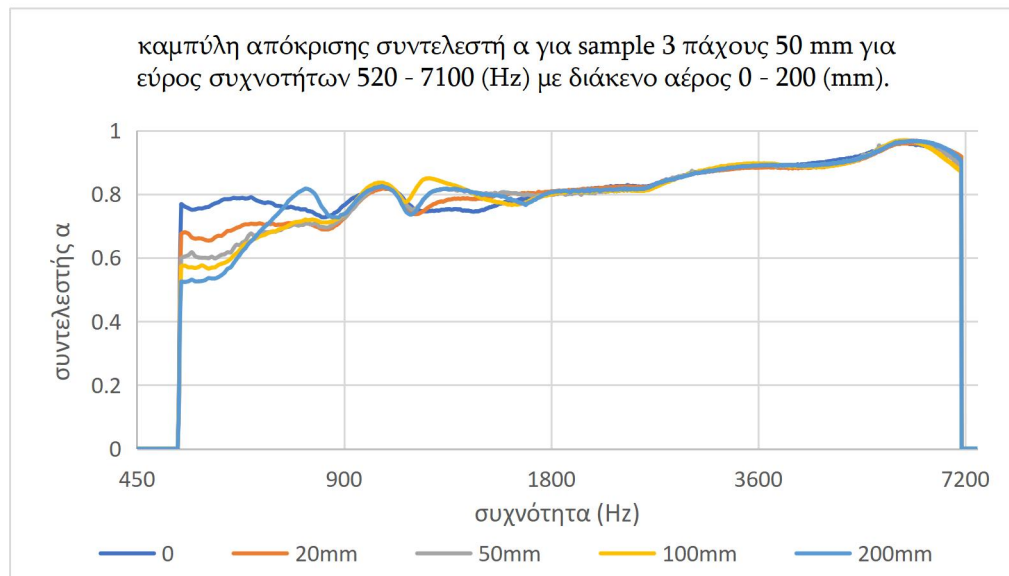
Εικόνα 66: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 3 με πάχος 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz.



Εικόνα 67: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 3 με πάχος 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz - 7100 Hz.

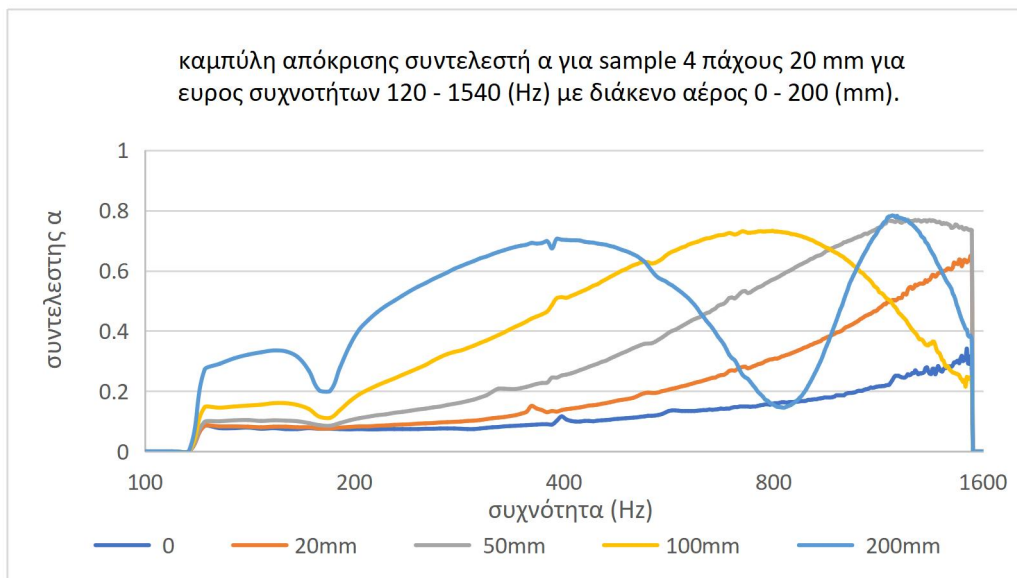


Εικόνα 68: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 3 με πάχος 50 mm με διάκενο αέρος από 0 - 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz - 1540 Hz.

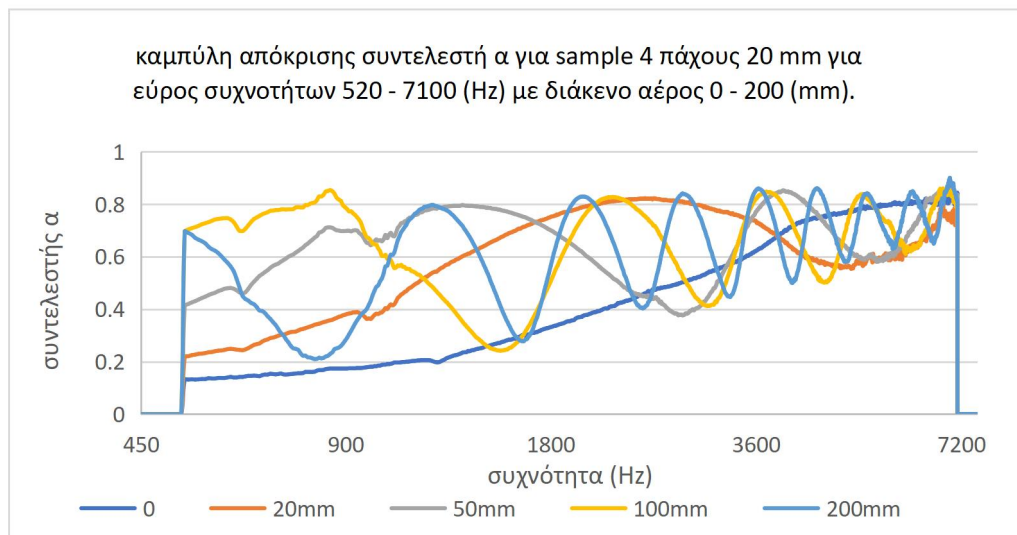


Εικόνα 69: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 3 με πάχος 50 mm με διάκενο αέρος από 0 - 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz - 7100 Hz.

5.5.4 Sample 4 πάχους 20 mm και πυκνότητας 40 kg/m^3 .



Εικόνα 70: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 4 πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz.

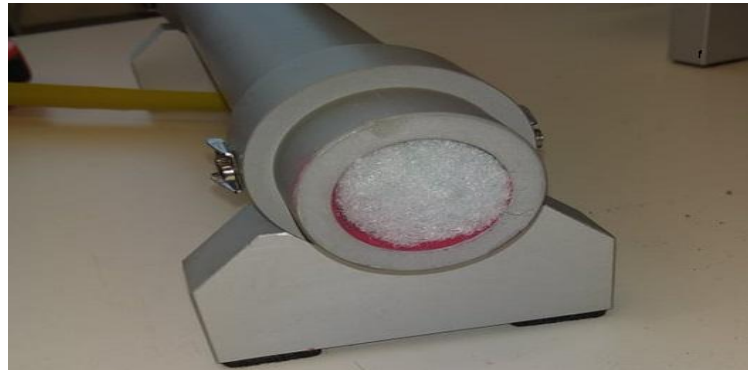


Εικόνα 71: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 4 πάχους 20 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.

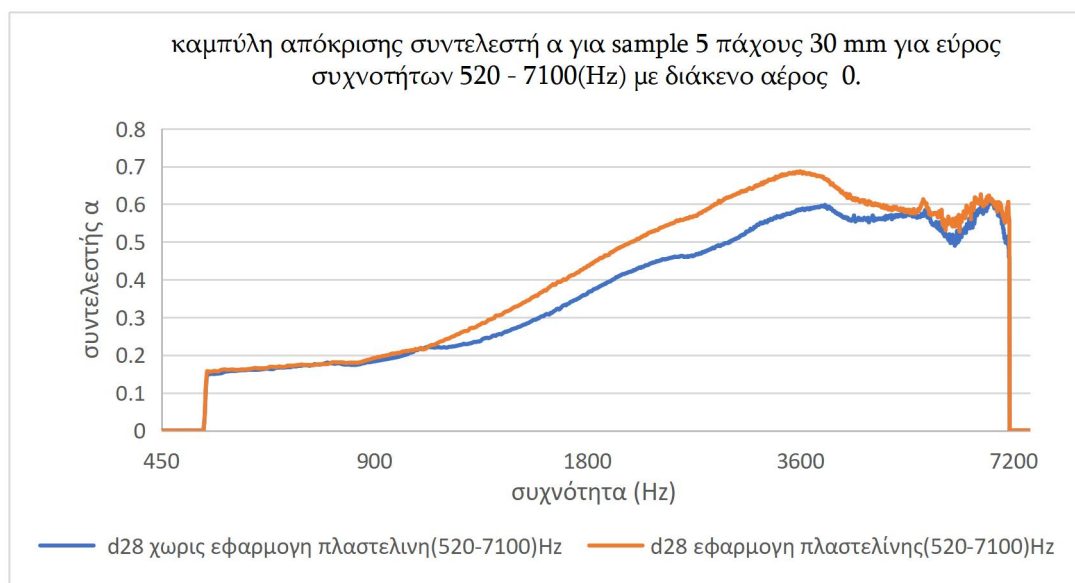
5.5.5 Sample 5 πάχους 30 mm και πυκνότητας 34 kg/m³.

Στις μετρήσεις του δείγματος sample 5, πάχους 30 mm και διαμέτρου 28 mm στο εύρος των υψηλών συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz και για διάκενο αέρος (air-gap) 0 – 200 mm λήφθηκαν δυο περιπτώσεις: η πρώτη περίπτωση ήταν χωρίς εφαρμογή πλαστελίνης στα τοιχώματα του σωλήνα Kundt με Φ28 mm, ενώ η δεύτερη περίπτωση είναι με εφαρμογή πλαστελίνης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 72. Στο γράφημα της Εικόνας 73 η κόκκινη καμπύλη απεικονίζει τον συντελεστή α του sample 5 με εφαρμογή πλαστελίνης, ενώ η μπλε χωρίς εφαρμογή. Η χρήση πλαστελίνης στα τοιχώματα του

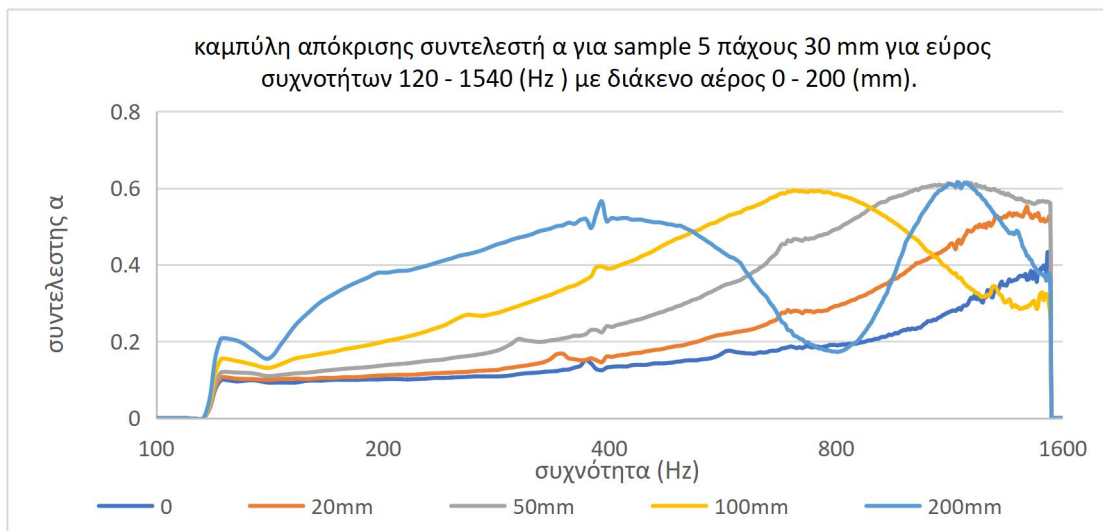
σωλήνα συστήνεται για να αποφύγουμε λανθασμένα και ανακριβή αποτελέσματα [42] λόγω μη τέλει εφαρμογής του δείγματος στα τοιχώματα του σωλήνα (κενά, απ' όπου μπορεί να περνά ελεύθερα αέρας), εξ' αιτίας του ότι κατά την κοπή του συγκεκριμένου δείγματος για την διάμετρο των 28 mm αντιμετωπίσαμε μεγάλη δυσκολία για ομοιόμορφη κοπή.



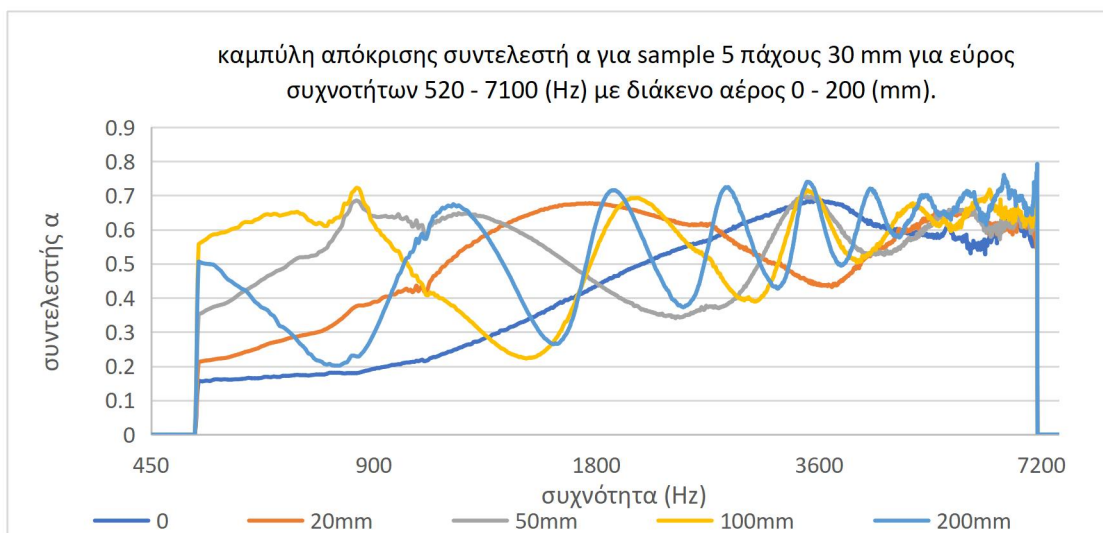
Εικόνα 72: Εφαρμογή πλαστελίνης στον σωλήνα Kundt (28mm) για το sample 5 διαμέτρου 28 mm.



Εικόνα 73: Καμπύλη απόκρισης συντελεστής α για sample 5 πάχους 30 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz με διάκενο αέρος 0 mm.



Εικόνα 74: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 5 πάχους 30 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 120 Hz –1540 Hz.



Εικόνα 75: Καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για sample 5 πάχους 30 mm με διάκενο αέρος από 0 – 200 mm για εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Ανάλυση Αποτελεσμάτων – Συζήτηση

Στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις για την απόκτηση του συντελεστή απορρόφησης ήχου α πορωδών ηχοαπορροφητικών υλικών με χρήση σωλήνων εμπέδησης SCS9020B/K/T60/TL Impedance tube, εφαρμόζοντας την μέθοδο της συνάρτησης μεταφοράς (δύο μικροφώνων). Τα δείγματά εξετάστηκαν στο εύρος συχνοτήτων μεταξύ 120 Hz – 7100 Hz, ενώ για το κάθε δείγμα καταγράφηκαν πέντε μετρήσεις και για τους δύο σωλήνες $\Phi 100$ mm / $\Phi 28$ mm, αφού κάθε φορά το δείγμα επανατοποθετούταν στη θέση υποδοχής, τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν από το σύνολο των μετρήσεων ακολουθούσαν όμοιες συμπεριφορές.

Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν καταγράφηκε η ηχοαπορροφητική συμπεριφορά των εξεταζόμενων υλικών όταν διαφοροποιείται το διάκενο αέρος μεταξύ του δείγματος και του ακλόνητου τοιχώματος, το οποίο αυξάνεται από 0 έως 200 mm. Επίσης μελετήθηκε η ηχοαπορροφητική ικανότητα δείγματος πετροβάμβακα ίδιας πυκνότητας αλλά διαφορετικού πάχους και τέλος μελετήθηκε η συμπεριφορά όμοιων δειγμάτων πολυεστερικής ίνας και πετροβάμβακα, ίδιου πάχους διαφορετικής πυκνότητας.

Η δομή του υλικού είναι ένας παράγοντας όπου επηρεάζει σημαντικά την απορρόφηση του ήχου όπως έχει ήδη αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2. Ένα πορώδες ηχοαπορροφητικό υλικό μπορεί να αποκτήσει μεγαλύτερο συντελεστή απορρόφησης α όταν η πυκνότητα και η αντίσταση ροής του μεγαλώσει και το μέγεθος των πόρων παραμείνει μικρό. Τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν για τα δείγματα των πορωδών ηχοαπορροφητικών υλικών από την διεξαγωγή του πειράματός μας, αν τα δει κανείς συγκριτικά με αυτά που αναφέρονται στα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών παρατηρούμε ότι υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ τους. Οι λόγοι στους οποίους οφείλονται αυτές οι αποκλίσεις είναι ποικίλοι. Ένας βασικός λόγος είναι ότι δυστυχώς η μέθοδος κοπής των δειγμάτων που υιοθετήθηκε δεν ήταν μεγάλης ακριβείας, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία δείγματα τα οποία δεν εφάπτονται σωστά στα τοιχώματα των σωλήνων, είτε είναι μικρότερων διαστάσεων (διαμέτρου) και αφήνουν, έστω και μικρά κενά, είτε είναι μεγαλύτερων διαστάσεων (διαμέτρου) και συμπιέζουν στα όρια κοπής το δείγμα, τείνουν να οδηγούν λανθασμένα αποτελέσματα [13],[42]. Για την αποφυγή (ή ελαχιστοποίηση) τέτοιων σφαλμάτων και για την αύξηση της αξιοπιστίας των μετρήσεων μας δημιουργήσαμε τουλάχιστον 2 δείγματα ίδιων διαστάσεων από το κάθε

υλικό, έτσι ώστε οι μετρήσεις μας να βασίζονται στις αρχές της αναπαραγωγιμότητας και της επαναληψιμότητας.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τα δείγματα του πετροβάμβακα sample 2 και sample 3 που είχαμε να διαχειριστούμε, παρατηρήσαμε ότι η μορφολογία τους αποτελούταν από πολλές στρώσεις των υλικών, με αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολο να γίνει κοπή ακρίβειας, στο επιθυμητό πάχος του δείγματος, μιας και οι στρώσεις δεν είναι επίπεδες αλλά κυματώδες. Στην Εικόνα 76 βλέπουμε μια περίπτωση δείγματος πετροβάμβακα που δεν έχει προετοιμαστεί σωστά λόγω προβλημάτων στην κοπή.



Εικόνα 76: Δείγμα πετροβάμβακα μη προετοιμασμένο σωστά.

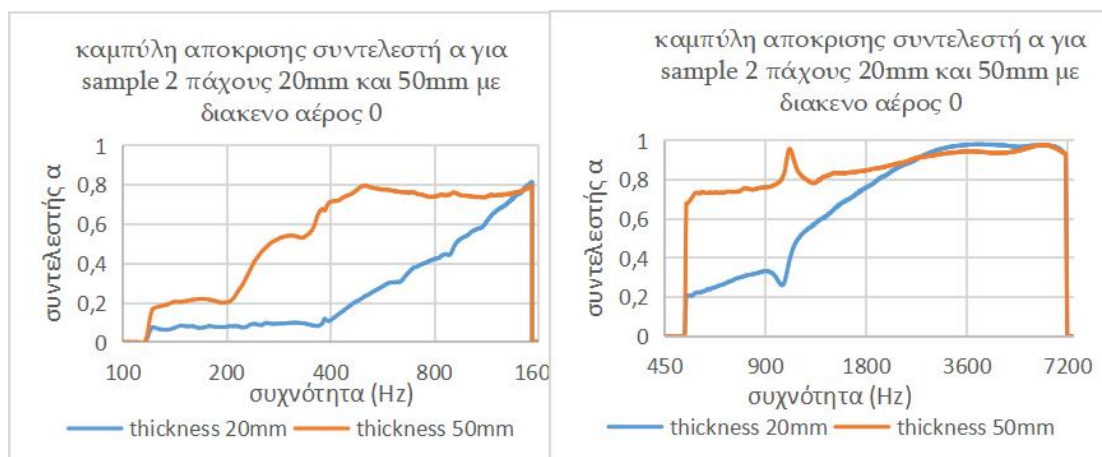
Στο σημείο αυτό μπορούμε να αναφέρουμε ότι μια βέλτιστη λύση για την κοπή των δειγμάτων, ύστερα από σχετική αναζήτηση, την προσφέρει η κοπή με laser cutter, όπου οι διαστάσεις των δειγμάτων τόσο της διαμέτρου όσο και του πάχους κόβονται με ακρίβεια.

Ένας ακόμα επιπλέον λόγος που θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας είναι ότι οι αποκλίσεις στις τιμές οφείλονται και στο γεγονός ότι δεν μας είναι γνωστός ο τρόπος με τον οποίο έχουν πραγματοποιήσει τις μετρήσεις οι εκάστοτε κατασκευαστές. Όπως περιγράφουμε και στο Κεφάλαιο 2, υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να μετρηθεί ο συντελεστής απορρόφησης ήχου α , η τιμή του οποίου μπορεί να διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή αλλά και μεταξύ διαφορετικών μεθόδων μέτρησης για το ίδιο υλικό με την ίδια πυκνότητά.

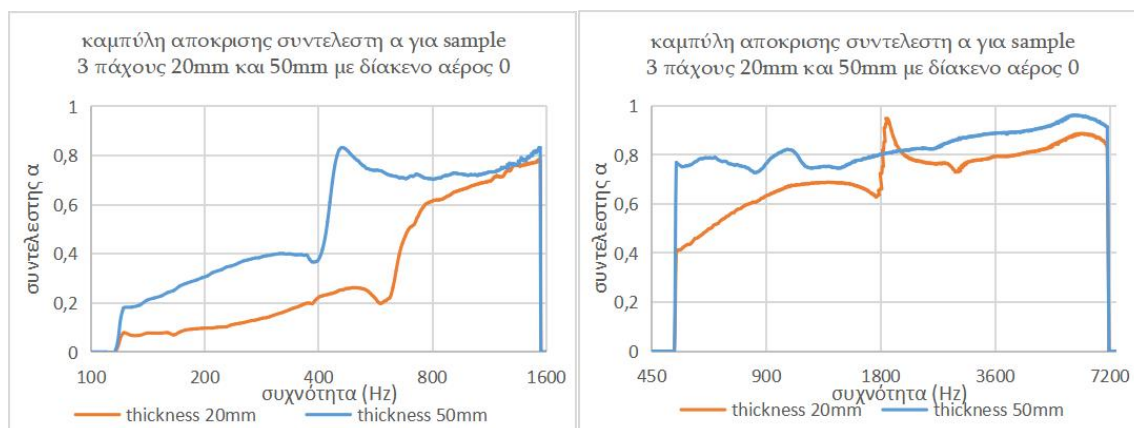
6.1 Η επίδραση του πάχους του υλικού.

Για την μελέτη της επίδρασης του πάχους του υλικού στο συντελεστή απορρόφησης ήχου α , τα υπό εξέταση υλικά που έλαβαν μέρος είναι 2 είδη πετροβάμβακα, συγκεκριμένα το sample 2 με πυκνότητα 150 kg/m^3 και το sample 3 με

πυκνότητα 100 kg/m^3 . Τόσο για το sample 2 όσο και για το sample 3 έχουν κοπεί δείγματα με δύο πάχη των 20mm και 50 mm. Το διάκενο αέρα είναι 0 mm.



Εικόνα 77: Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το δείγμα sample 2 για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 7100 Hz με διαφορετικό πάχος 20 mm και 50 mm με διάκενο αέρα 0 mm.



Εικόνα 78: Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης για το δείγμα sample 3 για εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 7100 Hz με διαφορετικό πάχος 20 mm και 50 mm με διάκενο αέρα 0.

Από τις Εικόνες 77 και 78 για τα δείγματα sample 2 και sample 3 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι, με την πυκνότητα να είναι ίδια, το παχύτερο υλικό έχει καλύτερες τιμές ηχοαπορρόφησης. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι το πάχος του υλικού επηρεάζει την απόδοση των υλικών στην ικανότητα τους να απορροφούν τον ήχο για εύρος συχνοτήτων μεταξύ 120 Hz – 1800 Hz, αυτό οφείλεται και στο γεγονός ότι χαμηλή συχνότητα σημαίνει μεγαλύτερο μήκος κύματος οπότε είναι προφανές ότι όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα εισόδου του ήχου ($f = c/\lambda$) τόσο το μήκος κύματος του ήχου είναι μεγαλύτερο, οπότε το μέγιστο της σωματιδιακής ταχύτητας του ήχου για

μεγάλα μήκη κύματος αναπτύσσεται εκτός των υλικών μικρού πάχους (εδώ θυμίζουμε ότι η μέγιστη απορρόφηση σε πορώδη ηχοαπορροφητικά παρατηρείται στα μήκη κύματος που η σωματιδιακή ταχύτητα του ήχου λαμβάνει το μέγιστο της εντός του υλικού), με αποτέλεσμα μικρό μέρος της ηχητικής ενέργειας να μετατρέπεται σε θερμότητα, οπότε δεν υπάρχει υψηλή απορρόφηση μεταξύ των συχνοτήτων 120 Hz – 1500 Hz για τα δείγματα πάχους 20 mm. Παράλληλα, παρατηρούμε ότι για τα ίδια υλικά ίδιας πυκνότητας με μεγαλύτερο πάχος 50 mm για συχνότητες μεταξύ 400 Hz – 7100 Hz η τιμή του συντελεστή απορρόφησης ήχου α είναι μεγάλη.

Γενικά, σύμφωνα και με άλλες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, προκειμένου να επιτευχθεί μείωση των ήχων χαμηλών συχνοτήτων, προτείνεται τα ακουστικά υλικά που χρησιμοποιούνται να είναι παχύτερα ώστε να παρέχεται επαρκής διαδρομή ώστε μετατραπεί η ηχητική ενέργεια σε θερμότητα όταν τα ηχητικά κύματα διέρχονται μέσα από αυτά [55].

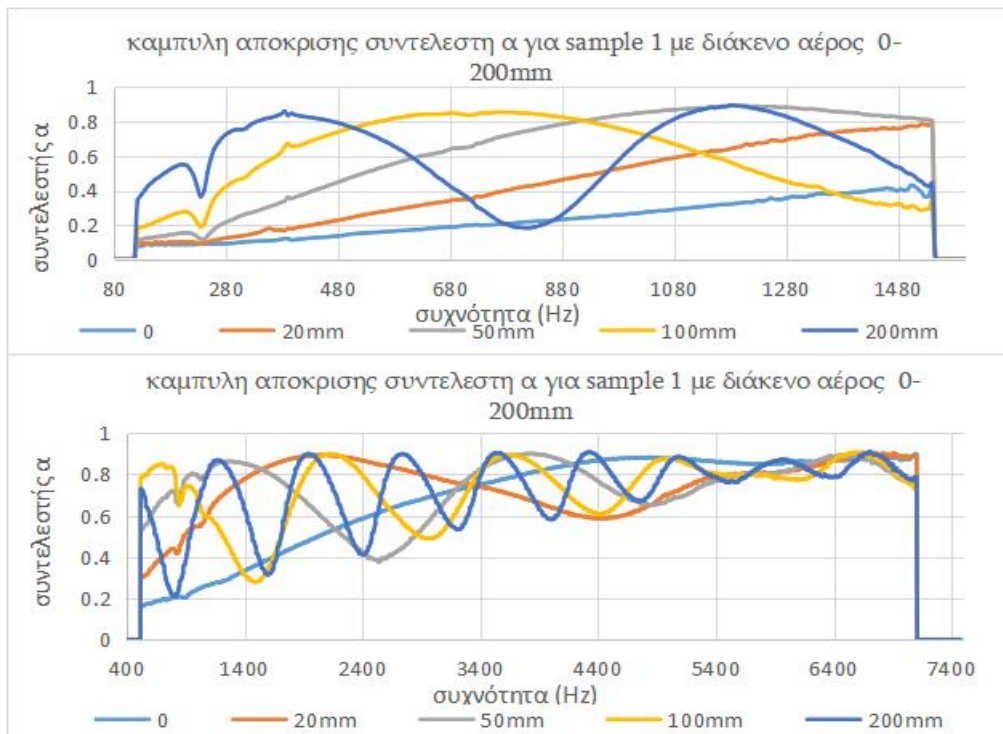
6.2 Η επιρροή του διάκενου αέρα (air gap).

Η απόσταση μεταξύ δείγματος και ακλόνητου τοιχώματος – εμβόλου μέσα στον ακουστικό σωλήνα είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τον συντελεστή απορρόφησης ήχου α .

Για την μελέτη της επίδρασης του διάκενου αέρα στον συντελεστή απορρόφησης ήχου α , όλα τα υπό εξέταση υλικά έλαβαν μέρος. Τα βάθη κοιλότητας που εφαρμόσαμε σε όλα τα δείγματα ήταν 0, 20, 50, 100 και 200 mm. Στο καθένα από τα υπό εξέταση υλικά η πυκνότητα και το πάχος τους παραμένουν σταθερά.

Δείγματα πολυεστέρα

Sample 1



Εικόνα 79: Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το δείγμα sample 1 πάχους 20 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.

Για το sample 1 παρατηρούμε από την Εικόνα 79 ότι ο συντελεστής απορρόφησης ήχου αυξάνεται καθώς αυξάνεται το διάκενο αέρος, συγκεκριμένα για διάκενο αέρος από 0 – 50 mm και για συχνότητες μεταξύ 120 Hz – 1540 Hz παρατηρούμε ότι ο συντελεστής α αυξάνεται για να φτάσει στη μέγιστη τιμή $\alpha = 0,87$ για διάκενο αέρος 50 mm και συχνότητα $f = 1270$ Hz. Επίσης, παρατηρούμε ότι στα διάκενα των 100 mm και 200 mm η συμπεριφορά απορρόφησης του δοκιμίου μας μοιάζει με περιοδική. Συγκεκριμένα για το διάκενο 100 mm και για συχνότητες 120 Hz – 1540 Hz ο συντελεστής α αυξάνεται για να φτάσει σε μια μέγιστη τιμή $\alpha = 0,8550$ για $f = 765$ Hz και σταδιακά αρχίζει να μειώνεται.

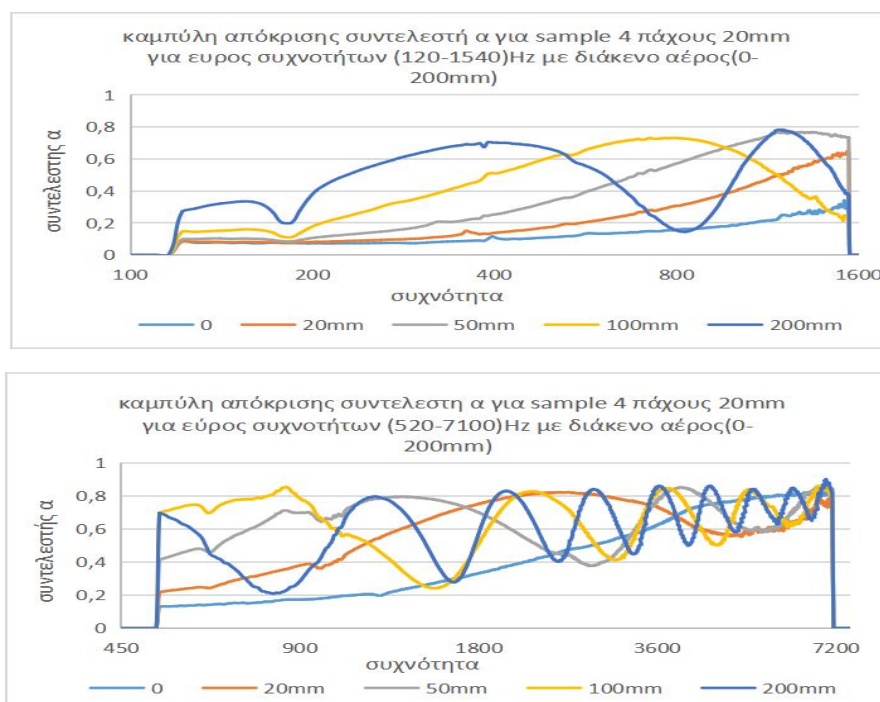
Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και για διάκενο αέρος 200 mm για το εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο σωλήνα $\Phi 100$ mm, όπου η μέγιστη τιμή είναι $\alpha = 0,848$ στα $f = 396$ Hz και έπειτα ξεκινά να φθίνει για να φτάσει $\alpha = 0,183$ στα $f = 815$ Hz, ενώ μετά βλέπουμε ότι για $f = 1203$ Hz η μέγιστη τιμή $\alpha = 0.89$ το ίδιο περιοδικό φαινόμενο συνεχίζεται και για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο σωλήνα $\Phi 28$ mm για συχνότητες 520 Hz – 7100 Hz.

Οι προαναφερόμενες περιοδικότητες πρακτικά επιβεβαιώνουν ότι, όπως αναμένεται από τη θεωρία, η μέγιστη απορρόφηση σε πορώδη ηχοαπορροφητικά παρατηρείται στα μήκη κύματος που η σωματιδιακή ταχύτητα του ήχου λαμβάνει το μέγιστο της εντός του υλικού. Αυτό που βλέπουμε στις μετρήσεις μας είναι ότι σε μεγάλα διάκενα (100 mm και 200 mm) και για μήκη κύματος αρκετά μεγαλύτερα από

το πάχος του υλικού, η επίδραση της θέσης του μεγίστου της σωματιδιακής ταχύτητας εντός του υλικού στον συντελεστή απορρόφησης είναι εμφανής για κάποια θεμελιώδη συχνότητα αλλά και κάποιες από τις αρμονικές τις.

Συμπεραίνουμε επίσης, από τα αποτελέσματα μας, ότι για το sample 1 το διάκενο από 0 σε 50 mm μας προσδίδει αυξημένους συντελεστές απορρόφησης ήχου α , ουσιαστικά παρατηρούμε ότι οι μέγιστες κορυφές εμφανίζονται στις μεσαίες συχνότητες έως $f = 3400$ Hz. Σε σύγκριση με την καμπύλη απόκρισης του συντελεστή α χωρίς διάκενο αέρα, όλες οι μέγιστες τιμές α με διάκενα αέρα από 20 mm – 200 mm μετατοπίζονται προς χαμηλότερες συχνότητες.

Sample 4



Εικόνα 80: Σύγκριση συντελεστή απορρόφησης α για το δείγμα sample 4 πάχους 20 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.

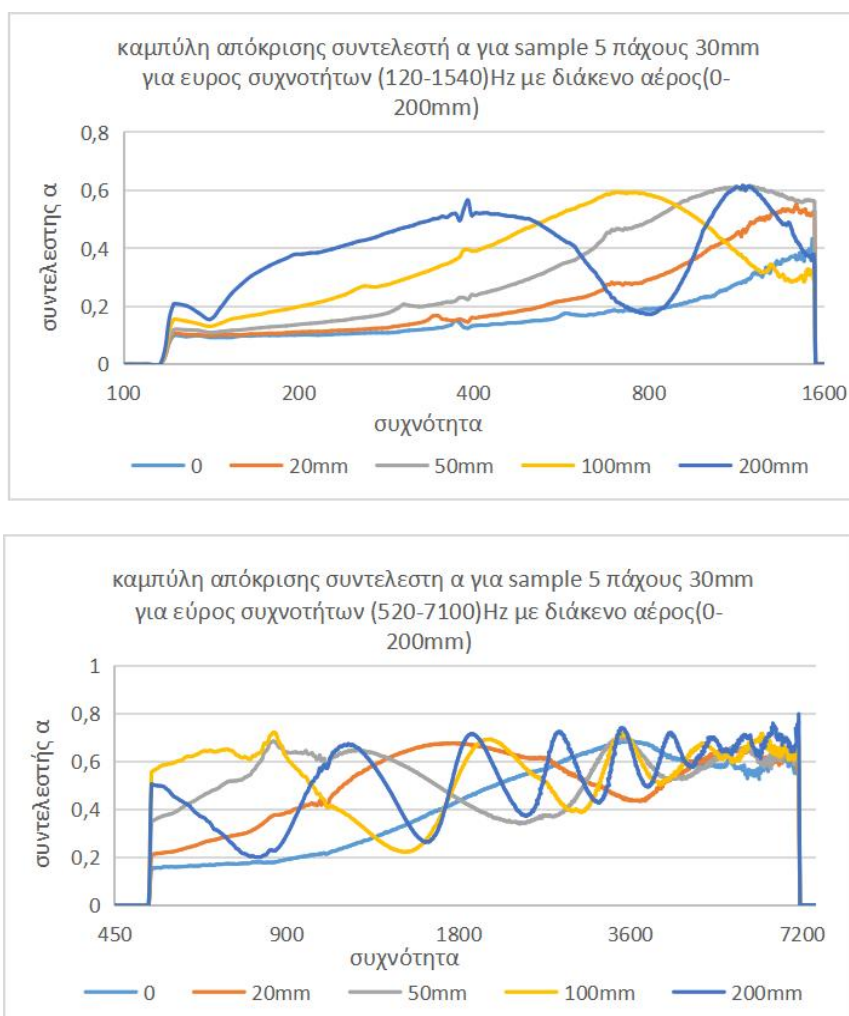
Για το sample 4 πάχους 20 mm στο εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz παρατηρούμε ότι η εφαρμογή διάκενου αέρα 20 mm έχει σχεδόν διπλασιάσει το συντελεστή απορρόφησης ήχου στις συχνότητες 1 kHz – 1,6 kHz. Επίσης, παρατηρούμε ότι για διάκενο 50 mm ο συντελεστής έχει αυξηθεί σημαντικά από την συχνότητα των 600 Hz με $\alpha = 0,4$ σε σχέση με τον συντελεστή με μηδενικό διάκενο $\alpha = 0,1$. Στο διάκενο 100 mm έχουμε σημαντική αύξηση από την συχνότητα $f = 380$ Hz με $\alpha = 0,4$ με ανώτατη τιμή $\alpha = 0,73$ στη συχνότητα $f = 800$ Hz. Τέλος, για διάκενο 200 mm έχουμε για συχνότητα $f = 200$ Hz το συντελεστή απορρόφησης να έχει διπλασιαστεί σε σύγκριση με το συντελεστή χωρίς εφαρμογή διάκενου με ανώτατη τιμή στα $f = 400$ Hz, $\alpha = 0,71$. Στο εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή διάκενου 20

mm ο συντελεστής απορρόφησης αυξάνεται σημαντικά μεταξύ των συχνοτήτων 900 Hz – 4200 Hz όπου η μέγιστη τιμή που λαμβάνουμε είναι $\alpha = 0,81$ για $f = 2,4$ kHz, ενώ έπειτα από εκείνη την τιμή αρχίζει να φθίνει.

Με την εφαρμογή διάκενου αέρα 50 mm, 100 mm, 200 mm παρατηρούμε οι μέγιστες τιμές του συντελεστή απορρόφησης για τον απορροφητή μετακινούνται προς μικρότερες συχνότητες. Ένα φαινόμενο αναμενόμενο μιας και όπως ήδη γνωρίζουμε η μετατροπή της ακουστικής ενέργειας σε θερμότητα συνδέεται με την με τη μέγιστη σωματιδιακή ταχύτητα, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 13, [20] με δεδομένο ότι η σωματιδιακή ταχύτητα μηδενίζεται στο ακλόνητο τοίχωμα πίσω από το δείγμα. Η ακουστική ταχύτητα αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το τοίχωμα, ενώ το πρώτο μέγιστο της σωματιδιακής ταχύτητας του ήχου επιτυγχάνεται σε απόσταση $l = \lambda/4$, όπου λ είναι το μήκος κύματος στο δεδομένο περιβάλλον.

Sample 5

Σχετικά με το sample 5 παρατηρούμε ότι ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά με τα sample 1, sample 4 και γενικότερα από τις καμπύλες απόκρισης παρατηρούμε ότι το διάκενο αέρος 20 mm είναι αυτό που το ωφελεί κυρίως, ο συντελεστής απορρόφησης ήχου α του απορροφητή αυξάνεται σε ένα μεγάλο φάσμα συχνοτήτων μεταξύ 1,6 – 4,0 kHz. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η εφαρμογή και των υπόλοιπων διάκενων αέρα οδηγούν σε αύξηση, όμως λόγω της αύξησης της απόστασης μεταξύ απορροφητή και ακλόνητου σημείου μεγαλώνει η περιοδική τάση του δείγματος με μέγιστες και ελάχιστες τιμές απορρόφησης.



Εικόνα 81: Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το δείγμα sample 5 πάχους 30 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.

Για την ανάλυση των συντελεστών ηχοαπορρόφησης των δειγμάτων πολυεστέρα με διάκενο αέρα από 20 mm – 200 mm οι τιμές που λαμβάνονται υποδεικνύουν ότι ανάλογα το υπό εξέταση δείγμα η εφαρμογή αυτή είναι αποτελεσματική στην απορρόφηση ηχητικών κυμάτων σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, ιδιαίτερα πάνω από τα 500 Hz. Σύμφωνα με τα διαγράμματα, σε όλα τα διάκενα αέρα υπάρχουν βελτιώσεις στις συχνότητες των ηχητικών κυμάτων που απορροφούνται σε σύγκριση με το διάγραμμα με μηδενικό διάκενο αέρα.

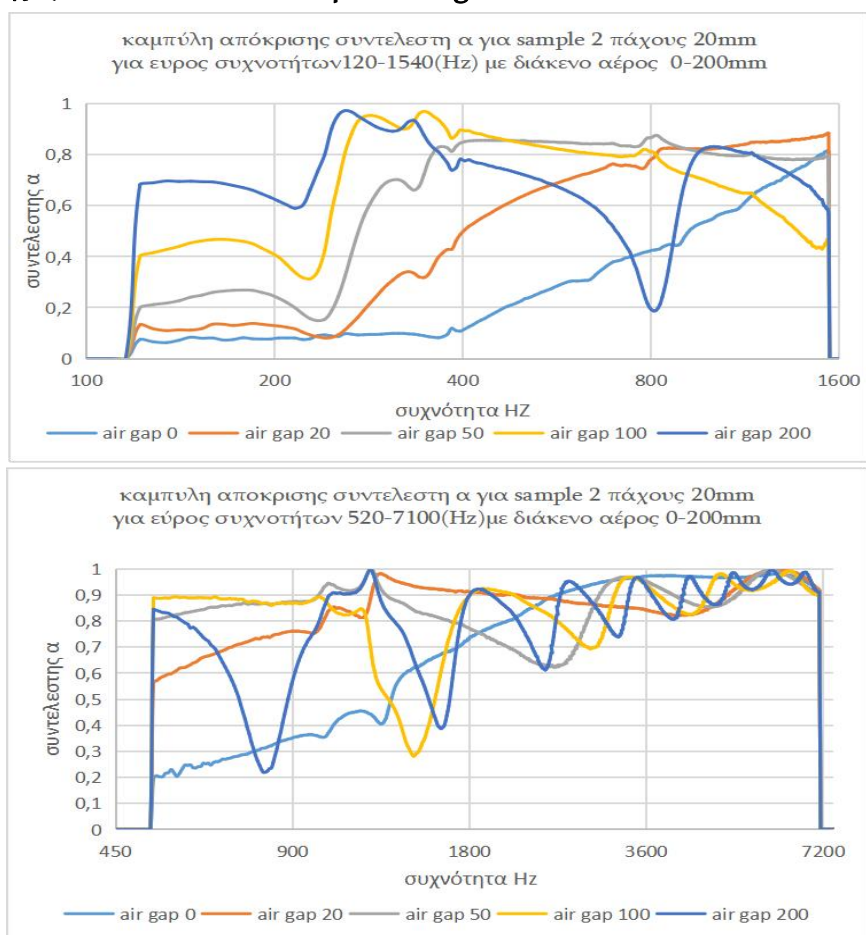
Η διακύμανση της απορρόφησης που παρατηρείται, ανάλογα με το διάκενο αέρα που θα εφαρμόσουμε για τα δείγματα πολυεστέρα sample 1, sample 4 και sample 5, μας δίνει πληροφορίες που μπορούμε να αξιοποιήσουμε ανά περίπτωση. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που θέλουμε να επιτύχουμε σχετικά μεγάλη απορρόφηση της τάξεως του $\alpha = 0,8$ μεταξύ των συχνοτήτων 280 Hz – 480 Hz ο απορροφητής sample 1 με διάκενο 200 mm επιτυγχάνει αυτές τις τιμές.

Είναι προφανές, από τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων που φαίνονται στην Εικόνα 79, την Εικόνα 80 και την Εικόνα 81, ότι η εφαρμογή διακένου αέρα έχει θετική επίδραση στην απορρόφηση ήχου. Επιπλέον, για το ίδιο πάχος υλικού, κάθε δείγμα πολυεστέρα συμπεριφέρεται διαφορετικά ανάλογα με το διάκενο αέρα που θα εφαρμοστεί, ενώ επίσης παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση του διακένου αέρα τόσο η μέγιστη μετατόπιση κορυφής κινείται προς χαμηλότερες συχνότητες. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει μια βέλτιστη τιμή για ένα διάκενο αέρα πέρα από το οποίο δεν παρατηρείται μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες απορρόφησης ήχου.

Επομένως, η διαφορετική απόσταση του διακένου αέρα που εφαρμόζεται προσδίδει διαφορετικό συντελεστή απορρόφησης στα δείγματα μας.

Δείγματα πετροβάμβακα.

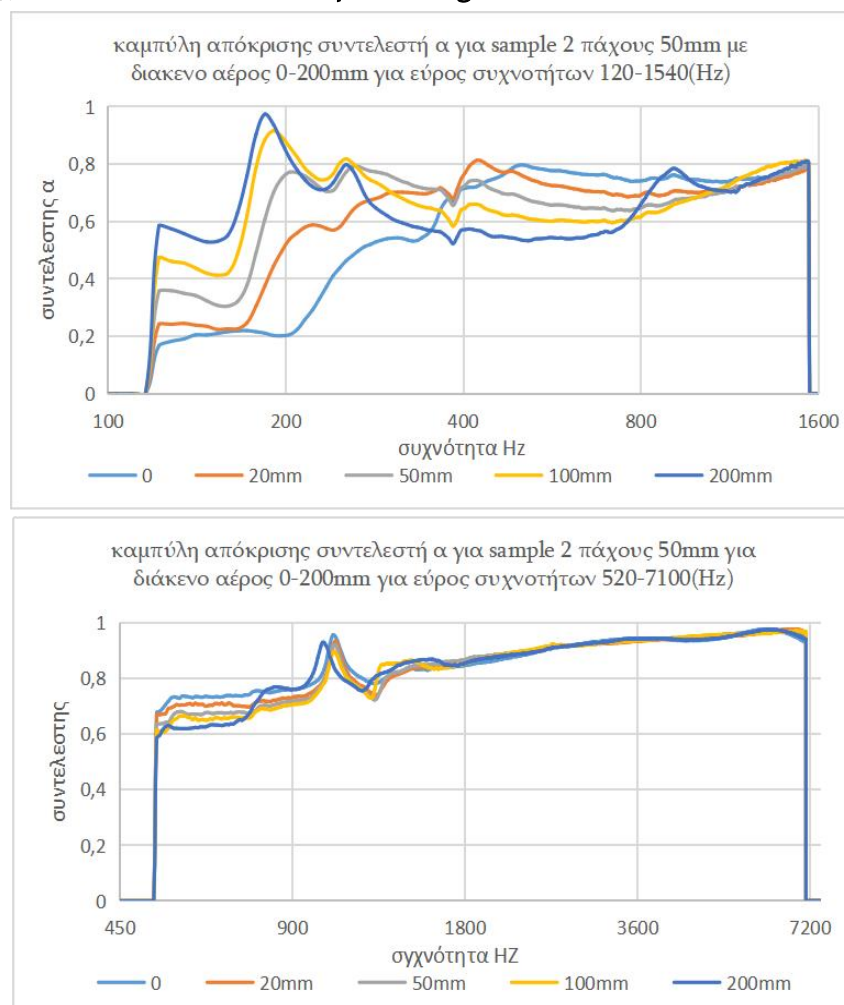
Sample 2: πάχος 20 mm και πυκνότητα 100 kg/m³



Εικόνα 82: Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το δείγμα sample 2 πάχους 20 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.

Για το sample 2 πάχους 20 mm παρατηρούμε από την Εικόνα 82 ότι η εφαρμογή διάκενου αέρα 200 mm για το εύρος συχνοτήτων 120 – 220 Hz προσδίδει τη μέγιστη δυνατή απορρόφηση που είναι $\alpha = 0,7 - 0,6$. Επιπλέον, το διάκενο αέρος 100 mm για τις συχνότητες 520 Hz – 1020 Hz δίνει μια σταθερή τιμή απορρόφησης της τάξεως του $\alpha = 0,89$ με μικρές αυξομειώσεις και έπειτα ακολουθεί μια περιοδική μορφή με μέγιστα και ελάχιστα. Αυτό που επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι ότι το διάκενο αέρος 20 mm προσδίδει στο υλικό μας μεγάλη απορρόφηση ήχου για το εύρος συχνοτήτων μεταξύ 800 Hz – 4450 Hz της τάξεως του $\alpha = 0,8$ με ανοδική τάση, όπου στη συχνότητα των 1650 Hz έχει την τιμή $\alpha = 0.95$ και ακολουθεί μια καθοδική τάση που φτάνει έως το $\alpha = 0,85$ για την συχνότητα των 4430 Hz. Αυτό που παρατηρούμε και σε αυτή τη περίπτωση δείγματος είναι ότι με την εφαρμογή διάκενου αέρα στις συχνότητες 120Hz – 1540Hz η απορρόφηση μετατοπίζεται προς τις μικρότερες συχνότητες

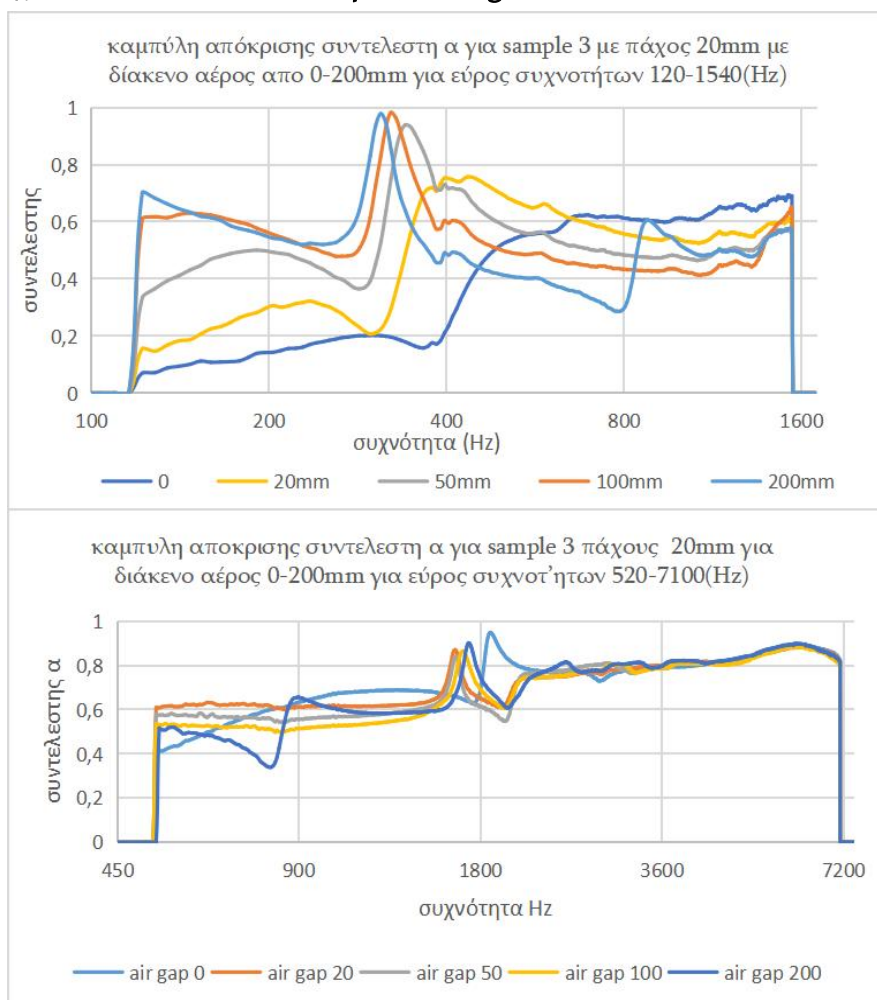
Sample 2 πάχους 50 mm και πυκνότητα 100 kg/m³.



Εικόνα 83: Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το sample 2 πάχους 50 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.

Για το sample 2 με πάχος 50 mm από την Εικόνα 83 παρατηρούμε ότι το διάκενο αέρος στο εύρος συχνοτήτων 1300 Hz – 7200 Hz δεν επηρεάζει τον συντελεστή απορρόφησης ήχου ο οποίος κυμαίνεται στο $\alpha = 0,85$, με ανοδική τάση και από 3600 Hz – 7200 Hz να ξεπερνάει την τιμή $\alpha = 0,9$. Για τις συχνότητες μεταξύ 120 Hz – 160 Hz επιτυγχάνεται ο μέγιστος συντελεστής $\alpha = 0,6$ για διάκενο αέρος 200 mm.

Sample 3 πάχους 20 mm και πυκνότητας 150 kg/m³



Εικόνα 84: Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το sample 3 πάχους 20 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.

Για το sample 3 με πάχος 20 mm από την Εικόνα 84 παρατηρούμε όπως και στο sample 2 ότι μεταξύ των συχνοτήτων 0 – 250 Hz η εφαρμογή διαύκενου 200 mm επιτυγχάνει την μέγιστη τιμή του συντελεστή $\alpha = 0,7$ με φθίνουσα τάση για να φτάσει στην τιμή $\alpha = 0,5$, παρόμοιες τιμές μας δίνει και η εφαρμογή διαύκενου 100 mm. Έπειτα, για το διάστημα συχνοτήτων $f = 900$ Hz – 1800 Hz η εφαρμογή οποιουδήποτε διαύκενου

μεταξύ 20 mm – 200 mm δεν οφελεί ιδιαίτερα, η τιμή του συντελεστή κυμαίνεται στην τιμή $\alpha = 0,6$ με ένα εύρος της τάξεως του 0,05 και έπειτα από την συχνότητα 2150 Hz – 7200 Hz ο συντελεστής α παραμένει σχεδόν σταθερός με τιμή $\alpha = 0,8$.

Sample 3 πάχους 50 mm και πυκνότητας 150 kg/m³



Εικόνα 85: Σύγκριση του συντελεστή απορρόφησης α για το sample 3 πάχους 50 mm και διάκενο αέρος 0 – 200 mm. Πάνω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz κάτω διάγραμμα εύρος συχνοτήτων 520 Hz – 7100 Hz.

Στη περίπτωση του sample 3 πάχους 50 mm παρατηρούμε από την Εικόνα 85 πάνω διάγραμμα ότι το διάκενο αέρος 200 mm μεταξύ δείγματος και ακλόνητου σημείου αυξάνει τον συντελεστή α σε μεγαλύτερο βαθμό από τα άλλα διάκενα για το εύρος των συχνοτήτων 120 Hz – 250 Hz, ο συντελεστής α αποκτά την τιμή $\alpha = 0,45$ η οποία παραμένει σταθερή. Στο εύρος των συχνοτήτων 450 Hz – 900 Hz, όταν μεταξύ υλικού και άκαμπτου τοιχώματος δεν εφαρμόζεται διάκενο έχουμε την μέγιστη τιμή του

συντελεστή α η οποία κυμαίνεται στην τιμή $\alpha = 0,8$ με ένα εύρος 0,05, έπειτα από τα 900 Hz έως 7200 Hz σε όλες τις περιπτώσεις με ή χωρίς διάκενο αέρα η τιμή του συντελεστή α είναι σταθερή $\alpha = 0,8$ με αύξουσα τάση η οποία φτάνει στη τιμή 0,9 έπειτα από τα 3600 Hz.

Συγκεντρωτικά, και στη περίπτωση του πετροβάμβακα sample 3 παρατηρούμε ότι με την αύξηση του διακένου αέρα τα μέγιστα μετατοπίζονται στις χαμηλότερες συχνότητες, όπου αυτό συμβαίνει μεταξύ των συχνοτήτων 120 Hz – 270 Hz. Η Εικόνα 85 δείχνει ότι στο εύρος από 900 Hz – 1800 Hz δεν παρουσιάζεται μεγάλη διαφορά, παρατηρούμε ότι ο συντελεστής α κυμαίνεται στο $\alpha = 0,8$, με εύρος 0,05. Από το εύρος συχνοτήτων 2500 Hz – 7100 Hz η τιμή του συντελεστή κυμαίνεται σε $\alpha = 0,9$, το χαμηλό εύρος υποδεικνύει ότι ο συντελεστής απορρόφησης ήχου α δεν επηρεάζεται από το διάκενο αέρα που θα εφαρμοστεί για τις συχνότητες από 900 Hz – 7100 Hz.

Για τις περιπτώσεις του πετροβάμβακα συμπεραίνουμε ότι, ανάλογα το διάκενο που θα εφαρμόσουμε και σε συνδυασμό με το πάχος του υλικού, ωφελούμαστε σε ένα εύρος συχνοτήτων το οποίο δίνει μια βέλτιστη τιμή στο συντελεστή απορρόφησης ήχου α και έπειτα παρατηρείται η τιμή α να φθίνει.

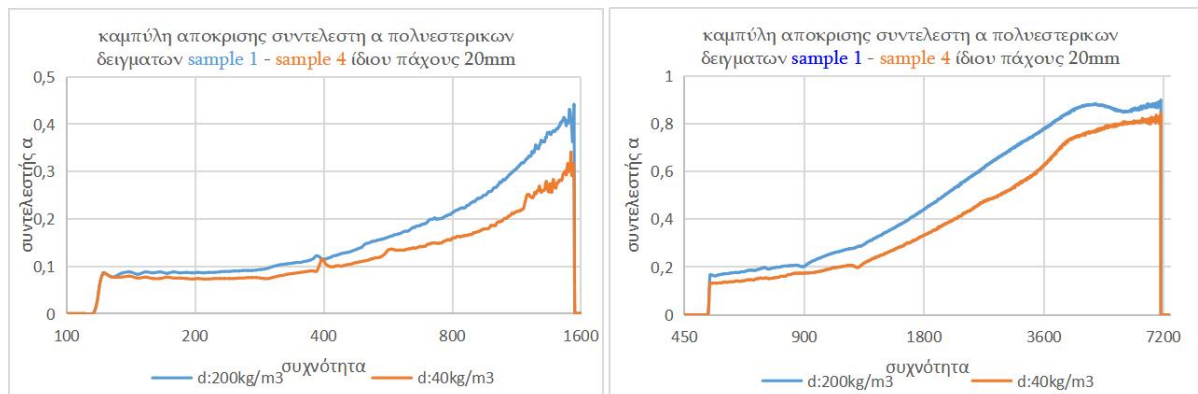
Η αύξηση του συντελεστή απορρόφησης ήχου α οφείλεται στο γεγονός ότι το διάκενο αέρα από 0 σε 200 mm πίσω από το δείγμα μπορεί να ωφελήσει το δείγμα και να απορροφηθεί η ηχητική ενέργεια μεγαλύτερων μηκών κύματος, δηλαδή σε μεσαίες και χαμηλές συχνότητες. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση του διακένου αέρα πίσω από το δείγμα τείνει να μετακινεί τις συχνότητες μέγιστης απορρόφησης (αιχμή του γραφήματος), προς χαμηλότερες συχνότητες (στα αριστερά του άξονα) και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ηχοαπορρόφησης σε υψηλότερες συχνότητες. Επομένως, όταν τα διάκενα αέρα αυξάνονται από 20 mm έως 200 mm, αυτές οι κορυφές έχουν μετατοπιστεί προς τις χαμηλότερες περιοχές συχνοτήτων, ως εκ τούτου έχει επέλθει μείωση του συντελεστή στις μεσαίες συχνότητες.

6.3 Η επιρροή της πυκνότητας.

Τα δείγματα πολυεστέρα sample 1 - sample 4 και τα δείγματα πετροβάμβακα sample 2 - sample 3 έχουν επιλεγεί ως τα υπό εξέταση υλικά ώστε να προσδιορίσουμε τη σχέση μεταξύ ηχοαπορρόφησης και πυκνότητας όμοιων υλικών. Κάτω από παρόμοιες συνθήκες πάχους 20 mm ή 50 mm και βάθους κοιλότητας 0 mm με την πυκνότητα τους ως μεταβλητή, για τα δείγματα πολυεστέρα sample 1 με $\rho = 200 \text{ kg/m}^3$ και sample 4 με $\rho = 40 \text{ kg/m}^3$, και για τα δείγματα πετροβάμβακα sample 2 με $\rho = 100 \text{ kg/m}^3$ και sample 3 με $\rho = 150 \text{ kg/m}^3$, οι συγκριτικές καμπύλες των συντελεστών ηχοαπορρόφησης στο εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 7100 Hz φαίνονται στις Εικόνα 86, Εικόνα 87 και Εικόνα 88.

Για τα δείγματα sample 1 και sample 4, στην Εικόνα 86, παρατηρούμε ότι οι ακουστικές ιδιότητες των συγκεκριμένων δειγμάτων πολυεστέρα σημειώνουν την ίδια

συμπεριφορά, η οποία είναι χαμηλή ηχοαπορρόφηση στο εύρος συχνοτήτων μεταξύ 120 Hz – 1800 Hz και υψηλοί συντελεστές ηχοαπορρόφησης στο εύρος συχνοτήτων 1800 Hz – 7500 Hz. Όμως η καμπύλη απόκρισης του συντελεστή α μεταξύ των δειγμάτων sample 1 (μεγαλύτερης πυκνότητας) είναι πάντοτε πάνω από την καμπύλη απόκρισης του sample 4 (χαμηλότερης πυκνότητας).

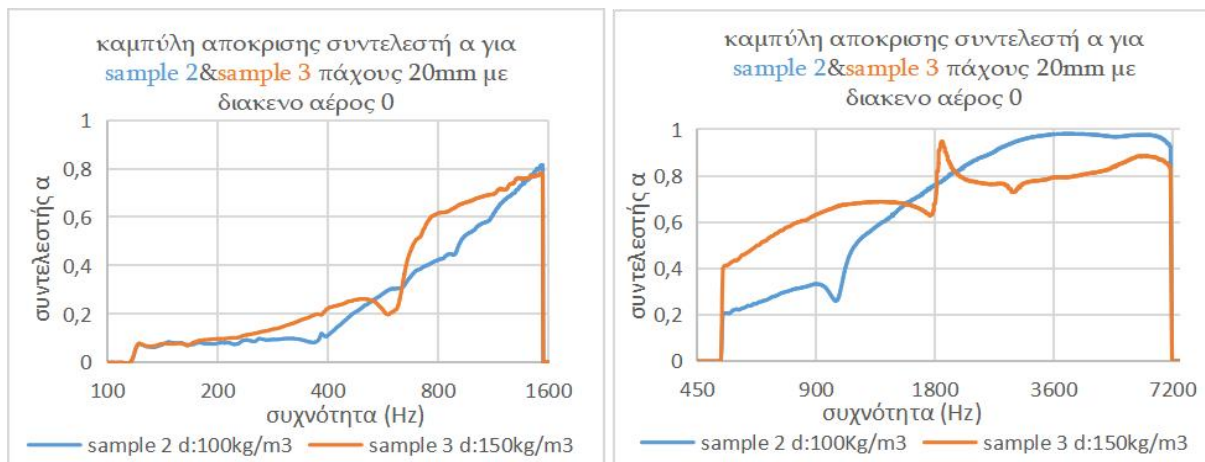


Εικόνα 86: Συγκριτική καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για το sample 1 - sample 4 με ίδιο πάχος 20 mm και διαφορετικής πυκνότητας χωρίς διάκενο αέρος. Αριστερό διάγραμμα, εύρος συχνοτήτων 120 Hz – 1540 Hz, δεξί διάγραμμα 520 Hz – 7100 Hz.

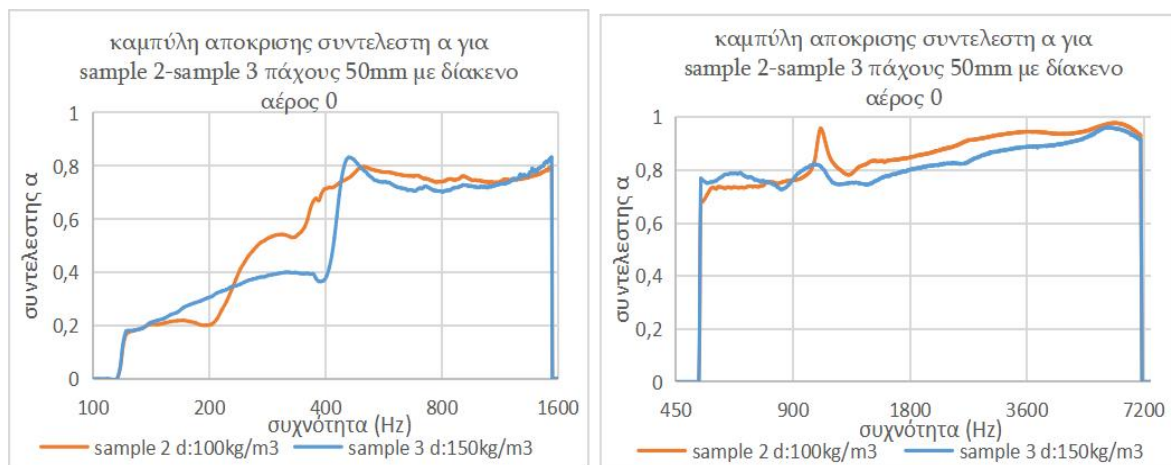
Για τα δείγματα πετροβάμβακα sample 2 και sample 3 οι συγκριτικές καμπύλες απόκρισης συντελεστή α χωρίς διάκενο με πάχος 20 mm και 50 mm απεικονίζονται στην Εικόνα 87 και την Εικόνα 88, αντίστοιχα.

Στην περίπτωση που τα δείγματα έχουν πάχος 20 mm παρατηρούμε από την Εικόνα 87 ότι για το sample 2 και για συχνότητα $f = 1120$ Hz ο συντελεστής α έχει τιμή $\alpha = 0,6$ ενώ για sample 3 και $f = 650$ Hz η τιμή του είναι $\alpha = 0,6$ και στις 2 περιπτώσεις για το διάστημα 120 Hz - 500 Hz η τιμή του α είναι μικρή $\alpha = 0,07-0,45$. Το sample 3 έχει καλή απόδοση για συχνότητες άνω των 2000 Hz, το ίδιο βλέπουμε να ισχύει και για το sample 2 το οποίο επιτυγχάνει και μεγαλύτερες τιμές. Γενικά, παρατηρούμε ότι υπάρχει αύξηση στην τιμή ηχοαπορρόφησης στη μεσαία περιοχή συχνοτήτων για μεγαλύτερη πυκνότητα δείγματος στο πάχος 20 mm.

Από την Εικόνα 87 αυτό που παρατηρούμε είναι, ότι το δείγμα sample 2 έχει μεγαλύτερο συντελεστή ηχοαπορρόφησης σε σύγκριση με το δείγμα sample 3 για συχνότητες 1200 Hz και άνω, αν και τα δυο δείγματα έχουν υψηλό συντελεστή α σε όλο αυτό το φάσμα, το αναμενόμενο αποτέλεσμα είναι το αντίθετο. Οι λόγοι που μπορεί να οδηγούν σ' αυτό το γεγονός πιθανότατα οφείλονται και σε άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των υλικών, όπως η αντίσταση ροής, το πορώδες, και το ελικοειδές, ενώ ακόμα και η συμπίεση που δέχονται τα πάνελ κατά την παραγωγή τους, η οποία επηρεάζει την συμπίεση των ινών, αν γίνεται σε μεγάλο βαθμό μπορεί να προκαλέσει αντίθετα αποτελέσματα, μίας και μειώνει το πορώδες του, και κατά συνέπεια το βαθμό διαπερατότητας του, με αποτέλεσμα ο ήχος να μην μπορεί να διαπεράσει το υλικό ούτε να απορροφηθεί [60].



Εικόνα 87: Συγκριτική καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για το sample 2 - sample 3 με ίδιο πάχος 20 mm και διαφορετικής πυκνότητας χωρίς διάκενο αέρος. Αριστερό διάγραμμα, εύρος συχνοτήτων 120 – 1540 Hz, δεξί διάγραμμα 520 – 7100 [Hz].



Εικόνα 88: Συγκριτική καμπύλη απόκρισης συντελεστή α για το sample 2 - sample 3 με ίδιο πάχος 50 mm και διαφορετικής πυκνότητας χωρίς διάκενο αέρος. Αριστερό διάγραμμα, εύρος συχνοτήτων 120 – 1540 Hz, δεξί διάγραμμα 520 – 7100 Hz.

Για την περίπτωση που τα δείγματα έχουν πάχος 50 mm παρατηρούμε από την Εικόνα 88 ότι και τα δυο δείγματα έχουν συντελεστή απορρόφησης ήχου $\alpha = 0,6$ για συχνοτήτες άνω των 400 Hz και πιο συγκεκριμένα το sample 2 από τις συχνοτήτες άνω των 350 Hz επιτυγχάνει μεγάλες τιμές. Έπειτα από τα 500 Hz έως και τα 7200 Hz βλέπουμε ότι και τα 2 δείγματα έχουν υψηλή απορρόφηση.

Η πυκνότητα ενός υλικού είναι ένας από τους σημαντικούς παράγοντες που συμβάλει στην ηχοαπορρόφηση του. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο συντελεστής απορρόφησης αυξάνεται με τη αύξηση της πυκνότητας. Επίσης παρατηρούμε ότι η

αυξανόμενη πυκνότητα σε συνδυασμό με το πάχος του υλικού ενισχύει τον συντελεστή απορρόφησης και στις χαμηλές συχνότητες [61].

Από το σύνολο των μετρήσεων που έγιναν συμπεραίνουμε ότι και οι δυο τύποι υλικών πολυεστέρας και πετροβάμβακας επιτυγχάνουν υψηλές τιμές συντελεστή α . Αν λάβουμε υπόψιν μας μόνο το συντελεστή α , το υλικό που ξεχωρίζει για τις υψηλές τιμές α είναι ο πετροβάμβακας. Λαμβάνοντας όμως υπόψιν και τα άλλα χαρακτηριστικά των δειγμάτων, τότε το κάθε υλικό έχει πλεονεκτήματα όπου ανάλογα τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής θα μπορέσει να αποτελέσει την ιδανική επιλογή.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής, ήταν η μελέτη της απορρόφησης πορώδων υλικών με την μέθοδο της συνάρτησης μεταφοράς με χρήση σωλήνων εμπέδησης. Ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης ενός πορώδους υλικού μπορεί να διαφοροποιηθεί από τα χαρακτηριστικά του, όπως η ειδική αντίσταση ροής σ , το ελικοειδές k_s , η πυκνότητα ρ , το πορώδες ε , το πάχος του (thickness).

Στο πείραμα μας μελετήσαμε την απόδοση όμοιων υλικών διαφορετικού πάχους και διαπιστώσαμε ότι αυξάνοντας το πάχος του υλικού, αυτό μπορεί να βελτιώσει τους συντελεστές ηχοαπορρόφησης σε χαμηλές, μεσαίες και υψηλές συχνότητες, λόγω της αύξησης της μετατροπής της ηχητικής ενέργειας σε θερμότητα. Επίσης μελετήσαμε την απόδοση των δειγμάτων μας όταν εφαρμόσαμε διάκενο αέρα 20, 50, 100 και 200 mm, όπου είναι εμφανές από τα αποτελέσματα, πως η εφαρμογή διακένου αέρα έχει θετική επίδραση στην ηχοαπορρόφηση κυρίως σε χαμηλές συχνότητες διέγερσης. Η εφαρμογή του διακένου αέρα είναι πιο αποτελεσματική από τη χρήση απορροφητών πλήρους πάχους σε αρκετές περιπτώσεις ιδίως όταν στοχεύουμε σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Εφαρμόζοντας διάκενο αέρα, και σε συνδυασμό με το πάχος του υλικού, μπορούμε να επιτύχουμε μια μέγιστη απορρόφηση, γεγονός που μπορεί να μειώσει τη χρήση ινών και κατ' επέκταση να μειώσουμε το κόστος παραγωγής.

Η πυκνότητα επίσης θεωρείται ένας από τους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζει την ηχοαπορρόφηση οποιουδήποτε υλικού. Είναι ένα χαρακτηριστικό που μελετήσαμε και παρατηρήσαμε ότι στο χαμηλότερο εύρος συχνοτήτων οι συντελεστές ηχοαπορρόφησης, α , των δειγμάτων μας αυξάνονται με την αύξηση της πυκνότητας. Η υψηλή πυκνότητα στα δείγματα sample 2, sample 3 σε συνδυασμό με το πάχος 50 mm δίνει υψηλούς συντελεστές ηχοαπορρόφησης σχεδόν αμετάβλητους σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, οι οποίοι δεν επηρεάζονται από την εφαρμογή διακένου αέρα.

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει την τιμή του συντελεστή α είναι η συμπίεση που δέχεται το υλικό του ηχοαπορροφητή κατά την παραγωγή του. Ένα πορώδες υλικό όταν δέχεται υψηλή συμπίεση μπορεί να οδηγηθεί στο να χάσει το πορώδες του (και κατά συνέπεια το βαθμό διαπερατότητας του από τον ήχο) και να μειωθεί η ηχοαπορροφητικότητα του. Στο πείραμα μας παρατηρήσαμε ότι για το sample 3 που η πυκνότητα του $\rho = 150 \text{ kg/m}^3$ είναι αρκετά μεγάλη, τα αποτελέσματα της απορρόφησης με βάση τα χαρακτηριστικά του αν και υψηλά δεν ήταν τα αναμενόμενά. Μια περαιτέρω μελέτη σχετική με την συμπίεση των υλικών θα μας οδηγούσε σε πιο ασφαλή συμπεράσματα.

- [1] F. A. Everest and K. C. Pohlmann, *Master handbook of acoustics*. New York: McGraw-Hill, 2015.
- [2] D. A. Bies and C. H. Hansen, in *Engineering noise control: Theory and practice*, CRC Press, 2017.
- [3] J. Crocker, *Handbook of Noise and vibration control*. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, 2007.
- [4] “6. Ηχητικά κύματα - Kallipos.” [Online]. Available: https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/195/3/02_chapter_6.pdf. [Accessed: 08-Jun-2022]
- [5] Www.django-Wiki.org, Longitudinal and transverse - labster theory. [Online]. Available: <https://theory.labster.com/longitudinal-transverse-waw/>. [Accessed: 16-Jul-2022].
- [6] “Standing wave,” Encyclopædia Britannica. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/standing-wave-physics>. [Accessed: 08-Jun-2022].
- [7] Standing Waves and Resonance, University Physics Volume 1, open educational resources (OER). [Online]. Available: <https://courses.lumenlearning.com/suny-osuniversityphysics/chapter/16-6-standing-waves-and-resonance/>. [Accessed: 16-Jul-2022].
- [8] 2-3 ΕΠΑΛΛΗΛΙΑ Ή ΥΠΕΡΘΕΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ. [Online]. Available: http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2728/Fysiki-G-Lykeiou-ThSp_html-apli/index2_3.html. [Accessed: 08-Jun-2022].
- [9] G. Elert, “Standing waves,” The Physics Hypertextbook. [Online]. Available: <https://physics.info/waves-standing/>. [Accessed: 08-Jun-2022].
- [10] Educational local resources. [Online]. Available: <http://tccc.iesl.forth.gr/education/local.html>. [Accessed: 08-Jun-2022].
- [11] “Φυσική για Μηχανικούς - csd.uoc.gr.” [Online]. Available: <https://www.csd.uoc.gr/~hy112/lectures/2021-22/Lec12-Simple%20Harmonic%20Motion%20I.pptx>. [Accessed: 26-Jun-2022].
- [12] S. M. Potirakis, Acoustics and sound absorption issues applied in textile problems, in E. S. Vassiliadis (Ed.), *Electronics and computing in textiles*. bookboon.com (Ventus Publishing ApS), 2012, pp.60-99 [Online]. Available: <https://bookboon.com/en/electronics-and-computing-in-textiles-ebook?mediaType=ebook>. [Accessed: 16-Jul-2022].
- [13] J. Cox and P. D'Antonio, *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and Application*. Boca Raton: CRC Press, 2020.

- [14] K. U. Ingard, Notes on Sound Absorption Technology. Poughkeepsie, NY: Noise Control Foundation, 1994.
- [15] Δ. Ζαβιτσάνος and D. Zavitsanos, “Προσδιορισμός του συντελεστή απορρόφησης του ήχου και του δείκτη ηχομείωσης αερόφερτου θορύβου με τη χρήση των sound intensity probes,” Αρχική Σελίδα, 05-Jun-2015. [Online]. Available: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/40803?show=full>. [Accessed: 08-Jun-2022].
- [16] K. U. Ingard, Notes on Sound Absorption Technology. Poughkeepsie, NY: Noise Control Foundation, 1994.
- [17] “Fibran.” [Online]. Available: <https://fibran.gr/files4users/files/documentation%20GEO/TDS%20FIBRANgeo%20%20PS%20%20eng.pdf>. [Accessed: 08-Jun-2022].
- [18] E. Papadopoulos and E. Παπαδόπουλος, “Ακουστική μελέτη και τροποποίηση μικρού κλειστού χώρου.,” Apothesis Αρχική, 08-Feb-2016. [Online]. Available: <https://apothesis.lib.hmu.gr/handle/20.500.12688/2432?show=full>. [Accessed: 28-Jun-2022].
- [19] Προσδιορισμός ο συντελεστή απορρόφησης ο ήχο και ο των sound intensity probes.” [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/38466898.pdf>. [Accessed: 17-Jul-2022].
- [20] Ζαρούχας Θ., Κοντομίχος Φ., Χατζηαντωνίου Π., “Βασικές Αρχές και Σύγχρονες Εξελίξεις στην Κτιριακή Ακουστική” (Εκδόσεις Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο – 2013
- [21] Porous absorbers. [Online]. Available: <https://www.huncke.de/en/knowledge/absorbers/porous-absorbers.html>. [Accessed: 25-Jun-2022].
- [22] J.-F. Allard and N. Atalla, Propagation of sound in porous media: Modelling sound absorbing materials. Hoboken, NJ: Wiley, 2009.
- [23] “2.4 particle-size analysis - ACSESS - Wiley Online Library.” [Online]. Available: <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssabookser5.4.c12>. [Accessed: 08-Jun-2022].
- [24] “Understanding porosity and density,” Wisconsin Geological Natural History Survey. [Online]. Available: <https://wgnhs.wisc.edu/maps-data/data/rock-properties/understanding-porosity-density/>. [Accessed: 08-Jun-2022].
- [25] Encyclopedia of textiles. Broadway, NJ: Textile Book Service Inc., 1980.
- [26] Z. Plahutar, FluxFactory, J. Merdan, J. Photo, A. Cooper, M. Portfolio, A. Krivenok, I. Veklich, A. Efetova, A. C. / EyeEm, G. Photos, Bloomberg, Grandriver, Filo, Malorny, A. Shavshyna, V. Agureeva, Solange_Z, J. Polc, M. A. D. / “Construction worker cutting mineral rock wool stock photo,” Getty Εικόνα s. [Online]. Available: <https://www.gettyΕικόνα s.com/photos/mineral-wool>. [Accessed: 29-Jun-2022].
- [27] Volf, Milos B. (1990). Technical Approach to Glass. New York: Elsevier. ISBN 0-444-98805-X.

- [28] “Online αγορές μονωτικών και δομικών υλικών,” Αρχική. [Online]. Available: <https://www.clickandbuild.gr/>. [Accessed: 16-Jul-2022].
- [29] M. Humphries, Fabric reference. Pearson, 2014.
- [30] “Polyester fibre,” Polyester Fibre - an overview | ScienceDirect Topics. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/polyester-fibre>. [Accessed: 24-Jun-2022].
- [31] “Πολυεστέρας,” Wikipedia, 02-Jun-2022. [Online]. Available: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CF%85%CE%B5%CF%83%CF%84%CE%AD%CF%81%CE%B1%CF%82>. [Accessed: 24-Jun-2022].
- [32] “Σημειώσεις Επιλεγμένα θέματα Κλωστοϋφαντουργικής Φυσικής.” [Online]. Available: http://ikaros.teipir.gr/phychе/Subjects/KLO3/Klostо_site_files/CoverPage.pdf. [Accessed: 23-Jun-2022].
- [33] “Silica Aerogels,” Silica Aerogels - an overview | ScienceDirect Topics. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/silica-aerogels>. [Accessed: 22-Jun-2022].
- [34] “Silica aerogel in block form. | download scientific diagram.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Silica-aerogel-in-block-form_fig1_271451182. [Accessed: 28-Jun-2022].
- [35] “Προϊόντα άνευ υφάνσεως,” Fibrarco a.e.b.e., 25-Jul-2016. [Online]. Available: <https://www.fibrarco.gr/proionta-aneu-yfansews/>. [Accessed: 22-Jun-2022].
- [36] “What are non-woven fabrics?,” BSAMPLY, 10-Apr-2019. [Online]. Available: <https://bsamply.com/what-are-non-woven-fabrics/>. [Accessed: 28-Jun-2022].
- [37] “Measurement of the acoustic absorption coefficient by impedance tube.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/338031592_Measurement_of_the_Acoustic_Absorption_Coefficient_by_Impedance_Tube/fulltext/5dfae98aa6fdcc28372be5ee/Measurement-of-the-Acoustic-Absorption-Coefficient-by-Impedance-Tube.pdf. [Accessed: 06-Jun-2022].
- [38] “File:Kundt tube diagram.svg,” Wikimedia Commons. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kundt_tube_diagram.svg. [Accessed: 29-Jun-2022].
- [39] “Sound absorption coefficient,” Sound Absorption Coefficient - an overview | ScienceDirect Topics. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sound-absorption-coefficient>. [Accessed: 22-Jun-2022].
- [40] P. Liu and G.-F. Chen, Porous materials: Processing and applications. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2014.
- [41] D. Lindeberg, “What is NRC, STC, and SAA?,” Design Strategies, 05-Feb-2018. [Online]. Available: <https://www.dsfinishes.com/ds-blog/2018/2/5/what-is-nrc-stc-and-saa>. [Accessed: 07-Jun-2022].

- [42] “Do we measure correctly poro -acoustic and Poro-elastic characteristics ...” [Online]. Available: <http://www.panacoustics.com/uploads/7/3/3/2/73322645/an9020b-2015x.pdf>. [Accessed: 05-Jun-2022]
- [43] "Acoustic Material Properties-Measurment System" SCS9020B"Kundt/T60/TL Tubes" user manual Rev. 1.5 - Feb.2013
- [44] “ISO 10534-2:1998(EN), acoustics ? determination of sound absorpction ...” [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#!iso:std:22851:en>. [Accessed: 23-Jun-2022].
- [45] “ASTM E2018-08,” ANSI Webstore. [Online]. Available: <https://webstore.ansi.org/Standards/ASTM/astme201808>. [Accessed: 24-Jun-2022].
- [46] “Understanding the difference between CNC cutting and laser cutting,” H. Loeb Corporation, 03-Aug-2020. [Online]. Available: <https://www.hloeb.com/news/difference-between-cnc-cutting-and-laser-cutting/>. [Accessed: 22-Jun-2022].
- [47] “Punchcutting,” Wikipedia, 21-Mar-2022. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Punchcutting>. [Accessed: 22-Jun-2022].
- [48] “T3 Multi Sheet Punch Cutter complete with cutting head (T3 MSPC-2 37 44 58),” Badge. [Online]. Available: <https://badgeaminit.com.au/collections/featured-products/products/t3-multi-sheet-punch-cutter-board-complete-machine>. [Accessed: 29-Jun-2022].
- [49] “NT cutter C-1500P Κόφτης Κύκλων \varnothing 1.8-17cm για Χαρτιά & Χαρτόνια,” Υλικά Κοσμημάτων, Decoupage, Ζωγραφικής, Αγιογραφίας... [Online]. Available: <https://www.pacoartcenter.gr/el/nt-cutter-circle-cutter-c-1500p-1-8-17cm.html>. [Accessed: 23-Jun-2022]
- [50] “EN 13162:2012+A1:2015 - thermal insulation products for buildings - factory made mineral wool (MW) products - specification,” iTeh Standards Store. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/3a231458-ac22-453b-864d-c40b42beff2/en-13162-2012a1-2015>. [Accessed: 23-Jun-2022].
- [51] “FIBRANgeo B-051,” Fibran GREECE, 01-Jun-2022. [Online]. Available: <https://fibran.gr/portfolio-item/fibrangeo-b-051/>. [Accessed: 23-Jun-2022].
- [52] “FIBRANgeo B-001,” Fibran GREECE, 01-Jun-2022. [Online]. Available: <https://fibran.gr/portfolio-item/fibrangeo-b-001/>. [Accessed: 23-Jun-2022].
- [53] “SILSONIC 40 - ΜΟΝΩΠΑΝ Α.Ε.” [Online]. Available: <http://www.monopan.gr/wp-content/uploads/2017/03/SILSONIC-40-2017.02.pdf>. [Accessed: 07-Jun-2022].
- [54] “A R I T H E R M - noisecontrol.gr.” [Online]. Available: <https://www.noisecontrol.gr/Εικόνα/s/eshop/catalog/products/0012/files/ARITHERM.pdf>. [Accessed: 23-Jun-2022].
- [55] “Condenser microphones / preamplifiers - acousticresearch.com.au.” [Online]. Available: <https://acousticresearch.com.au/files/Microphones.pdf>. [Accessed: 24-Jun-2022].
- [56] “Qu'est Ce-Qu'un Cookie ?,” Audiophony. [Online]. Available: <https://audiophony.com/>. [Accessed: 25-Jun-2022].

- [57] “Vibro-acoustic - DT-9837A / SCS-SDT4 - precision instruments - DT DAQ - USB powered dynamic signal analyzers by vibro-acoustic srl,” Vibro-Acoustic - DT-9837A / SCS-SDT4 - Precision Instruments ... [Online]. Available: <https://www.environmental-expert.com/products/vibro-acoustic-model-dt-9837a-scs-sdt4-usb-powered-dynamic-signal-analyzers-407276>. [Accessed: 30-Jun-2022].
- [58] “The norsonic range of sound level meters.” [Online]. Available: <https://norsonic.se/wp-includes/ms-files.php?file=2017/09/Norsonic-SLM-brochure-2017-0917-web.pdf>. [Accessed: 24-Jun-2022].
- [59] *Seddeq, H.S. (2009) factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3, 4610-4617. - references - scientific research publishing.* [Online]. Available: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1815269](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1815269). [Accessed: 20-Jun-2022].
- [60] T. Hassan, H. Jamshaid, R. Mishra, M. Q. Khan, M. Petru, M. Tichy, and M. Muller, “Factors affecting acoustic properties of natural-fiber-based materials and Composites: A Review,” MDPI, 31-May-2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2673-7248/1/1/5>. [Accessed: 01-Jul-2022].
- [61] C. Zhang, J. Li, Z. Hu, F. Zhu, and Y. Huang, “Correlation between the acoustic and porous cell morphology of polyurethane foam: Effect of interconnected porosity,” *Materials & Design*, 01-May-2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306912002749>. [Accessed: 21-Jun-2022].

