ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Σπυρίδων Πολυχρονόπουλος
Διπλωματούχος Φυσικός
Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ
2014

Επιβλέπων

Σκαρλάτος Δημήτρης, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Σκαρλάτος Δημήτρης, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Μουρτζόπουλος Γιάννης, Καθηγητής του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Μενούνου Πηνελόπη, Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Σκαρλάτος Δημήτρης, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Μουρτζόπουλος Γιάννης, Καθηγητής του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Μενούνου Πηνελόπη, Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Φασόης Σπήλιος, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Πολύζος Δημοσθένης, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Φακωτάκης Νικόλαος, Καθηγητής του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Φλώρος Αντρέας, Επίκουρος Καθηγητής του Τμήματος Τεχνών Ήχου και Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο.

Ημερομηνία έγκρισης:

18 Μαρτίου 2014

Δήλωση ακαδημαϊκής ακεραιότητας

(Declaration of academic integrity)

Ο υπογράφων δηλώνει ότι η παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο "ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΧΩΡΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ" είναι προϊόν δικής του δουλειάς και ότι όλες οι πηγές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σύνταξή της αναφέρονται πλήρως.

Υπογραφή

Σπυρίδων Πολυχρονόπουλος

Κάθε έκφραση, στενός συγγενής τοῦ ὑπερβατικοῦ στοιχείου, βρίσκεται ἴσως τόσο κοντά στη σιωπή, ὥπως στή μεγάλη νεώτερη μουσική τίποτε δέν ἔχει τόση έκφραση ὅσο ὁ ἦχος πού σβήνει καθώς βγαίνει γυμνός μέσα ἀπό τήν πυκνή δομή, στόν ὁποῖο ἡ τέχνη δυνάμει τῆς ἴδιας της τῆς κίνησης ἐκβάλλει στό φυσικό της στοιχεῖο.

Τέοντορ Αντόρνο

Απόσπασμα ἀπό το ἔργο που δημοσιεύτηκε στα γερμανικά μετά το θάνατό του (1970) με τίτλο "Ästhetische Theorie" ἀπό τις ἐκδόσεις Suhrkamp Verlag, μετάφραση στα ἐλληνικά ἀπό τον Λευτέρη Αναγνώστου με τίτλο "Αισθητική Θεωρία" ἀπό τις ἐκδόσεις Αλεξάνδρεια (2000).

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το **Γιάννη Μουρτζόπουλο** για τη παρότρυνση να ξεκινήσω αυτό το διδακτορικό και την τόσο καλή φιλική, καλλιτεχνική και επιστημονική σχέση που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια.

Επίσης τον επιβλέποντά μου **Δημήτρη Σκαρλάτο** για την εμπιστοσύνη και την άριστη συνεργασία σε όλες τις ακαδημαϊκές δραστηριότητες.

Το audiogroup των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών για τη συνεργασία, όλη τη συμπαράσταση και την ειλικρινή φιλική σχέση που αναπτύχθηκε όλα αυτά τα χρόνια, ονομαστικά: το **Φώτη Κοντομίχο**, το **Θοδωρή Αλτάνη**, τον **Αλέξανδρο Τσιλφίδη**, τον **Ηλία Κοκκίνη**, το **Νικόλα Τάτλα**, το **Θωμά Ζαρούχα** και το **Μπάμπη Παπαδάκο**. Ξεχωριστά θα ήθελα να ευχαριστήσω για όλη της τη βοήθειά, όχι μόνο στο επιστημονικό πεδίο αλλά και για όλη τη συμπαράσταση σε όλα τα επίπεδα, την **Ελευθερία Γεωργαντή**.

Ακόμη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχαν, το **Βλάση Πολυχρονόπουλο**, την **Κατερίνα Πολυχρονοπούλου** και τη **Δώρα Πολύχρονοπούλου**.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τη **Βικτώρια Μακρή** για την υποστήριξή της σε κάθε δραστηριότητά μου.

Εισαγωγή

Ο ήχος είναι ένα αρκετά παλιό πεδίο έρευνας, όμως μέχρι και σήμερα πολλές πτυχές του παραμένουν ανεξερευνήτες. Έτσι ακόμη και σήμερα, παραμένει ελκυστική ερευνητική περιοχή για αρκετούς επιστήμονες. Ορισμένα από τα σύγχρονα επιστημονικά πεδία της ακουστικής είναι: η ακουστική χώρων, η ψυχοακουστική, η μουσική ακουστική, η ανάλυση φωνής, η ηλετροακουστική, η ψηφιακή επεξεργασία ακουστικού σήματος, η υποβρύχια ακουστική, η ακουστική οικολογία, η περιβαλλοντική ακουστική, η αρχιτεκτονική ακουστική και άλλα.

Κύριο αντικείμενο της διατριβής αποτελεί η μελέτη των συντονιστών Helmholtz. Για τον σκοπό της μελέτης αυτής υλοποιήθηκαν εξομοιώσεις σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων, μελετήθηκε η συμβολή των συντονιστών στην ακουστική των αρχαίων θεάτρων και υλοποιήθηκαν μοντέλα με τη βοήθεια ψηφιακών φίλτρων. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις στη μελέτη των συντονιστών έχουν μεγάλο ενδιαφέρον, αφενός για την περαιτέρω γνώση των αρχών λειτουργίας τους, αφετέρου, για τη δημιουργία νέων υπολογιστικών εργαλείων, που χωρίς να απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ προβλέπουν με σχετική ακρίβεια την συμπεριφορά τους στο ακουστικό πεδίο.

Στο 1^ο κεφάλαιο παρατίθεται μια συνοπτική αλλά επαρκής ιστορική αναφορά και θεωρία για τους συντονιστές. Ακόμη αναφέρονται οι ακουστικές παράμετροι που θα χρειαστούν στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν.

Σήμερα, παρότι οι δυνατότητες των υπολογιστών είναι ικανοποιητικές, για τις περισσότερες εφαρμογές και εξομοιώσεις που απαιτούνται για την μελέτη της συμπεριφοράς των διάτρητων επιφανειών -οι οποίες στην πραγματικότητα αποτελούνται από συντονιστές Helmholtz- δεν αρκούν. Η μελέτη των ακουστικών ιδιοτήτων των επιφανειών αυτών, μέσω της εξομοίωσής τους σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων, είναι αρκετά ακριβής. Υλοποιήθηκαν λοιπόν, εξομοιώσεις απλών συντονιστών και μικρών διάτρητων επιφανειών, ώστε, αφενός μεν, να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων, αφετέρου δε, να καταγραφούν οι περιορισμοί (λόγω κυρίως της αυξημένης απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος) της εξομοίωσης αυτής. Για να μελετηθούν με ακρίβεια οι ακουστικές παράμετροι μίας εμπορικής διάτρητης επιφάνειας, πρέπει να πραγματοποιηθεί τρισδιάστατη εξομοίωσή της. Αυτός ακριβώς είναι και ο βασικότερος λόγος για τον οποίο αυξάνει κατά πολύ η πολυπλοκότητα του μοντέλου και η επίλυσή του καθίσταται αδύνατη με την υπάρχουσα υπολογιστική ισχύ. Στο 2^ο κεφάλαιο παρατίθενται αναλυτικά οι εξομοιώσεις δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων ηχοαπορροφητικών επιφανειών, καθώς και τα αποτελέσματά τους. Ενώ με ένα δισδιάστατο μοντέλο δε μπορούμε να εξάγουμε σαφή αποτελέσματα για τη συμπεριφορά τους, αρκετές φορές η σύγκριση ανάμεσα σε δύο ή περισσότερα δισδιάστατα μοντέλα μπορεί να μας δώσει αρκετά χρήσιμες πληροφορίες για την ακουστική συμπεριφορά κάποιας παραμέτρου της επιφάνειας. Τα τρισδιάστατα μοντέλα που μελετήθηκαν και παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 2 είναι της τάξης του 0.5 m² περίπου με 64 οπές. Μία εμπορική διάτρητη επιφάνεια είναι αρκετά μεγαλύτερη, όμως με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων περιοριζόμαστε - λόγω υπολογιστικής ισχύος- στην εξομοίωση μικρότερων επιφανειών.

Στο 3^ο κεφάλαιο προβάλλεται αναλυτικά η εξομοίωση του θεάτρου της Λυττούς με τη μέθοδο TUCT™ (The Universal Cone Tracer) που υλοποιείται από το λογισμικό CATT-Acoustics και αξιολογείται η επίδραση των συντονιστών στην ακουστική συμπεριφορά του. Το θέατρο της Λυττούς ήταν το μεγαλύτερο θέατρο της αρχαίας Κρήτης και πιθανόν ένα από τα μεγαλύτερα θέατρα της αρχαίας Ελλάδας. Τα ερείπιά του ήταν ορατά μέχρι και το 1583. Αργότερα, καλύφθηκε από χώμα κι έτσι, σήμερα αγνοείται η ακριβής τοποθεσία του. Βασιζόμενοι, όμως, στα γραπτά και τα σχέδια του Βιτρούβιου (1^{ος} αιώνας π.Χ.) και του

Onorio Belli (16^{ος} αιώνας μ.Χ.) σχεδιάστηκε, εξομοιώθηκε και αξιολογήθηκαν οι ακουστικές παράμετροι του θεάτρου. Οι δύο μελετητές κάνουν λόγο για χρήση "ηχητικών βάζων" (δηλαδή συντονιστών Helmholtz) στο θέατρο. Πραγματοποιήθηκαν, συνεπώς, εξομοιώσεις για να μελετηθεί η επίδρασή τους στην ακουστική του θεάτρου.

Στο 4^ο κεφάλαιο προβάλλεται αναλυτικά μια καινοτόμος και αποτελεσματική μέθοδος αξιολόγησης της απόκρισης μίας διάτρητης απορροφητικής επιφάνειας με τυχαίο αριθμό στοιχείων συντονιστών Helmholtz, βασισμένη σε ένα απλουστευμένο, παραμετρικό με δομή φίλτρου μοντέλο. Η μέθοδος βασίζεται στα 2^{ης} τάξης παραμετρικά IIR ψηφιακά φίλτρα, που εξομοιώνει τη γραμμική απόκριση μέσω φίλτρου του κάθε συντονιστή και στην αξιολόγηση των αντίστοιχων ακουστικών τροχιών, καθυστερήσεων και κέρδους αυτών των αποκρίσεων, όπως λαμβάνονται σε οποιοδήποτε σημείο εξαιτίας μιας τυχαίας διέγερσης. Μια τέτοια προσέγγιση οδηγεί σε μια απλή αλλά ακριβή και γρήγορη αξιολόγηση της απορρόφησης των διάτρητων επιφανειών για οποιοδήποτε συγκεκριμένο τύπο συντονιστή, τύπο διάτρησης και ιδιότητες της επιφάνειας, σε οποιαδήποτε θέση δέκτη υπό ιδανικές συνθήκες ελεύθερου ή διάχυτου πεδίου. Απ' αυτές τις λειτουργίες, η μείωση του αρχικού χρόνου αντήχησης του διάχυτου πεδίου, εξαιτίας της απορρόφησης που οφείλεται στην διάτρητη επιφάνεια, μπορεί να αξιολογηθεί και να οδηγήσει στην εκτίμηση του συχνοτικά εξαρτημένου συντελεστή απορρόφησης της εξομοιωμένης επιφάνειας, σύμφωνα με το πρότυπο ISO. Αυτό επαληθεύτηκε από την σύγκριση των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων της μεθόδου με δημοσιευμένα αποτελέσματα μετρήσεων που έγιναν από κατάλληλο πιστοποιημένο εργαστήριο. Αναλυτικές λύσεις πολύπλοκων συστημάτων - όπως αυτές που καλύπτονται από τη συγκεκριμένη μέθοδο - είναι πέρα από τις δυνατότητες των σύγχρονων προσωπικών υπολογιστών. Η προτεινόμενη μέθοδος εισάγει μια ευέλικτη και πρακτική εναλλακτική λύση, έχοντας μικρότερες και διαχειρίσιμες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος.

Περιεχόμενα

	σελ.
Λίστα σχημάτων.....	11
Λίστα πινάκων.....	16
Λίστα συμβόλων.....	17

1ο Κεφάλαιο

Ακουστική και Συντονιστές

1.1 Εισαγωγή.....	21
1.2 Ιστορικά στοιχεία.....	21
1.3 Βασικές αρχές λειτουργίας των συντονιστών.....	25
1.4 Πρόσφατη έρευνα γύρω από τους συντονιστές.....	29
1.5 Μέθοδοι μελέτης συντονιστών.....	31
1.6 Οι συντονιστές ως ακουστικά στοιχεία.....	31
1.7 Μηχανικό ανάλογο του συντονιστή.....	33
1.8 Ηλεκτρικό ανάλογο του συντονιστή.....	34
1.9 Ο συντονιστής ως φίλτρο.....	37
1.10 Προηγμένα μοντέλα συντονιστών	
1.10.1 Η διόρθωση των άκρων.....	38
1.10.2 Τύποι υπολογισμού συχνότητας συντονισμού.....	39
1.10.3 Ο παράγων ποιότητας του συντονιστή.....	42
1.11 Απορρόφηση και σκέδαση από τους συντονιστές	
1.11.1 Απώλεια ενέργειας συντονιστών.....	42
1.11.2 Ενεργός διατομή απορρόφησης.....	44
1.11.3 Ενεργός διατομή σκέδασης.....	45
1.11.4 Εξάρτηση απωλειών από τη συχνότητα.....	45
1.11.5 Εξάρτηση από την αντίσταση.....	48
1.12 Ακουστικές παράμετροι.....	49
Βιβλιογραφία.....	54

2ο Κεφάλαιο

Εξομοίωση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

2.1 Εισαγωγή.....	58
2.2 Εξομοίωση ακουστικών μοντέλων με πεπερασμένα στοιχεία.....	58
2.3 Εξομοίωση απλού συντονιστή Helmholtz με πεπερασμένα στοιχεία.....	62
2.4 Μελέτη της κλήσης των ηχοπετασμάτων με πεπερασμένα στοιχεία.....	63
2.5 Μελέτη της εφαρμογής διάτρητης επιφάνειας σε τούνελ με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων.....	68
2.6 Εξομοίωση σε δύο διαστάσεις και μελέτη παραμέτρων των διάτρητων επιφανειών με μεμβράνη.....	72
2.7 Εξομοίωση διάτρητης επιφάνειας σε τρεις διαστάσεις.....	74
Βιβλιογραφία.....	78

3ο Κεφάλαιο

Η συμβολή των συντονιστών στα αρχαία θέατρα: Το θέατρο της Λυττούς

	σελ.
3.1 Εισαγωγή.....	79
3.2 Ιστορικά στοιχεία του θεάτρου της Λυττούς.....	80
3.3 Επιλογή του θεάτρου της Λυττούς.....	82
3.4 Η επίδραση της κοιλότητας των καθισμάτων.....	84
3.5 Η επίδραση των συντονιστών και η μοντελοποίησή τους.....	88
3.6 Αποτελέσματα	
3.6.1 Η επίδραση των συντονιστών στο θέατρο της Λυττούς.....	91
3.6.2 Συγκρίνοντας την ακουστική των θεάτρων της Λυττούς και της Επιδαύρου.....	94
3.7 Συμπεράσματα.....	95
Βιβλιογραφία.....	96

4ο Κεφάλαιο

Εξομοίωση διάτρητης επιφάνειας ως ψηφιακό φίλτρο

4.1.1 Εισαγωγή.....	97
4.1.2 Συμβατικές μέθοδοι προσδιορισμού συντελεστή απορρόφησης.....	99
4.2 Μαθηματική προσέγγιση	
4.2.1 Εξομοίωση του ακουστικού πεδίου του συντονιστή βασισμένη σε φίλτρα.....	102
4.2.2 Μοντέλο παραμετρικού φίλτρου συντονιστή Helmholtz.....	106
4.2.3 Βασισμένο σε φίλτρα μοντέλο διάτρητης επιφάνειας σε ελεύθερο πεδίο.....	107
4.2.4 Μοντέλο φίλτρων για διάτρητη επιφάνεια σε διάχυτο πεδίο.....	113
4.2.5 Ο συντελεστής απορρόφησης της ηχοαπορροφητικής διάτρητης επιφάνειας.....	114
4.3 Αποτελέσματα	
4.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με μετρημένα συστήματα.....	117
4.3.2 Μοντέλο διάτρητης επιφάνειας με μεικτή διάτρηση.....	118
4.3.3 Η συμβολή των σημάτων των συντονιστών σε σχέση με τη γωνία του δέκτη.....	120
4.3.4 Πολυπλοκότητα υπολογισμών.....	123
4.4 Συμπεράσματα.....	123
Βιβλιογραφία.....	125

5ο Κεφάλαιο

Συμπεράσματα και προοπτικές περαιτέρω έρευνας

Συμπεράσματα και προοπτικές περαιτέρω έρευνας.....	127

Βιογραφικό σημείωμα.....	131

Λίστα σχημάτων

1ο Κεφάλαιο

Ακουστική και Συντονιστές

Σχήμα 1.2.1 Απεικόνιση της Κλίμακας του Πυθαγόρα από τον F. Gaffurio, *Theorica Musica*, Μιλάνο 1492. (σελ.22)

Σχήμα 1.2.2 Ξυλογραφία η οποία απεικονίζει την κατασκευή των τοίχων βάση του 7ου βιβλίου του Βιτρούβιου από τον Steedman (1521). (σελ.23)

Σχήμα 1.2.3 α. Σχήμα Συντονιστές Helmholtz από μπρούντζο, κάθε συντονιστής συντονίζεται σε μια μόνο συχνότητα. **β.** Ο συντονιστής Helmholtz στην πειραματική διάταξη παραγωγής ενός τόνου σχεδιασμένο από τον Hermann von Helmholtz (1863). (σελ.24-25)

Σχήμα 1.3.1 Γεωμετρία του συντονιστή Helmholtz. (σελ.26)

Σχήμα 1.3.2 α. Οι φάσεις λειτουργίας του συντονιστή Helmholtz. **β.** Οι αντίστοιχες φάσεις λειτουργίας του ισοδύναμου μηχανικού συστήματος. (σελ.27)

Σχήμα 1.3.3 Απορρόφηση συντονιστή Helmholtz σε ιδανικές συνθήκες σε σχέση με τη συχνότητα. (σελ.28)

Σχήμα 1.3.4 Συντονιστές εντοιχισμένοι σε σκανδιναβικές εκκλησίες. **α.** Ένας τύπος συντονιστή **β.** Ένας διαφορετικός τύπος συντονιστή με υπολείμματα στάχτης. (σελ.28)

Σχήμα 1.6.1 Τομή διάτρητης επιφάνειας με πορώδες υλικό. (σελ.32)

Σχήμα 1.6.2 Συντονιστής ενός τετάρτου μήκους κύματος. (σελ.32)

Σχήμα 1.6.3 Πλευρικός συντονιστής διάτρητου σωλήνα. (σελ.32)

Σχήμα 1.7.1 Προσομοίωση του συντονιστή Helmholtz ως μηχανικό ταλαντωτή ενός βαθμού ελευθερίας. (σελ.33)

Σχήμα 1.8.1 Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του συντονιστή Helmholtz. (σελ.34)

Σχήμα 1.8.2 Κίνηση του αέρα του λαμού του συντονιστή. (σελ.35)

Σχήμα 1.9.1 Διάγραμμα τμημάτων εμπροσθοτροφοδοτούμενου IIR φίλτρου 2^{ης} τάξης. (σελ.37)

Σχήμα 1.9.2 Κρουστική απόκριση φίλτρου **α.** στο πεδίο του χρόνου **β.** στο πεδίο της συχνότητας. (σελ.38)

Σχήμα 1.10.1 Κίνηση της αέριας μάζας του στομίου του συντονιστή. (σελ.38)

Σχήμα 1.10.2 Συντονιστής με μακρύ και λεπτό, σύμφωνα με τον Tang [1.4.4]. (σελ.40)

Σχήμα 1.10.3 Σφαιρικός συντονιστής σε τομή. (σελ.41)

Σχήμα 1.10.4 Κατανεμημένος συντονιστής με μορφή διάτρητης πλάκας. Οι οπές είναι αρκετά μακριά η μια από την άλλη, έτσι ώστε να θεωρείται ότι ο κάθε συντονιστής λειτουργεί αυτόνομα. Εδώ έχουν σημασία το εμβαδόν της οπής ή αλλιώς ενεργός διατομή S_{HR} αλλά και η ενεργός διατομή της κοιλότητας A_{HR} . (σελ.42)

Σχήμα 1.11.1 Γράφημα που φαίνεται η συμπεριφορά των ενεργών διατομών σκέδασης σε σχέση με το γ . Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε άλλη τιμή του παράγοντα Q . Φαίνεται ότι όταν ισχύει $Q > 1/\sqrt{2}$ η ενεργός διατομή σκέδασης γίνεται μέγιστη ενώ όταν ισχύει $Q < 1/\sqrt{2}$ τότε η ενεργός διατομή αυξάνει μονότονα με την αύξηση του γ . (σελ.47)

Σχήμα 1.11.2 Γράφημα που φαίνεται η συμπεριφορά των ενεργών διατομών απορρόφησης ζ σε σχέση με το γ . Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε άλλη τιμή του παράγοντα Q . (σελ.47)

2ο Κεφάλαιο

Εξομοίωση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Σχήμα 2.3.1 Το πλέγμα (mesh) ενός εξομοιωμένου συντονιστή Helmholtz σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων. (σελ.62)

Σχήμα 2.3.2 Αποτέλεσμα πεπερασμένων στοιχείων, η συχνотική απόκριση ενός συντονιστή Helmholtz. (σελ.63)

Σχήμα 2.4.1 Το μοντέλο εξομοίωσης όπου απεικονίζεται η θετική γωνία στρέψης των ηχοπετασμάτων, η πηγή και η ευθεία πάνω στην οποία βρίσκονται οι δέκτες. (σελ.66)

Σχήμα 2.4.2 Η κατανομή της ακουστικής πίεσης στο χώρο στα 125, 250, 500 και 1000Hz για τις δυο ακραίες κλίσεις των ηχοφραγμάτων : **α.** $+20^\circ$ και **β.** -20° . (σελ.67)

Σχήμα 2.4.3 Στάθμη της ακουστικής πίεσης σε σχέση με την απόσταση όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.4.1 για **α.** 125Hz **β.** 250Hz **γ.** 500Hz **δ.** 1000Hz. (σελ.68)

Σχήμα 2.5.1 Θόρυβος από τις τρεις πηγές θορύβου συναρτήσει της ταχύτητας του οχήματος για δύο τύπους οχημάτων, με πράσινο ο θόρυβος από τα ελαστικά, με μπλε από τη μηχανή και με κόκκινο από την εξάτμιση: **α.** για αυτοκίνητο με diesel μηχανή και **β.** για σπορ αυτοκίνητο (σελ.69)

Σχήμα 2.5.2 Όψη του μοντέλου του αυτοκινήτου στο δρόμο με τις θέσεις των πηγών και του δέκτη. (σελ.70)

Σχήμα 2.5.3 Γεωμετρία του FEM μοντέλου αυτοκίνητο - τούνελ - ηχοαπορροφητική επιφάνεια από διάτρητο υλικό (στο επάνω μέρος φαίνεται λεπτομέρεια της διάτρησης). (σελ.70)

Σχήμα 2.5.4 Εξομοιωμένο μοντέλο αυτοκινήτου στο οδόστρωμα με τη μέθοδο FEM (οι πηγές εκπέμπουν ημίτονα 300Hz) **α.** σε ελεύθερο πεδίο **β.** σε τούνελ. (σελ.71)

Σχήμα 2.5.5 Σύγκριση τιμών των υπολογισμένων σταθμών θορύβου(dB) σε ανοικτούς δρόμους, σε τούνελ και τούνελ με διάτρητη επιφάνεια. (σελ.71)

Σχήμα 2.6.1 Γεωμετρία του δισδιάστατου μοντέλου απορροφητή μεμβράνης. (σελ.72)

Σχήμα 2.6.2 Συχνотική απόκριση των μοντέλων του πίνακα 2.6.1. (σελ.73)

Σχήμα 2.6.3 Ακουστικό πεδίο του $1^{ου}$ μοντέλου για διέγερση σε τρεις διαφορετικές συχνότητες. (σελ.74)

Σχήμα 2.7.1 Μοντέλο διάτρητης επιφάνειας (8x8) σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων. (σελ.74)

Σχήμα 2.7.2 Απόκριση συχνότητας της εξομοιωμένης διάτρητης επιφάνειας **α.** στο μακρινό πεδίο **β.** στο κοντινό πεδίο. (σελ.75)

Σχήμα 2.7.3 Τρισδιάστατα μοντέλα της διάτρητης επιφάνειας με μεταβλητό όγκο, σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων. (σελ.76)

Σχήμα 2.7.4 Ακουστικό πεδίο σε συχνότητα 100Hz της διάτρητης επιφάνειας (επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία). (σελ.76)

Σχήμα 2.7.5 Συχνотική απόκριση μοντέλου (διάτρητης επιφάνειας). (σελ.77)

Σχήμα 2.7.6 Η συχνότητα συντονισμού τ της διάτρητης επιφάνειας με μεταβλητό όγκο όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5.3. (σελ.77)

3ο Κεφάλαιο

Η συμβολή των συντονιστών στο αρχαίο θέατρο της Λυττούς

Σχήμα 3.1.1 Τα αγγεία στα αρχαία θέατρα σύμφωνα με τον Francesco di Martino (αριστερά) και αναπαράσταση αρχαίου θεάτρου με συντονιστές κατά τον Floriot (δεξιά). (σελ.80)

Σχήμα 3.2.1 Θέση της αρχαίας Λυττούς. (σελ.80)

Σχήμα 3.2.2 Πλάνο του θεάτρου της Λυττούς, σύμφωνα με τον Onorio Belli. Στο πλάνο, βλέπουμε τα 4 μέρη του θεάτρου με 13 βάζα στο καθένα. (σελ.81)

Σχήμα 3.3.1 Αναπαράσταση κοιλότητας με αντηχείο στο θέατρο Beth Sean κατά τον Izenour. (σελ.83)

Σχήμα 3.3.2 Τρισδιάστατο CAD μοντέλο του θεάτρου της Λυττούς. (σελ.84)

Σχήμα 3.4.1 Κοιλότητες των καθισμάτων **α.** Τυπική μορφή καθισμάτων **β.** σύμφωνα με την εξομοίωση. (σελ.84-85)

Σχήμα 3.4.2 Θέσεις που επιλέχτηκαν για τον υπολογισμό των δεικτών ακουστικής ποιότητας στο μοντέλο προσομοίωσης. (σελ.85)

Σχήμα 3.4.3 Οκταβικές στάθμες θορύβου στις τρεις θέσεις μέτρησης (κοντά-κέντρο-μακριά). (σελ.86)

Σχήμα 3.4.4 Χρόνοι αντήχησης στις τρεις θέσεις μέτρησης. (σελ.86)

Σχήμα 3.4.5 Στιβαρότητα πηγής στις τρεις θέσεις μέτρησης. (σελ.87)

Σχήμα 3.4.6 Δείκτης *LEF* στις τρεις θέσεις μέτρησης. (σελ.87)

Σχήμα 3.4.7 Δείκτης *RASTI* στις τρεις θέσεις μέτρησης. (σελ.87)

Σχήμα 3.5.1 Πλάνο του θεάτρου της Λυττούς από το τρισδιάστατο μοντέλο του CAD που απεικονίζει τις θέσεις των βάζων (A01-A39) και τις θέσεις των δεκτών (01-47). (σελ.88)

Σχήμα 3.5.2 Λεπτομέρεια του ψηφιοποιημένου αγγείου. (σελ.88)

Σχήμα 3.5.3 α. Το πλέγμα του FEM μοντέλου του συστήματος κοιλότητα - συντονιστής. **β.** Συχνотική απόκριση του συστήματος (κόκκινη συνεχής γραμμή), συγκρινόμενη με τη συχνотική απόκριση του συντονιστή χωρίς την κοιλότητα (μπλε διακεκομμένη γραμμή). (σελ.89)

Σχήμα 3.5.4 Το ακουστικό πεδίο των FEM μοντέλων στη συχνότητα συντονισμού (270Hz) του συντονιστή. **α.** Η επιφάνεια με το σύστημα κοιλότητα - συντονιστή. **β.** Η επιφάνεια με την ισοδύναμη πηγή. (σελ.90)

Σχήμα 3.5.5 Κάτοψη του θεάτρου της Λυττούς που απεικονίζει τη θέση της κεντρικής πηγής (A00) (►), των αγγείων (A01-A39) (►) και των δεκτών (01-12) (●). (σελ.91)

Σχήμα 3.5.6 Λεπτομέρεια που δείχνει την θέση των συντονιστών. (σελ.91)

Σχήμα 3.6.1 Καμπύλες κεντρικού χρόνου (T_s) για την οκτάβα των 250Hz σε σχέση με την απόσταση από την κύρια ή τη δευτερεύουσα πηγή. Η πηγή A00 είναι η κύρια πηγή που βρίσκεται στο κέντρο της σκηνής ενώ οι πηγές A03, A17 και A30, είναι οι δευτερεύουσες πηγές όπως φαίνονται στο σχήμα 3.5.5. (σελ.92)

Σχήμα 3.6.2 Σύγκριση της ακουστικής πίεσης που παράγει η κύρια πηγή (πηγή A00 συνεχής κόκκινη γραμμή) και από τη δευτερεύουσα πηγή (συντονιστής "πηγή" A03, διακεκομμένη μπλε γραμμή). (σελ.93)

Σχήμα 3.6.3 Η επίδραση στον δείκτη LEF (250Hz σε μπάντα οκτάβας) της κύριας πηγής A00 και των συντονιστών "πηγές" A03, A17 και A30 σε συνάρτηση της απόστασης. (σελ.93)

Σχήμα 3.6.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων από το εξομοιωμένο θέατρο της Λυττούς με τις μετρήσεις από το θέατρο της Επιδαύρου από τον Ψαρά κα. [3.2.4]. **α.** strength G vs frequency **β.** clarity $C80$ vs frequency. (σελ.94)

Σχήμα 3.6.5 Αποτελέσματα εξομοίωσης του θεάτρου της Λυττούς και του θεάτρου της Επιδαύρου από τους Vassilantonopoulos et al. (σελ.95)

4ο Κεφάλαιο

Εξομοίωση διάτρητων επιφανειών ως ψηφιακό φίλτρο

Σχήμα 4.1.1 Μέθοδος σωλήνα στάσιμου κύματος. (σελ.100)

Σχήμα 4.1.2 Μέθοδος ριπής τόνου **α.** χωρίς φράγμα **β.** με φράγμα. (σελ.101)

Σχήμα 4.1.3 Κάτοψη χώρου και η καμπύλη του ρυθμού μείωσης της ακουστικής ενέργειας για τον κάθε χώρο **α.** χώρος χωρίς ηχοαπορροφητική επιφάνεια **β.** ο ίδιος χώρος με ηχοαπορροφητική επιφάνεια. (σελ.101)

Σχήμα 4.2.1 Απεικόνιση του πεδίου ενίσχυσης και απορρόφησης που δημιουργεί ο συντονιστής. (σελ.103)

Σχήμα 4.2.2 Ανάλυση της πηγής σε μια σειρά από γραμμικές πηγές πεπερασμένου μήκους. (σελ.103)

Σχήμα 4.2.3 Αναπαράσταση του μοντέλου του συντονιστή Helmholtz (HR) τοποθετημένου σε μια επιφάνεια, στο ελεύθερο πεδίο. Στο σχήμα φαίνονται οι διαδρομές των ακουστικών σημάτων. (σελ.105)

Σχήμα 4.2.4 Τυπική απόκριση στο σημείο του δέκτη C (0, 1, 2) ενός συντονιστή Helmholtz (με συχνότητα συντονισμού $f_0=120\text{Hz}$) ο οποίος βρίσκεται στο σημείο B (0, 0, 0). Το σύστημα διεγείρεται από μία παντοκατευθυντική πηγή, η οποία βρίσκεται στο σημείο A (0, 0, 1) και εκπέμπει τη στιγμή $t=0$ κρουστικό παλμό δ , χωρίς να ληφθεί υπόψη η ανάκλαση από την επιφάνεια **α.** Κρουστική απόκριση στο πεδίο του χρόνου **β.** Κρουστική απόκριση στο πεδίο της συχνότητας. (σελ.106)

Σχήμα 4.2.5 Μία διάτρητη επιφάνεια με 4x4 στοιχεία (συντονιστές Helmholtz): **α.** κάτοψη, **β.** τομή. (σελ.108)

Σχήμα 4.2.6 Αναπαράσταση της απόκρισης μιας διάτρητης επιφάνειας με 4x4 στοιχεία (συντονιστές Helmholtz) και των διαδρομών των σημάτων. (σελ.108)

Σχήμα 4.2.7 Σχετικές στάθμες πίεσης που φθάνουν στον δέκτη από: την πηγή (απευθείας σήμα), τους συντονιστές και από την ανάκλαση της επιφάνειας χωρίς να ισοσταθμιστούν τα σήματα από τους συντονιστές **α.** για έναν συντονιστή **β.** τέσσερις συντονιστές. (σελ.110)

Σχήμα 4.2.8 Σχετικές στάθμες πίεσης που φθάνουν στον δέκτη από: την πηγή (απευθείας σήμα), τους συντονιστές και από την ανάκλαση της επιφάνειας με ισοσταθμισμένα σήματα από τους συντονιστές **α.** για έναν συντονιστή **β.** τέσσερις συντονιστές. (σελ.110)

Σχήμα 4.2.9 Διάγραμμα για το προτεινόμενο μοντέλο φίλτρου μιας απορροφητικής διάτρητης επιφάνειας που περιέχει μια συστοιχία από N συντονιστές Helmholtz. Αυτό το διάγραμμα αφορά το ιδανικό μοντέλο σε ελεύθερο πεδίο. Για την περίπτωση του διάχυτου πεδίου, η είσοδος θα είναι η κρουστική απόκριση ενός ιδανικού διάχυτου πεδίου, ενώ η απευθείας διαδρομή αγνοείται (βλέπε παράγραφο 4.2.4). (σελ.111)

Σχήμα 4.2.10 Συνολική σχετική στάθμη σημάτων που φθάνουν στον δέκτη από: την πηγή (απευθείας σήμα), από την ανάκλαση στην επιφάνεια και τους συντονιστές **α.** στο πεδίο του χρόνου **β.** στο πεδίο της συχνότητας. (σελ.112)

Σχήμα 4.2.11 Απόκριση στη θέση C (0, 1, 2) του δέκτη για μια συστοιχία συντονιστών Helmholtz (με $f_0=120\text{Hz}$) 4x4 στοιχείων, διάτρητης επιφάνειας στο σημείο B (0, 0, 0) και πηγή ευρισκόμενη στη θέση A (0, 0, 1) η οποία εκπέμπει την $t=0$ συνάρτηση δ. **α.** κρουστική απόκριση **β.** απόκριση στο πεδίο της συχνότητας. (σελ.112)

Σχήμα 4.2.12 Τυπικά αποτελέσματα για εξομοίωση σε διάχυτο πεδίο για μια ηχοαπορροφητική διάτρητη επιφάνεια 50x50 στοιχείων (συντονιστές Helmholtz). Η συχνότητα συντονισμού κάθε συντονιστή είναι $f_0=120\text{Hz}$ και ο χρόνος αντήχησης δωματίου $T_r=3\text{sec}$. Ο ανεξάρτητος συχνότητας συντελεστής απορρόφησης για την επιφάνεια ορίστηκε $\overline{a_p}=0.1$. **α.** Μέσος όρος εξομοιωμένων πιέσεων εξόδου από φίλτρο ζώνης 1/3 οκτάβας (εδώ απεικονίζονται μόνο οι σχετικές πιέσεις σε dB γύρω από τη συχνότητα συντονισμού, f_0), **β.** Ρυθμός μείωσης της ενέργειας στην τριτοκτάβα της συχνότητας συντονισμού (f_0) σε dB, **γ.** Ο υπολογισμένος εξαρτημένος από τη συχνότητα συντελεστής απορρόφησης του συστήματος συστοιχία συντονιστών Helmholtz - επιφάνεια (βλέπε παράγραφο 4.2.5). (σελ.115)

Σχήμα 4.2.13 Διάγραμμα τμημάτων που απεικονίζει τα βήματα για την προσομοίωση του διάχυτου πεδίου μέσω της απόκρισης στο θάλαμο βάση της αντήχησης του (εξίσωση 4.2.26), την επίδραση της διάτρητης επιφάνειας μέσα στο θάλαμο (εξίσωση 4.2.28), η ανάλυση 1/3 οκτάβας των αντίστοιχων λύσεων και με την εκτίμηση του χρόνου αντήχησης ο υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης της διάτρητης επιφάνειας (εξίσωση 4.2.30). (σελ.116)

Σχήμα 4.3.1 Χαρακτηριστικά της διάτρητης επιφάνειας Quadra 5-40 της Rektion Akustik. (σελ.118)

Σχήμα 4.3.2 Σύγκριση τυπικών αποτελεσμάτων των τιμών του συντελεστή απορρόφησης μιας εμπορικής διάτρητης ηχοαπορροφητικής επιφάνειας που υπολογίστηκαν από το προτεινόμενο εξομοιωμένο μοντέλο και των δημοσιευμένων μετρήσεων από την εταιρία που προέκυψαν μέσω μετρήσεων από πιστοποιημένο εργαστήριο. (σελ.118)

Σχήμα 4.3.3 Κάτοψη συστοιχίας δύο διαφορετικών τύπων συντονιστών Helmholtz 4x4. (σελ.119)

Σχήμα 4.3.4 Συχνотική απόκριση τεσσάρων μοντέλων διάτρητων επιφανειών (10x10) με δύο διαφορετικούς τύπους συντονιστών. (σελ.119)

Σχήμα 4.3.5 Όψη συστοιχίας συντονιστών 10x10 με τον δέκτη να μετατοπίζεται κατά 1° σε κάθε μέτρηση. (σελ.120)

Σχήμα 4.3.6 Πολικό διάγραμμα για διαφορετικές αποστάσεις των συντονιστών, σε διαφορετικές συχνότητες με συχνότητα συντονισμού των συντονιστών $f_0=105\text{Hz}$. (σελ.121)

Σχήμα 4.3.7 Πολικό διάγραμμα για διαφορετικές αποστάσεις των συντονιστών, σε διαφορετικές συχνότητες με συχνότητα συντονισμού των συντονιστών $f_0=115\text{Hz}$. (σελ.121)

Σχήμα 4.3.8 Πολικό διάγραμμα για διαφορετικές αποστάσεις των συντονιστών, σε διαφορετικές συχνότητες με συχνότητα συντονισμού των συντονιστών $f_0=125\text{Hz}$. (σελ.122)

Σχήμα 4.3.9 Πολικό διάγραμμα για διαφορετικές αποστάσεις των συντονιστών, σε διαφορετικές συχνότητες με συχνότητα συντονισμού των συντονιστών $f_0=135\text{Hz}$. (σελ.122)

Λίστα Πινάκων

1ο Κεφάλαιο

Ακουστική και Συντονιστές

Πίνακας 1.8.1 Τα στοιχεία του ηλεκτρικού ισοδύναμου σε αντιστοιχία με ακουστικά. (σελ.37)

2ο Κεφάλαιο

Εξομοίωση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Πίνακας 2.3.1 Γεωμετρία των επτά εξομοιωμένων μοντέλων. (σελ.72)

4ο Κεφάλαιο

Εξομοίωση διάτρητης επιφάνειας ως ψηφιακό φίλτρο

Πίνακας 4.2.1 Τιμές του συντελεστή απορρόφησης ανά συχνотική μπάντα τριτοκτάβας (μέχρι 500 Hz) για την εξομοιωμένη επιφάνεια. (σελ.112)

Πίνακας 4.3.1 Τιμές του συντελεστή απορρόφησης σε μπάντες 1/3 οκτάβας του κοντραπλακέ για την εξομοίωση της επιφάνειας. (σελ.118)

Πίνακας 4.3.2 Μια τυπική σύγκριση του χρόνου που χρειάζεται ένας σύγχρονος υπολογιστής για την αριθμητική αξιολόγηση N στοιχείων (συντονιστών Helmholtz) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και τη προτεινόμενη μέθοδο εξομοίωσης μέσω φίλτρων. Και στις δύο περιπτώσεις οι υπολογισμοί έφτασαν μέχρι τη συχνότητα των 500Hz. (σελ.123)

Λίστα Συμβόλων

a	συντελεστής απορρόφησης
a_r	συντελεστής απορρόφησης
A	συντελεστής επιφανειακής απορρόφησης
A_{HR}	ενεργός διατομή της κοιλότητας
a_P	συντελεστής απορρόφησης της επιφάνειας
B	συχνотικό εύρος
c	ταχύτητα του ήχου
C	χωρητικότητα του πυκνωτή
C_{80}	ευκρίνεια ή δείκτης διαύγειας
c_f	παράγοντας καλιμπραρίσματος
c_{HR}	παράγοντας διόρθωσης των άκρων
D_{50}	διακριτότητα
d_{HR}	απόσταση μεταξύ των συντονιστών
EDT	early decay time
f	συχνότητα
f_0	συχνότητα συντονισμού
f_n	εμβαδόν διατομής του λαιμού του συντονιστή
F_s	ρυθμός δειγματοληψίας
G	δείκτης ισχύος
$h(n)$	κρουστική απόκριση σε διακριτό χρόνο
$h(t)$	κρουστική απόκριση σε συνεχή χρόνο
HR	Helmholtz Resonator (συντονιστής Helmholtz)
I	ένταση ακουστικού κύματος
I_c	ένταση ρεύματος
I_s	ένταση επανεκπεμπόμενου ήχου
k	κυματάριθμος
k_0	γωνιακός κυματάριθμος
k_c	επιλεγμένος συντελεστής εξασθένησης
k_m	συντελεστής σκληρότητας ελατηρίου
L	μήκος της απόκρισης του σήματος
L_c	επαγωγή
LEF	πλευρικές ανακλάσεις (lateral energy fraction)
L'_{HR}	διορθωμένο μήκος του λαιμού του συντονιστή
l_{HR}	μήκος της κοιλότητας του συντονιστή Helmholtz
L_{HR}	μήκος του λαιμού του συντονιστή
l_V	παράγοντας μορφής του συντονιστή
m	μάζα
m_R	δείκτης διαμόρφωσης
m_r	συντελεστής εξασθένησης της ενέργειας
$m_{\lambda\text{λαιμού}}$	μάζα του λαιμού του συντονιστή Helmholtz
n	samples
n_s	λόγος στασίμου κύματος
N	πλήθος των συντονιστών
N_x	πλήθος των συντονιστών στη x διάσταση
N_y	πλήθος των συντονιστών στη y διάσταση
p	ακουστική πίεση
Q	παράγοντας ποιότητας
q	ταχύτητα όγκου
$\mathbf{q}_d$	διπολική πηγή

Q_m	πηγή μονόπολου
R	αντίσταση
r	απόσταση
r_0	εξωτερική ακτίνα του λεπτού λαιμού
$RASTI$	rapid speech transmission index
r_{HR}	ακτίνα του στομίου του συντονιστή
R_i	ειδική ακουστική αντίσταση
r_i	εσωτερική ακτίνα του λεπτού λαιμού
R_m	συντελεστής απόσβεσης
R_m	συντελεστής απόσβεσης ελατηρίου
R_s	επιφανειακή αντίσταση
S_{HR}	διατομή της κοιλότητας του συντονιστή Helmholtz
S_{HR}	επιφάνεια του στομίου του συντονιστή
S_p	επιφάνεια της ηχοαπορροφητικής επιφάνειας
S_r	επιφάνεια του δωματίου
t	χρόνος
T	χρόνος αντήχησης
t_{HR}	το πάχος των τοιχωμάτων
T_p	χρόνος αντήχησης δωματίου με παρουσία ηχοαπορροφητικής επιφάνειας
T_r	χρόνος αντήχησης δωματίου
T_s	κεντρικός χρόνος
U	ταχύτητα όγκου
u_s	εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας στα εσωτερικά τοιχώματα του λαιμού του ανοίγματος του συντονιστή
V	όγκος
V_c	τάση ρεύματος
V_{HR}	όγκος του σώματος του συντονιστή
V_N	όγκος που καταλαμβάνει ο λαιμός του συντονιστή
V_r	όγκος δωματίου
$w(n)$	λευκός θόρυβος σε διακριτό χρόνο
$w(t)$	λευκός θόρυβος σε συνεχή χρόνο
x	Καρτεσιανές συντεταγμένες, μεταβλητή
y	Καρτεσιανές συντεταγμένες, μεταβλητή
Z	εμπέδηση
z	Καρτεσιανές συντεταγμένες, μεταβλητή
γ	λόγος των ειδικών θερμοτήτων του αέρα υπό σταθερή πίεση και όγκο
δ	κρουστική απόκριση delta function
ζ	κανονικοποιημένη ειδική σύνθετη αντίσταση
η	ιξώδες
λ	μήκος κύματος
λ_0	μήκος κύματος συντονισμού
λ_k	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα
μ	ιξώδες του αέρα
ξ	μεταβλητή
ρ	πυκνότητα του αέρα
σ	επιφάνεια του τοίχου ανά συντονιστή
T	χρόνος αντήχησης
ω	γωνιακή συχνότητα
ω_0	γωνιακή συχνότητα συντονισμού
ω_k	διακριτή γωνιακή συχνότητα

1ο Κεφάλαιο

Ακουστική και Συντονιστές

1.1 Εισαγωγή

Συντονιστής είναι μια κοιλότητα (πχ μια φιάλη, ένα πιθάρι, ένας μικρός κλειστός χώρος) με ένα ή περισσότερα ανοίγματα και έχει την ιδιότητα να συντονίζεται σε ορισμένες συχνότητες. Η σημερινή μας γνώση για τη λειτουργία των συντονιστών, που ονομάζονται και συντονιστές Helmholtz, δεν είναι πλήρης. Αυτός είναι και ο λόγος για το μεγάλο ενδιαφέρον που δείχνουν οι επιστήμονες σε παγκόσμιο επίπεδο ακόμη και στις μέρες μας. Από την πρώτη σαφή αναφορά στους συντονιστές, που έγινε από τον Αριστοτέλη τον 4^ο αιώνα π.Χ., μέχρι στις μέρες μας, οι επιστήμονες δραστηριοποιούνται σε αυτό το ερευνητικό πεδίο κι έτσι πραγματοποιούνται σύγχρονες κατασκευές, οι οποίες βασίζονται στην εν λόγω λειτουργία. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αρχικά μια ιστορική αναδρομή στους συντονιστές. Στη συνέχεια του κεφαλαίου (στις δύο επόμενες υποενότητες) γίνεται μια λεπτομερής αναφορά των βασικών αρχών λειτουργίας των συντονιστών, καθώς παρατίθενται τύποι και ισοδύναμα συστήματα που είναι απαραίτητα για τα κατανόηση της λειτουργίας ενός συντονιστή. Τέλος, στην τελευταία υποενότητα περιγράφονται οι ακουστικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την μελέτη της ακουστικής ποιότητας ενός χώρου, των οποίων η βελτίωση με κατασκευές των οποίων η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην αρχή λειτουργίας των συντονιστών περιγράφεται στα επόμενα κεφάλαια.

1.2 Ιστορικά στοιχεία

Ο Πυθαγόρας (5^{ος} αιώνας π.Χ.) ήταν ο πρώτος που παρατήρησε τις αρμονικές ταλαντώσεις στις χορδές και διατύπωσε τη σχέση που θα πρέπει να έχουν οι συχνότητες δύο ταλαντώσεων ώστε να χαρακτηρίζονται ως αρμονικές. Με τη βοήθεια μιας τεταμένης χορδής παρατήρησε ότι η χορδή πάλλεται εκτός απ' όλο της το μήκος καθώς και σε τμήματά της, που είναι ακέραιες υποδιαιρέσεις του ολικού της μήκους. Έχοντας τη γνώση ότι το μήκος της χορδής είναι αντιστρόφως ανάλογο προς το ύψος (τη συχνότητα) του ήχου, μπόρεσε να καθορίσει και τα ύψη των ήχων που παράγονται από αυτές τις αρμονικές ταλαντώσεις. Η πίστη του Πυθαγόρα και των μαθητών του στη σχεδόν μαγική δύναμη των αριθμών, τον οδήγησε στην ανακάλυψη του αριθμού που παράγει όλες τις μουσικές νότες. Ο αριθμός αυτός είναι -κατά τον Πυθαγόρα- ο $\frac{2}{3}$ και η Δυτική μουσική έχει φτάσει στη σημερινή της μορφή έχοντας βασιστεί, σε μεγάλο βαθμό, στη Πυθαγόρεια κλίμακα.

Σχήμα 1.2.1 Απεικόνιση της Κλίμακας του Πυθαγόρα από τον F. Gaffurio, *Theorica Musica*, Μιλάνο 1492.

Ενάμιση αιώνα αργότερα η πρώτη σημαντική αναφορά στην ιστορία για τη θεωρία των συντονιστών, ήταν του Αριστοτέλη στο περίφημο βιβλίο του “Προβλήματα” [1.2.1]. Στο 11ο βιβλίο των Προβλημάτων, ο Αριστοτέλης θέτει ερωτήματα σε σχέση με τον ήχο και προσπαθεί να δώσει απαντήσεις. Αναφέρει, λοιπόν, σε κάποιο σημείο: «Διά τι, εάν τις πίθον και κεράμια κενά κατορύξη και πωμάση, μάλλον ηχεί τα οικήματα, και εάν φρέαρ ή λάκκος ή εν τη οικία;...». Αναρωτιέται, λοιπόν, ο φιλόσοφος Αριστοτέλης, γιατί αν θαφτεί ένα πιθάρι σ’ ένα τοίχο ενός κτηρίου αντηχεί περισσότερο. Και απαντά μόνος του ότι πρέπει να συντελεί το γεγονός ότι ο όγκος του αέρα είναι μικρός και περιορισμένος, καθώς και το ότι τα τοιχώματα των αγγείων είναι συμπαγή. Ο Αριστοτέλης, στο ίδιο βιβλίο, θέτει κι άλλα πολλά ερωτήματα περί ακουστικής, τα οποία είναι επίκαιρα για την επιστήμη της ακουστικής ακόμα και σήμερα. Αυτή η αναφορά του Αριστοτέλη, πάντως, μας βάζει στη διαδικασία να σκεφτούμε ότι οι αρχαίοι Έλληνες ασχολήθηκαν με τον τομέα της ακουστικής και ίσως όχι τόσο εμπειρικά όσο φανταζόμαστε.

Μερικούς αιώνες αργότερα, γίνεται η πρώτη προσπάθεια να συστηματοποιηθούν οι μέχρι τότε γνώσεις γύρω από την αρχιτεκτονική ακουστική από το Ρωμαίο Αρχιτέκτονα Βιτρούβιο (1ος αιώνας μ.Χ.) με το βιβλίο του “Δέκα βιβλία για την Αρχιτεκτονική” (Marcus Vitruvius Pollio: “*De Architectura*”). Σ’ αυτό το βιβλίο, ο Βιτρούβιος θέτει τις βάσεις της αρχιτεκτονικής, δίνοντας οδηγίες για την αρχιτεκτονική κατασκευή κτηρίων σε μια πόλη. Στο πέμπτο κεφάλαιο του 5ου βιβλίου, αναφέρεται στην κατασκευή των θεάτρων με καλή ακουστική, ξεκινώντας από τον χώρο που πρέπει να επιλεγεί, μέχρι την τελευταία κατασκευαστική λεπτομέρεια. Αναφέρει, λοιπόν, ότι πρέπει η θέση του θεάτρου να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει τη διάδοση του ήχου με τη μεγαλύτερη δυνατή καθαρότητα και ο ήχος να μην παρεμποδίζεται από την ηχώ. Μιλάει για την κυματική φύση του ήχου, για τις ανακλάσεις και τα στάσιμα κύματα που δημιουργούνται, καθώς και για τη διάδοσή του στο χώρο, κυρίως τον ανοικτό, εφόσον μιλάμε για θέατρα της εποχής. Εξηγεί γιατί τα θέατρα πρέπει να φτιάχνονται με βαθμίδες και γιατί, χρησιμοποιώντας μαθηματικούς κανόνες αλλά και τους νόμους που διέπουν τη μουσική, μπορούμε να φτιάξουμε θέατρα όπου «...κάθε λέξη, που λέγεται στη σκηνή, να φθάνει με τη μεγαλύτερη δυνατή καθαρότητα και γλυκύτητα στα αυτιά των θεατών». Στη συνέχεια, δίνει κάποιες βασικές αρχές της ακουστικής και της μουσικής της εποχής για να μπορέσει αργότερα να μιλήσει με περισσότερες λεπτομέρειες για την κατασκευή των θεάτρων.

Ο Βιτρούβιος αφιερώνει ένα ολόκληρο κεφάλαιο του 5ου βιβλίου του, στους συντονιστές του θεάτρου, χρησιμοποιώντας τον όρο *echea* (ηχεία), τα οποία, όπως αναφέρει, πρέπει να κατασκευάζονται από ορείχαλκο, οι δε διαστάσεις τους να είναι ανάλογες του μεγέθους του θεάτρου, «ώστε όταν ο ήχος προσπίπτει επάνω τους, να παράγουν το ένα μετά το άλλο τους ήχους του δια τεσσάρων, του δια πέντε...» [1.2.2]. Προφανώς, οι τελευταίες λέξεις αυτής της φράσης του Βιτρούβιου έχουν να κάνουν με την αντίληψή του γύρω από τις

συχνότητες και το διαχωρισμό αυτών. Ο Βιτρούβιος περιγράφει λεπτομερέστατα τον τρόπο τοποθέτησης των αγγείων σ' ένα θέατρο, ενώ φροντίζει να τεκμηριώνει τις θέσεις του αυτές. Ο Βιτρούβιος χωρίζει τα θέατρα σε μεγάλα και μικρά και επεξηγεί με ποιο σκεπτικό τοποθετούνται τα ηχεία στο καθένα.

«... Από αυτήν τη διερεύνηση προκύπτει ότι πρέπει να κατασκευάζονται -επί τη βάση μαθηματικών σχέσεων- οριχάλκινα ηχεία ανάλογα του μεγέθους του θεάτρου με τέτοιο τρόπο, ώστε, όταν ο ήχος προσπίπτει επάνω τους, να παράγουν το ένα μετά τον άλλο τους ήχους του διά τεσσάρων, του διά πέντε και της υπόλοιπης σειράς μέχρι το δις διά πασών. Τα ηχεία αυτά πρέπει να τοποθετούνται, σύμφωνα με τους κανόνες της μουσικής, σε κόγχες διαμορφωμένες μεταξύ των εδωλίων των θεατών. Τα ηχεία δεν πρέπει να αγγίζουν σε τοίχο: περιμετρικά γύρω τους πρέπει να υπάρχει ελεύθερος χώρος από πάνω τους πρέπει επίσης να έχει αφεθεί κενό. Τοποθετούνται ανεστραμμένα προς την πλευρά που βλέπει τη σκηνή και στηρίζονται με σφήνες ύψους όχι μικρότερου από $1/2$ πόδια. Στα μέτωπα των εδωλίων, εμπρός ακριβώς από τις κόγχες, πρέπει να υπάρχουν ανοίγματα πλάτους 2 ποδών και ύψους $1/2$.

Οι θέσεις, οι οποίες προορίζονται για τη δημιουργία κογχών, καθορίζονται με τον ακόλουθο τρόπο: αν το θέατρο δεν είναι μεγάλο, τότε στο μέσον του ύψους του κοίλου λαμβάνεται μια οριζόντια γραμμή, στη γραμμή αυτή διαμορφώνονται 13 κόγχες που απέχουν μεταξύ τους 12 ίσα διαστήματα. Στις κόγχες, που βρίσκονται στα δύο άκρα του τόξου, το οποίο σχηματίζει η σειρά αυτών των εσοχών], τοποθετούνται τα ηχεία... Με αυτήν τη διάταξη, η φωνή που εκπέμπεται από τη σκηνή, σαν από το κέντρο ενός κύκλου, και διαδίδεται [όπως το κύμα που η απόσταση του από] το κέντρο μεγαλώνει συνεχώς, συναντά τα ηχεία στις κόγχες, αποκτά αυξημένη καθαρότητα και γίνεται πλουσιότερη. Αν όμως το θέατρο είναι μεγαλύτερο, τότε το ύψος του διαιρείται σε τέσσερα τμήματα. Έτσι προκύπτουν τρεις οριζόντιες γραμμές [στις οποίες διαμορφώνονται] κόγχες: η μια προορίζεται για την αρμονία, η δεύτερη για το χρώμα και η τρίτη για το διάτονον...

...Όποιος θέλει να τα εφαρμόσει αυτά εύκολα και χωρίς λάθη, ας προσέξει στο τέλος αυτού του βιβλίου το διάγραμμα που έχει συνταχθεί σύμφωνα με τους κανόνες της μουσικής. Το διάγραμμα αυτό το δημιούργησε με μεγάλη πνευματική δύναμη και επιμέλεια και μας το κληροδότησε ο Αριστοτέλης, ταξινομώντας τα μέλη σε διάφορα γένη. Αν οι υπολογισμοί γίνουν βάσει αυτού του διαγράμματος είναι δυνατόν να επιτευχθεί η τέλεια σύμφωνα με τη φύση της φωνής- διαμόρφωση των θεάτρων που εξασφαλίζει την απόλαυση των ακροατών...» [1.2.2]

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε σε ξυλογραφία μια απεικόνιση της περιγραφής του Βιτρούβιου στο 5ο βιβλίο, 14 αιώνες μετά από τον Steedman.

Σχήμα 1.2.2 Ξυλογραφία η οποία απεικονίζει την κατασκευή των τοίχων βάση του 7ου βιβλίου του Βιτρούβιου από τον Steedman (1521).

Στις μέρες μας, ο κοινός συντονιστής πήρε το όνομα του από τον Γερμανό φυσικό Hermann von Helmholtz (1821-1894). Ο Hermann von Helmholtz δραστηριοποιήθηκε σε πολλά επιστημονικά πεδία (στη μηχανική, στην οπτική, στη φυσιολογία, στη νευροφυσιολογία, στον ηλεκτρομαγνητισμό και άλλα) προσφέροντας πολλά στη σύγχρονη επιστήμη. Ένα από τα πεδία μεγάλου ενδιαφέροντος και έντονης ενασχόλησης του επιστήμονα ήταν η μελέτη και ανάλυση των μουσικών ήχων. Το 1863 δημοσίευσε το *“Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik”* [1.2.3] μεταφρασμένο στα Αγγλικά *“On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music”* [1.2.4], γνωστοποιώντας το ενδιαφέρον του για τη φυσική αντίληψη του ήχου. Το εν λόγω βιβλίο έγινε βιβλίο αναφοράς για αρκετούς μουσικολόγους του 20^{ου} αιώνα. Ο Helmholtz για να μπορέσει να αναλύσει τους σύνθετους ήχους σε άλλους απλούστερους εφηύρε το αντηχείο. Τα αντηχεία ήταν κοίλα δοχεία συνήθως σφαιρικού σχήματος από χαλκό ή γυαλί, με δύο εκ διαμέτρου αντίθετες οπές. Στη μια βρισκόταν η πηγή, και στην άλλη το αυτί του παρατηρητή. Το κάθε δοχείο είχε διαφορετικό μέγεθος και συντονιζόταν σε διαφορετική γνωστή συχνότητα. Ο προς ανάλυση ήχος, ανάλογα με τις συχνότητες που περιείχε, συντόνιζε τα αντίστοιχα ηχεία. Ο συντονισμός γινόταν αντιληπτός, από την ενίσχυση του ήχου που γινόταν αντιληπτή με την τοποθέτηση του αυτιού στο πίσω στόμιο των αντηχείων. Με την βοήθεια των αντηχείων μπορούμε επίσης να παράγουμε ήχους μιας συγκεκριμένης συχνότητας.

Στο σχήμα 1.2.3α απεικονίζονται οι συντονιστές που χρησιμοποίησε ο Helmholtz για την ανάλυση των ήχων, ενώ στο 1.2.3β η πειραματική διάταξη που κατασκεύασε για την παραγωγή τόνων, όπου ο συντονιστής είναι το κυλινδρικό αντικείμενο (i). Οι περισσότερες μουσικές αποχρώσεις οφείλονται στις αρμονικές συχνότητες. Ο σκοπός αυτής της συσκευής ήταν να δημιουργήσει ένα καθαρό τόνο. Ο ηλεκτρομαγνήτης (b) δονεί το διαπασών (a), ενώ το αντηχείο Helmholtz (i) είναι συντονισμένο με τη συχνότητα του διαπασών κι έτσι ενισχύεται η ένταση του ήχου.

α.

β.

Σχήμα 1.2.3 α. Συντονιστές από μπρούντζο που χρησιμοποίησε ο Helmholtz, κάθε συντονιστής συντονίζεται σε μια μόνο συχνότητα.

β. Ο συντονιστής Helmholtz στην πειραματική διάταξη παραγωγής ενός τόνου σχεδιασμένο από τον Hermann von Helmholtz (1863).

Ο Helmholtz έδειξε ότι με διαφορετικούς συνδυασμούς αντηχείων θα μπορούσε να αναλύει ήχους φωνηέντων. Σαράντα χρόνια αργότερα, ο Alexander Graham Bell ενδιαφέρθηκε και ασχολήθηκε με τη συγκεκριμένη εργασία. Όμως λόγω του ότι δεν ήταν σε θέση να διαβάσει γερμανικά, παρερμήνευσε τα διαγράμματα του Helmholtz, υπό την έννοια ότι η διάταξη του Helmholtz παρήγαγε πολλαπλές συχνότητες από το σύρμα, που αντιστοιχούσαν στις αρμονικές του θεμελιώδους. Η παρερμηνεία αυτή οδήγησε στη μετάδοση των τηλεγραφικών σημάτων, που στην πραγματικότητα αποτελούσαν μετάδοση ηλεκτρικών παλμών. Η ηλεκτρική ενέργεια είχε χρησιμοποιηθεί από τον Helmholtz μόνο για να κρατήσει τα αντηχεία σε κίνηση. Ο Bell απέτυχε να αναπαράγει αυτό που είχε σκεφτεί ο Helmholtz, όμως, αργότερα δήλωσε πως εάν ήταν σε θέση να διαβάσει γερμανικά, δεν θα είχε εφεύρει το τηλέφωνο, βασιζόμενος στην αρχή του τηλέγραφου [1.2.5].

1.3 Βασικές αρχές λειτουργίας των συντονιστών

Ο συντονιστής Helmholtz είναι ένα απλό παράδειγμα ενός ακουστικού στοιχείου (Σχήμα 1.3.1), το οποίο έχει την ιδιότητα, στο μακρινό πεδίο, να απορροφά την ακουστική ενέργεια επιλεκτικά γύρω από μια συχνότητα, την κεντρική συχνότητα συντονισμού. Όμως, εκτός από αυτή τη λειτουργία, παρατηρούνται επίσης και φαινόμενα σκέδασης. Η παράμετρος που παίζει το μεγαλύτερο ρόλο στη συμπεριφορά του συντονιστή είναι η γεωμετρία του ανοίγματος και αρκεί μια μικρή αλλαγή της, ώστε να παρατηρηθεί σημαντική μεταβολή στο συντελεστή απορρόφησης καθώς και στην συχνότητα συντονισμού. Οι μορφές που έχουν συνήθως οι συντονιστές είναι πολλές. Μια ειδική κατηγορία είναι οι συντονιστές μήκους $\lambda/4$ που στην πραγματικότητα είναι σωλήνες ανοικτοί στο ένα άκρο και κλειστοί στο άλλο.

Κλασικό παράδειγμα κατανεμημένου συντονιστή που χρησιμοποιείται συχνά, για τη βελτίωση της ακουστικής ποιότητας κυρίως κλειστών χώρων, είναι οι διάτρητες επιφάνειες.

Σχήμα 1.3.1 Γεωμετρία του συντονιστή Helmholtz.

Το βασικότερο στοιχείο ενός συντονιστή είναι ο λαιμός του, που έχει εμβαδόν επιφάνειας S_{HR} και μήκος L_{HR} . Η κίνηση της μάζας του λαιμού επηρεάζεται από τον όγκο της κοιλότητας V_{HR} , που ονομάζεται όγκος του συντονιστή.

Η αλληλεπίδραση του συντονιστή με το προσπίπτον ηχητικό κύμα γίνεται μέσω της ταλάντωσης της αέριας μάζας του λαιμού όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3.2(α). Ο μηχανισμός αυτός είναι ο εξής: Το ηχητικό κύμα προσπίπτει στον λαιμό και συμπιέζει την μάζα του λαιμού προς το εσωτερικό του συντονιστή. Η αέρια μάζα του λαιμού με την σειρά της συμπιέζει την αέρια μάζα της κοιλότητας, αυξάνοντας την πίεσή της. Αυτή στην συνέχεια, λόγω της ελαστικότητας του αέρα, εκτονώνεται και τείνει να επανέρθει στον αρχικό της όγκο, παρασύροντας την μάζα αέρα του λαιμού. Κατόπιν ο αέρας στο εσωτερικό του συντονιστή, ο οποίος λόγω της εκτόνωσης βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση από την ατμοσφαιρική, αναρροφά τη μάζα του αέρα πάλι προς τα μέσα. Έτσι έχουμε τελικά μια ταλάντωση της μάζας του αέρα του λαιμού.

Στο σχήμα 1.3.2α φαίνονται οι φάσεις λειτουργίας του συντονιστή Helmholtz με την βοήθεια ενός μηχανικού αναλόγου μάζας-ελατηρίου (σχήμα 1.3.2β). Στο ανάλογο αυτό η μάζα του λαιμού αντιστοιχεί στην μάζα του αναλόγου, το ελατήριο με σκληρότητα (k_m) στην μάζα της κοιλότητας και οι απώλειες τριβών στον συντελεστή απόσβεσης των ταλαντώσεων. Στη φάση I, απεικονίζεται ο συντονιστής πριν το κύμα του ήχου χτυπήσει το στόμιο, επομένως η μάζα του αέρα του λαιμού ($m_{\lambdaαιμού}$), ισορροπεί διότι οι πιέσεις εκατέρωθεν αυτής (της κοιλότητας και του περιβάλλοντος) είναι ίσες. Στη φάση II, η ακουστική πίεση του ηχητικού κύματος φθάνει στο στόμιο και η μάζα του αέρα του λαιμού, λόγω της διαφοράς πίεσης ηχητικού κύματος – ατμοσφαιρικής πίεσης, μετατοπίζεται προς τα κάτω συμπιέζοντας τον αέρα που βρίσκεται στο εσωτερικό του συντονιστή, σε μια πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Στην συνέχεια, η κύρια μάζα του συντονιστή εκτονώνεται, ωθώντας τη μάζα του αέρα του λαιμού, έτσι ώστε αυτή να απομακρυνθεί από την προηγούμενη θέση μέχρι να φτάσει τη μέγιστη απόσταση απ’ αυτήν (φάση III). Τότε η πίεση της κύριας μάζας του συντονιστή, λόγω της εκτόνωσης, γίνεται μικρότερη της ατμοσφαιρικής και η μάζα του αέρα του λαιμού, λόγω της νέας διαφοράς πίεσης που έχει δημιουργηθεί στα δύο άκρα του, κινείται αντίθετα, φθάνοντας την θέση ισορροπίας και ολοκληρώνοντας μια περίοδο ταλάντωσης. Οι τρεις αυτές φάσεις της λειτουργίας του συντονιστή καθώς και του μηχανικού του αναλόγου φαίνονται στο σχήμα 1.3.2.

Σχήμα 1.3.2 α. Οι φάσεις λειτουργίας του συντονιστή Helmholtz
β. Οι αντίστοιχες φάσεις λειτουργίας του ισοδύναμου μηχανικού συστήματος.

Σε γενικές γραμμές αν ισχύει $\lambda \gg L_{HR}$ (λ το μήκος κύματος), τότε το ρευστό στο λαιμό κινείται ως μονάδα για να παρέχει το στοιχείο της μάζας. Αν ισχύει $\lambda \gg V_{HR}^{1/3}$, τότε η ακουστική πίεση μέσα στην κοιλότητα παρέχει το στοιχείο της τριβής. Τέλος αν ισχύει $\lambda \gg S_{HR}^{1/3}$, το άνοιγμα εκπέμπει ήχο όπως κάνει μια απλή πηγή, συνεπώς παρέχει το στοιχείο αντίστασης [1.3.1]. Περαιτέρω αντίσταση παρέχεται από τις απώλειες λόγω ιξώδους στο λαιμό. Παρ' όλα αυτά, για λαιμούς με διάμετρο 1 εκατοστό και μεγαλύτερη, οι απώλειες λόγω ιξώδους είναι συνήθως πολύ μικρότερες απ' αυτές που συνδέονται με την εκπομπή και μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

Σχήμα 1.3.3 Απορρόφηση συντονιστή Helmholtz σε ιδανικές συνθήκες σε σχέση με τη συχνότητα.

Από την διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως προκύπτει ότι ο συντονιστής (όπως ακριβώς και το μηχανικό ανάλογο) συντονίζεται σε μια μόνο συχνότητα, την συχνότητα συντονισμού του συντονιστή. Στην συχνότητα αυτή τόσο η απορρόφηση όσο και η σκέδαση παίρνει την μέγιστη τιμή. Το σχήμα 1.3.3 δείχνει την απορρόφηση του συντονιστή σε συνάρτηση με την συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος. Από το σχήμα φαίνεται ότι η απορρόφηση αυτή έχει ένα οξύ μέγιστο στην συχνότητα συντονισμού. Το μέγιστο αυτό διαπλατώνεται και χαμηλώνει όταν αυξηθεί η τριβή του αέρα με τα τοιχώματα του συντονιστή. Τεχνικά αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη απορροφητικού στην κοιλότητα του συντονιστή. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην Σκανδιναβία βρέθηκαν συντονιστές εντοιχισμένοι σε εκκλησίες (βλέπε σχήμα 1.3.4) που μέσα σε αυτούς υπήρχαν υπολείμματα στάχτης, που προφανώς είχαν σαν σκοπό την διαπλάτυνση της καμπύλης συντονισμού [1.3.2, 1.3.3].

Σχήμα 1.3.4 Συντονιστές εντοιχισμένοι σε Σκανδιναβικές εκκλησίες. **α.** Ένας τύπος συντονιστή **β.** Ένας διαφορετικός τύπος συντονιστή με υπολείμματα στάχτης.

Γενικά, μεταβάλλοντας τον όγκο της κοιλότητας, το μήκος του λαιμού ή το μέγεθος του ανοίγματος, ο συντονιστής μπορεί να "ρυθμιστεί" και να απορροφά ήχο με συγκεκριμένο συχνοτικό εύρος γύρω από μια συγκεκριμένη συχνότητα, την συχνότητα συντονισμού. Έτσι μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη απορρόφηση σε μια στενή ζώνη χαμηλών κυρίως συχνοτήτων μεταβάλλοντας μόνο το μέγεθος του ανοίγματος, χωρίς να χρειαστεί να αυξηθεί το "βάθος" της απορροφητικής διάταξης, που απαιτεί συντονιστές με μεγάλο όγκο, όπως ακριβώς συμβαίνει στους πορώδεις απορροφητές. Πάντως ένας συνδυασμός των δύο διατάξεων, δηλαδή πορώδες υλικό μέσα σε έναν συντονιστή Helmholtz δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα διευρύνοντας το συχνοτικό εύρος της απορρόφησης [1.3.4].

Η συχνότητα συντονισμού του συντονιστή (f_0) εξαρτάται αποκλειστικά από τη γεωμετρία του. Ένας απλός τύπος που με σχετικά καλή ακρίβεια περιγράφει την συχνότητα συντονισμού είναι [1.3.5, 1.3.6]:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{HR}}{L_{HR} V_{HR}}} \quad (1.3.1)$$

Όπου c (m/s) η ταχύτητα του ήχου, S_{HR} (m²) η επιφάνεια του στομίου και L_{HR} (m) το μήκος του λαιμού.

1.4 Πρόσφατη έρευνα γύρω από τους συντονιστές

Μετά από τον Helmholtz έχουν δημοσιευτεί αρκετές εργασίες γύρω από τους συντονιστές και έχει δημιουργηθεί ένα μεγάλο μαθηματικό υπόβαθρο που περιγράφει την λειτουργία τους. Το 1947 ο V.L. Jordan [1.4.1] και στη συνέχεια το 1948-1968 ο U.Ingard [1.3.6] με μια σειρά δημοσιεύσεων άνοιξαν το δρόμο προς στη σύγχρονη έρευνα, έχοντας φωτίσει αρκετά αναλυτικά πολλά από τα σκοτεινά σημεία του παρελθόντος.

Τα επόμενα χρόνια η έρευνα για τους συντονιστές επικεντρώθηκε κυρίως στα εξής επιμέρους θέματα:

- Στο σχεδιασμό και την διατύπωση ακριβέστερων αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού της συχνότητας συντονισμού συντονιστών με ειδικές μορφές και γεωμετρίες.
- Στη μελέτη συμπεριφοράς των συντονιστών μέσω αριθμητικών μεθόδων επίλυσης.
- Στο σχεδιασμό και υπολογισμό της απορρόφησης απλών συντονιστών διάτρητων επιφανειών καθώς και σιγαστήρων.
- Στην ιστορική έρευνα των αρχαιολογικών χώρων στους οποίους χρησιμοποιήθηκαν συντονιστές για την ακουστική βελτίωσή τους.

Όσον αφορά στην πρώτη κατηγορία, αξιοσημείωτη είναι η εργασία του M.Alster [1.4.2] το 1972, η οποία μας παρέχει μια πιο αναλυτική έκφραση της συχνότητας συντονισμού. Ακολούθησαν αρκετές εργασίες οι οποίες έδωσαν νέες και πιο σαφείς πληροφορίες για τη συμπεριφορά των συντονιστών, του J. Mohring το 1999 [1.4.3] που υπολογίζει την συχνότητα συντονισμού των συντονιστών με μεγάλο άνοιγμα λαιμού, του S. K. Tang το 2005 [1.4.4] που υπολογίζει την συχνότητα συντονισμού αντηχείων με κωνικό λαιμό. Αρκετές σύγχρονες μελέτες για το εσωτερικό των συντονιστών όπως των Simon J. Estève και Marty E. Johnson [1.4.5] αλλά και την συμπεριφορά τους ανάλογα με τη γεωμετρία του λαιμού των S. Dequand, S. Hulshoff, H. Van Kuijk, J. Willems και A. Hirschberg [1.4.6] μας έδωσαν νέες πληροφορίες για τον πιο αποτελεσματικό τους σχεδιασμό. Η γνώση γύρω από τη συμπεριφορά των συντονιστών και οι αρκετές εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί έδωσαν το ερέθισμα να χρησιμοποιηθεί η αρχή λειτουργίας τους, ώστε να μελετηθεί η βελτιστοποίηση της απόδοσης κατά τη συλλογή ακουστικής ενέργειας. Ενδεικτικά παρατίθενται κάποιες ενδιαφέρουσες σύγχρονες εργασίες, σε μια σχετικά νέα περιοχή, των Fei Liu, S P Matova, J. Smoker και άλλων [1.4.7 - 1.4.9].

Αναφερόμενοι στη δεύτερη κατηγορία, οι βασικές αριθμητικές μέθοδοι, οι οποίες αναλυτικά περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια και σχολιάζεται η απόδοσή τους, είναι τα πεπερασμένα στοιχεία και τα ισοδύναμα συστήματα μέσω φίλτρων. Η εξομοίωση των συντονιστών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η πιο διαδεδομένη, όμως όπως θα δούμε και παρακάτω, έχει αρκετούς περιορισμούς τόσο στην πολυπλοκότητα των υπολογισμών που απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλη υπολογιστική δύναμη όσο και στα

αποτελέσματα που μπορεί να μας δώσει. Οι Daniel O. Ludwigsen, P.D. Joppa, Laurent Georges, Andrea Panteghini, Vasile, S. Mekid και άλλοι δραστηριοποιούνται σε αυτή την περιοχή έχοντας δημοσιεύσει αρκετά ενδιαφέρουσες εργασίες [1.4.10 - 1.4.18]. Η εξομοίωση με τη βοήθεια time domain φίλτρων είναι σχετικά μια νέα ερευνητική περιοχή. Βάση απλών φίλτρων που έχουν περιγραφεί από τον Ken Steiglitz [1.4.19] μπορούν να εξομοιωθούν αρκετά πολύπλοκα συστήματα συντονιστών και να μελετηθεί η συμπεριφορά τους, όπως αυτό του Tomasz Starecki [1.4.20].

Το μεγαλύτερο όμως μέρος των εργασιών αφορά τη τρίτη κατηγορία. Νέα μοντέλα και προτάσεις για τον έλεγχο της ακουστικής χώρων, με τη βοήθεια των συντονιστών Helmholtz, αφενός βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των αρχών λειτουργίας τους, αφετέρου παρέχουν ιδέες για πρωτότυπο σχεδιασμό, ώστε να προσεγγιστεί το ζητούμενο αποτέλεσμα στο ακουστικό πεδίο. Ενδεικτικά εδώ αναφέρονται τρεις εργασίες. Η πρώτη εργασία του Qibo Mao και Stanislaw Pietrzko αναφέρει τις μετρήσεις από ένα πρωτότυπο μοντέλο ενός σετ τριών συντονιστών Helmholtz, τα οποία τοποθετήθηκαν σε κοιλότητα παραθύρων [1.4.21]. Η δεύτερη εργασία από τους S. Unnikrishnan Naira κ.α., η οποία δημοσιεύτηκε στο ίδιο περιοδικό και στο ίδιο τεύχος, με την βοήθεια μιας εξομοίωσης, περιγράφει την υλοποίηση ενός μοντέλου, σχετικά με την απορρόφηση μιας στενής συχνοτικής περιοχής, σε χαμηλές συχνότητες [1.4.22]. Η τρίτη εργασία των Olivier Cherriera κ.α. δύο χρόνια αργότερα έχει εξαιρετικό ενδιαφέρον, καθώς προτείνεται μια μέθοδος ώστε η ηχοαπορροφητική αυτή διάταξη να μπορεί να αλλάξει τη συχνότητα απορρόφησης της με μια μικρή αύξηση της μάζας της [1.4.23]. Επίσης, μεγάλο ενδιαφέρον έχει η εργασία δύο ερευνητών από το Χονγκ Κονγκ, των Li Deyu και Li Cheng, η οποία έχει ως βασικό άξονά της, τη διαχείριση θορύβου σε κλειστούς χώρους με τη βοήθεια συστοιχίας συντονιστών [1.4.24].

Το 2000 μεταφράζεται στα αγγλικά και δημοσιεύεται η εργασία των Ιαπώνων Satoshi Konishi, Mitsuhiro Yoda, Susumu Sugiyama και Sadao Akishita [1.4.25] η οποία είχε δημοσιευθεί στα Ιαπωνικά το 1999. Η εργασία αυτή αφορά μια έρευνα πάνω στη micro - διάτρηση (microperforation) των διάτρητων επιφανειών και στην μικρή επιφάνεια του στομίου συστοιχίας συντονιστών. Παρόμοια εργασία 4 χρόνια αργότερα, από τους Pedro Cobo, Jaime Pfretzschner, Mari'a Cuesta και David K. Anthony, η οποία όμως ασχολείται με ένα υβριδικό σύστημα παθητικής και ενεργής απορρόφησης με micro - διάτρηση [1.4.26]. Ένα χρόνο μετά, από την ίδια ομάδα ερευνητών, προκύπτει μία πρωτότυπη εργασία για τη μικροδιάτρηση των ηχοαπορροφητικών επιφανειών, που εκδίδεται από το περιοδικό Applied Acoustics [1.4.27]. Η ίδια ομάδα δραστηριοποιείται μέχρι και σήμερα πάνω στη βελτιστοποίηση των ηχοαπορροφητικών επιφανειών με μικροδιάτρηση [1.4.28, 1.4.29]. Ενδιαφέρον πάνω στο ίδιο θέμα έχουν και οι σύγχρονες δημοσιεύσεις των Kimihiro Sakagami, Masayuki Morimoto, Motoki Yairib, Atsuo Minemurab, Rui Lin Mua, Wakana Koike και άλλων από την Ιαπωνία [1.4.30 - 1.4.36] καθώς σε αυτές παρατίθεται μια σύγκριση των παλιότερων επιφανειών σε σχέση με τις προτεινόμενες με μικροδιάτρηση.

Σημαντική έρευνα έχει γίνει και στον τομέα της χρήσης των συντονιστών Helmholtz ως σιγαστήρες για την καταπολέμηση του παραγόμενου- μεταφερόμενου θορύβου από αέρια. Η σημαντικότερη εργασία είναι αυτή του Kosuke Nagaya το 2001 που είχε ως αντικείμενο την κατασκευή σιγαστήρα τύπου συντονιστή με αυτορυθμιζόμενη συχνότητα συντονισμού [1.4.37]. Το 2005 οι Sang-Hyun Seo και Yang-Hann Kim δημοσίευσαν την εργασία τους με αντικείμενο την χρήση ενός συστήματος συντονιστών σε γραμμική διάταξη για την αντιμετώπιση του θορύβου αερίων χαμηλών συχνοτήτων αλλά με ευρεία συχνοτική ζώνη [1.4.38].

Τέλος, στο τρίτο ερευνητικό πεδίο τα τελευταία χρόνια έχει πραγματοποιηθεί σημαντική έρευνα καθώς έχουν γίνει μελέτες για την ακουστική συμπεριφορά ανοικτών αρχαίων θεάτρων καθώς και χώρων λατρείας, όπου συνηθιζόταν η χρήση συντονιστών Helmholtz για

την βελτίωση της ακουστικής συμπεριφοράς των κλειστών χώρων. Πρώτος ο Floriot ξεκίνησε την έρευνα που επικεντρώθηκε κυρίως στα αρχαία θέατρα [1.4.39, 1.4.40], ακολούθησε ο Κουμανούδης [1.4.41, 1.4.42] όπου κατά τη διατριβή του μελέτησε 2500 ναούς στον ελληνικό χώρο και βρήκε συντονιστές σε 147 από αυτούς. Οι Ζακυνθινός και Σκαρλάτος μελέτησαν την συγκριτική συμπεριφορά ναών, τοποθετώντας μέσα σ αυτούς συντονιστές [1.4.43, 1.4.44]. Σημαντική είναι η εργασία του Mijjick το 2004 [1.4.45] στην μελέτη των συντονιστών σε ορθόδοξες εκκλησίες στην Σερβία καθώς και του Mutbul Kayili [1.4.46] σε τζαμιά. Ο Carvalho και Desarnaulds μελέτησαν την ακουστική συμπεριφορά ναών με συντονιστές στην Ελβετία και Γαλλία [1.4.47, 1.4.48]. Πρόσφατα δημοσιεύτηκαν οι εργασίες των Πολυχρονόπουλου κ.α. που μελέτησαν την συμπεριφορά του θεάτρου της Λυττούς που περιείχε συντονιστές με εξομίωση σε ΗΥ, με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων και την μέθοδο των εικόνων [1.4.49].

1.5 Μέθοδοι μελέτης συντονιστών

Οι βασικές μέθοδοι μελέτης των συντονιστών διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Αναλυτικές μέθοδοι.
2. Μέθοδοι ισοδύναμων κυκλωμάτων και μηχανικών συστημάτων.
3. Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων.
4. Μέθοδοι φίλτρων.
5. Πειραματικές μέθοδοι.

Οι αναλυτικές μέθοδοι ήταν οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη της συμπεριφοράς των συντονιστών.

Οι μέθοδοι με ισοδύναμα κυκλώματα ή μηχανικά συστήματα προσφέρουν έναν απλουστευμένο τρόπο μελέτης, υστερούν όμως σε ακρίβεια έναντι των αναλυτικών μεθόδων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι σήμερα η πιο διαδεδομένη, λόγω της ανάπτυξης αξιόπιστων λογισμικών πακέτων, όμως όπως θα δούμε και παρακάτω, έχει αρκετούς περιορισμούς και κυρίως απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δύναμη όταν θέλουμε να μελετήσουμε σύνθετες κατασκευές σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Η εξομίωση των συντονιστών με φίλτρα στο πεδίο του χρόνου είναι ένας νέος τρόπος μελέτης των συντονιστών με σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα.

Οι πειραματικές μέθοδοι, σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως σε δεύτερο στάδιο για τον έλεγχο συνήθως των αποτελεσμάτων των προηγούμενων μεθόδων.

1.6 Οι συντονιστές ως ακουστικά στοιχεία

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, οι συντονιστές μεμονωμένοι ως ακουστικά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν κατά την αρχαιότητα σε χώρους εκδηλώσεων, κυρίως σε χώρους λατρείας ή θέατρα, μέχρι την εποχή της Αναγέννησης.

Σήμερα η πιο συνήθης μορφή των συντονιστών που χρησιμοποιούνται στην πράξη για την καταπολέμηση του θορύβου και την βελτίωση της ακουστικής των κλειστών ή ανοικτών χώρων είναι οι διάτρητες επιφάνειες (σχήμα 1.6.1). Οι διάτρητες επιφάνειες κατασκευάζονται από διάφορα υλικά, όπως το κόντρα πλακέ, το hardboard, η λαμαρίνα κλπ,

και τοποθετούνται σε κάποια απόσταση από μια συμπαγή επιφάνεια. Οι διατρήσεις μπορεί να είναι κυκλικές ή να έχουν σχήμα σχισμών. Κάθε τρύπα δρα σαν το λαιμό ενός συντονιστή Helmholtz, ενώ το ρόλο της κοιλότητας παίζει ο χώρος κάτω από το διάτρητο υλικό. Προσθήκη απορροφητικού υλικού (συνήθως πετροβάμβακα) κάτω από την διάτρητη επιφάνεια, όπως και στους συντονιστές, πλαταίνει την καμπύλη συντονισμού (αυξάνει το συχνοτικό εύρος της απορρόφησης στο μακρινό ακουστικό πεδίο). Η διάτρηση μπορεί να είναι συμμετρική ή τυχαία. Στις διάτρητες επιφάνειες το ποσοστό διάτρησης, δηλαδή το εμβαδόν των οπών προς το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας, σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20% γιατί τότε η επιφάνεια είναι διαφανής ως προς τον ήχο. Λόγω του γεγονότος ότι η απορρόφηση από τους συντονιστές συμβαίνει σε χαμηλές συχνότητες, σε πολλές περιπτώσεις οι επιφάνειες φέρουν μικροδιατρήσεις (micro perforated panels) μετατοπίζοντας την λειτουργία τους σε μεγαλύτερες συχνότητες.

Σχήμα 1.6.1 Τομή διάτρητης επιφάνειας με πορώδες υλικό.

Μεγάλη εφαρμογή έχουν οι συντονιστές ως σιγαστήρες στην καταπολέμηση του θορύβου των ρευστών, όταν ο θόρυβος που παράγεται ή μεταφέρεται από το ρευστό κατανέμεται σε συγκεκριμένες συχνότητες. Κύριο χαρακτηριστικό των σιγαστήρων αυτού του τύπου είναι ότι το αέριο δεν διέρχεται μέσα από το σιγαστήρα. Σε αντίθεση με τους απορροφητικούς σιγαστήρες που είναι σιγαστήρες ευρέως φάσματος, οι σιγαστήρες αυτοί είναι στενής ζώνης συχνοτήτων, και για τον λόγο αυτό ενδείκνυνται σε συσκευές όπως αντλίες σταθερής ταχύτητας, φυσητήρες κλπ.

Χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερους συντονιστές σε απόσταση ενός μήκους κύματος στην συχνότητα που μας ενδιαφέρει και με μικρή διαφοροποίηση των στοιχείων τους, μπορούμε να διευρύνουμε το χρήσιμο εύρος ζώνης των απορροφητών αυτών.

Μια ειδική μορφή συντονιστή είναι ο συντονιστής ενός τετάρτου μήκους κύματος, στον οποίο ο πλευρικός συντονιστής είναι απλά ένας "τυφλός σωλήνας", ίδιας ή διαφορετικής διαμέτρου (βλέπε σχήμα 1.6.2). Ευρύτατη εφαρμογή επίσης βρίσκουν οι συντονιστές στην καταπολέμηση του θορύβου των μηχανών εσωτερικής καύσης. Ο σιγαστήρας αυτός αποτελεί τροποποίηση του πλευρικού συντονιστή.

Σχήμα 1.6.2 Συντονιστής ενός τετάρτου μήκους κύματος.

Ο πλευρικός συντονιστής αποτελείται από μία κοιλότητα συνήθως σχήματος κυλίνδρου που τοποθετείται ομοαξονικά με τον αγωγό. Η επικοινωνία αγωγού και συντονιστή γίνεται από N διατρήσεις που φέρει ο αγωγός (σχήμα 1.6.3).

Σχήμα 1.6.3 Πλευρικός συντονιστής διάτρητου σωλήνα.

1.7 Μηχανικό ανάλογο του συντονιστή

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η λειτουργία ενός συντονιστή Helmholtz προσομοιώνεται -για ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων- με έναν μηχανικό ταλαντωτή ενός βαθμού ελευθερίας με την μορφή ενός εμβόλου εμβადού επιφάνεια S τοποθετημένο στην επιφάνεια ενός ακλόνητου τοίχου απείρων διαστάσεων με μεγάλη απορρόφηση (baffle) (σχήμα 1.7.1). Και σε αυτήν την περίπτωση ισχύει η υπόθεση ότι οι διαστάσεις του εμβόλου πρέπει να είναι μικρές σε σχέση με το μήκος κύματος του ήχου. Η εξασθένιση αυτού του περιοδικού φαινομένου, εξαιτίας κυρίως της τριβής κατά την ταλάντωση της μάζας του αέρα του λαιμού, μπορεί να περιγραφεί από τον συντελεστή απόσβεσης ελατηρίου (R_m) του συστήματος μάζας-ελατηρίου.

Σχήμα 1.7.1 Προσομοίωση του συντονιστή Helmholtz ως μηχανικό ταλαντωτή ενός βαθμού ελευθερίας.

Η εξίσωση, ενός ταλαντωτή, ενός βαθμού ελευθερίας είναι:

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} + r \frac{d\xi}{dt} + k_m \xi = F(t) \quad (1.7.1)$$

όπου ξ η απομάκρυνση του εμβόλου.

Η ιδιοσυχνότητα του μηχανικού αναλόγου προκύπτει από την λύση της εξίσωσης (1.7.1) και δίδεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_m}{m}} \quad (1.7.2)$$

Η ταλαντούμενη μάζα του μηχανικού αναλόγου αντιστοιχεί στην μάζα του λαιμού του συντονιστή και είναι:

$$m = S_{HR} L_{HR} \rho \quad (1.7.3)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα.

Η σκληρότητα (stiffness) του ισοδύναμου ελατηρίου θα δίνεται από την σχέση:

$$k_m = - \frac{\Delta F}{\Delta x} \quad (1.7.4\alpha)$$

Αυτή μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση των στοιχείων του συντονιστή:

$$k_m = \frac{\gamma P_0 S^2}{V_{HR}} = \frac{\rho_0 c_0^2 S_{HR}^2}{V_{HR}} \quad (1.7.4\beta)$$

όπου γ ο λόγος των ειδικών θερμότητων του αέρα υπό σταθερή πίεση και όγκο.

Με απλή αντικατάσταση στην σχέση (1.7.2) προκύπτει ότι η ιδιοσυχνότητα του συντονιστή θα δίδεται από την σχέση:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_m}{m_m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2 S_{HR}^2}{V_{HR}} \frac{1}{S_{HR} L_{HR} \rho_0}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{HR}}{V_{HR} L_{HR}}} \quad (1.7.5)$$

1.8 Ηλεκτρικό ανάλογο του συντονιστή

Ένας άλλος τρόπος να προσεγγιστεί η λειτουργία ενός συντονιστή Helmholtz είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα ανάλογο ηλεκτρικό κύκλωμα RLC, όπως φαίνεται στο σχήμα (1.8.1). Το ανάλογο αυτό όπως ακριβώς και το μηχανικό ανάλογο περιγράφεται από μια διαφορική εξίσωση δευτέρας τάξης:

$$L_c \frac{d^2 I_c(t)}{dt} + (R_i + R_r) \frac{dI_c(t)}{dt} + \frac{1}{C} I_c(t) = \frac{dE(t)}{dt} \quad , I_c(0) = I_{c0} \quad (1.8.1)$$

Όπου: L_c η επαγωγή του πηνίου, I_c η ένταση του ρεύματος, E η τάση της πηγής, C η χωρητικότητα του πυκνωτή και R_i, R_r οι αντιστάσεις της πηγής και του κυκλώματος αντίστοιχα.

Η συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος δίνεται από την σχέση:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_c C}} \quad (1.8.2)$$

Η ηχητική πίεση (p) αντιστοιχεί με τη τάση (V_c), και ο ρυθμός ροής μεταβολής του όγκου $U = su$ (volume velocity) με την ένταση του ρεύματος (I_c). Αυτό είναι απόλυτα λογικό διότι το γινόμενο $V_c I_c$ αντιστοιχεί στην ισχύ του ηλεκτρικού ρεύματος και στο σύστημα SI μετριέται σε Watt. Τις ίδιες διαστάσεις έχει και το γινόμενο pU . Πράγματι οι διαστάσεις του U είναι

$$[U] = [su] = m^2 \frac{m}{s} = \frac{m^3}{s} \quad (1.8.3)$$

Και οι διαστάσεις του γινομένου pU είναι:

$$[pU] = \frac{N}{m^2} \frac{m^3}{s} = \frac{Nm}{s} (\text{watt}) \quad (1.8.4)$$

Αν τα p και U είναι φάσορες (phasors) τότε ο λόγος p/U αντιστοιχεί στην εμπέδηση ή στη σύνθετη αντίσταση (impedance) του κυκλώματος, η οποία ονομάζεται ακουστική εμπέδηση (acoustic impedance).

$$Z = \frac{V_c}{I_c} \sim \frac{p}{U} \quad (1.8.5)$$

Σχήμα 1.8.1 Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του συντονιστή Helmholtz.

Η αδράνεια της μάζας του λαιμού αντιστοιχεί στην επαγωγική εμπέδηση του κυκλώματος.

Σχήμα 1.8.2 Κίνηση του αέρα στο λαιμό του συντονιστή.

Έστω ότι στην η αέρια στήλη του λαιμού του συντονιστή (μήκους L_{HR} και τομής S_{HR}) εφαρμόζεται η ακουστική πίεση:

$$p = p_1 - p_2 \quad (1.8.6)$$

Η πίεση αυτή προκαλεί την μετατόπιση της στήλης κατά ξ . Εφ' όσον η πίεση είναι αρμονική, η κίνηση θα είναι ταλάντωση. Η μάζα και η επιτάχυνση της αέριας στήλης θα είναι αντίστοιχα:

$$\rho s l \text{ και } -\omega^2 \xi \quad (1.8.7)$$

Από τον δεύτερο νόμο του Newton προκύπτει:

$$F = ps = -\omega^2 \rho s l \xi \quad (1.8.8)$$

Εφ' όσον η κίνηση είναι ταλάντωση η ταχύτητα που αντιστοιχεί είναι

$$u = i\omega \xi \quad (1.8.9)$$

Οπότε με συνδυασμό των παραπάνω ισχύει:

$$p = i\omega \frac{\rho l}{s} q \quad (1.8.10)$$

$$Z = i\omega \frac{\rho l}{s} \quad (1.8.11)$$

Η παραπάνω εμπέδηση είναι ανάλογη με την αντίστοιχη επαγωγική εμπέδηση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

$$Z = i\omega L_c \quad (1.8.12)$$

Οπότε προκύπτει ότι:

$$L_c = \frac{\rho_0 l}{s} \quad (1.8.13)$$

Η απορρόφηση του συντονιστή περιγράφεται από την εσωτερική αντίσταση R_i , και η εκπομπή του από την αντίσταση ακτινοβολίας R_r . Η εσωτερική αντίσταση περιγράφει την ηχητική ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμότητα. Για τα ρευστά, οι μηχανισμοί απώλειας ενέργειας περιλαμβάνουν την θερμική αγωγή, την απώλεια λόγω ιξώδους και τη μοριακή ισοκατανομή της ενέργειας. Οι πρώτες θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η αντιστοιχία των ακουστικών παραμέτρων με τα ηλεκτρικά ανάλογα παρατίθεται στον Πίνακα 1.8.1.

Όταν οι συντονιστές βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους αλληλεπιδρούν. Γενικά, η εσωτερική αντίσταση για απλό συντονιστή σε επιφάνεια απείρων διαστάσεων και συντονιστές σε διδιάστατη διάταξη δίνεται από τις σχέσεις [1.3.5]:

$$R_i = \frac{2\pi\rho c}{\lambda^2}, \quad R_r = \frac{\rho c}{\sigma} \quad (1.8.14)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, λ το μήκος κύματος της απορροφώμενης συχνότητας και σ η επιφάνεια του τοίχου ανά συντονιστή.

Χωρητική εμπέδηση

Ο όγκος του συντονιστή, όπως ακριβώς ο πυκνωτής, αποθηκεύει την δυναμική ενέργεια. Έστω ένα δοχείο με ανένδοτα τοιχώματα όγκου V που επικοινωνεί με το περιβάλλον μέσω ανοίγματος με εμβαδό επιφάνειας S . Αν στο δοχείο εισέλθει ή εξέλθει αέρας με ρυθμό q το αποτέλεσμα θα είναι η συμπίεση ή η εκτόνωση του αέρα του δοχείου χωρίς ουσιαστική αύξηση της ταχύτητάς του. Αν ΔV η μεταβολή του αρχικού όγκου του αέρα, η συμπίεσή του θα είναι.

$$S = -\frac{\Delta V_c}{V_c} = \frac{U}{i\omega} \quad (1.8.15)$$

όπου U η ταχύτητα όγκου.

Χρησιμοποιώντας την συμπίεστικότητα του αέρα ρc^2 προκύπτει

$$p = \rho c^2 \frac{q}{i\omega V_c} \quad (1.8.16)$$

Οπότε η χωρητική εμπέδηση θα είναι

$$Z = \frac{p}{U} = \frac{\rho c^2}{i\omega V_c} \quad (1.8.17)$$

Η ποσότητα:

$$C = \frac{V_c}{\rho_0 c_0^2} \quad (1.8.18)$$

βρίσκεται σε πλήρη αναλογία με την χωρητικότητα ενός πυκνωτή.

Η συνολική έκφραση της αντίστασης του κυκλώματος αποτελείται από δύο όρους. Ο πρώτος όρος αναφέρεται στην αντίσταση λόγω τριβών (frictional resistance) και περιλαμβάνει όλες τις απώλειες εκτός από αυτές που οφείλονται στην ακτινοβολία. Ο δεύτερος όρος αναφέρεται στο πραγματικό μέρος της εμπέδησης ακτινοβολίας (radiation impedance) που με την σειρά της οφείλεται στην αντίδραση του μέσου στο οποίο γίνεται η εκπομπή. Οι αντιστάσεις αυτές περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω.

Η σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου κυκλώματος γίνεται

$$Z = i\omega L_c + \frac{1}{i\omega C} + R = i\omega \frac{\rho l}{s} + \frac{\rho c^2}{i\omega V_c} + R \quad (1.8.19)$$

Η συχνότητα συντονισμού όπως αυτή προκύπτει από τη σχέση 1.8.2 θα είναι:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_c C}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{HR}}{V_{HR} L_{HR}}} \quad (1.8.20)$$

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει την αναλογία μεταξύ ηλεκτρικών και ακουστικών μεγεθών.

Ηλεκτρικά Ανάλογα		Ακουστικά μεγέθη	
Τάση	V_c	Ηχητική πίεση	p
Ένταση	I_c	Ταχύτητα όγκου	q
Χωρητικότητα	C	Χωρητικότητα	$C = \frac{V}{\rho_0 c_0^2}$
Επαγωγή	L_c	Επαγωγή	$L_c = \frac{\rho_0 l}{s}$
Αντίσταση	R	Αντίσταση	R

Πίνακας 1.8.1 Τα στοιχεία του ηλεκτρικού ισοδύναμου σε αντιστοιχία με ακουστικά.

1.9 Ο συντονιστής ως φίλτρο

Με βάση τον Ken Steiglitz [1.4.18], ένας ιδανικός συντονισμός ενός δευτεροβάθμιου συστήματος μπορεί να εξομοιωθεί ως ένα φίλτρο στο πεδίο του χρόνου. Στο παρακάτω σχήμα (1.9.1) απεικονίζεται το διάγραμμα τμημάτων του εμπροσθοτροφοδοτούμενου αυτού φίλτρου, ενώ στο σχήμα 1.9.2 απεικονίζεται η κρουστική απόκριση και η απόκριση του φίλτρου στο πεδίο της συχνότητας.

Σχήμα 1.9.1 Διάγραμμα τμημάτων εμπροσθοτροφοδοτούμενου IIR φίλτρου 2^{ης} τάξης.

Εάν είσοδος στο σύστημα είναι μια ιδανική συνάρτηση δέλτα, που στην πράξη υλοποιείται από μια κρουστική συνάρτηση, τότε στην έξοδο θα πάρουμε την κρουστική απόκριση του συστήματος, της οποίας ο μετασχηματισμός Fourier φαίνεται στο σχήμα 1.9.2. Στηριζόμενοι σε αυτή την απλοϊκή περιγραφή ενός ιδανικού συστήματος σε συντονισμό είναι δυνατό να εξομοιωθούν, πολύπλοκα συστήματα συστοιχίας συντονιστών Helmholtz, ως ψηφιακά φίλτρα. Αυτός ο τρόπος εξομοίωσης συστημάτων δεν μπορεί να έχει την ακρίβεια των πεπερασμένων στοιχείων, όμως, το εξομοιωμένο ως ψηφιακό φίλτρο μοντέλο έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- είναι πιο εύκολα παραμετροποιήσιμο
- είναι αρκετά πιο γρήγορη η επίλυσή του
- δεν απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ
- μπορεί να επιλυθεί ένα μοντέλο με πολλά στοιχεία

Σχήμα 1.9.2 Κρουστική απόκριση φίλτρου **α.** στο πεδίο του χρόνου
β. στο πεδίο της συχνότητας.

1.10 Προηγμένα μοντέλα συντονιστών

1.10.1 Η διόρθωση των άκρων

Η σχέση 1.3.1 με την οποία υπολογίζουμε τη συχνότητα συντονισμού μπορεί να τροποποιηθεί ως εξής για να δίνει καλύτερα αποτελέσματα:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{HR}}{L'_{HR} V_{HR}}} \quad (1.10.1)$$

L'_{HR} (m) είναι το διορθωμένο μήκος του λαιμού κατά την διόρθωση των άκρων και δίνεται από την σχέση:

$$L'_{HR} = L_{HR} + c_{HR} \quad (1.10.2)$$

Σχήμα 1.10.1 Κίνηση της αέριας μάζας του στομίου του συντονιστή.

Η "διόρθωση των άκρων" (c_{HR}), end correction όπως αναφέρεται διεθνώς, είναι στην ουσία ένας διορθωτικός παράγοντας ο οποίος προστίθεται στο μήκος L_{HR} του λαιμού για να δηλώσει ότι η θεωρούμενη μάζα που ταλαντώνεται δεν περιορίζεται στο μήκος L_{HR} του λαιμού, αλλά ξεπερνά τα όριά του κατά την παλινδρομική της κίνηση. Στην πραγματικότητα αυτό που συμβαίνει είναι ότι η ροή του αέρα διαμέσου του λαιμού επηρεάζει τον αέρα που βρίσκεται πολύ κοντά στα χείλη του ανοίγματος εσωτερικά και εξωτερικά. Έτσι αυτός ο "κοντινός" αέρας θα πάρει μέρος στην ροή και θα συνεισφέρει στην ολική μάζα συντονισμού έτσι πρέπει να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς των παραμέτρων που αφορούν το συντονιστή.

Η διόρθωση των άκρων παίρνει τιμές στο διάστημα $0.61r_{HR} < c_{HR} < 0.8r_{HR}$, όπου r_{HR} (m) η ακτίνα της

επιφάνειας του στομίου. Αν, τέλος, συνυπολογίσουμε και το εσωτερικό και το εξωτερικό μέρος του ανοίγματος του λαιμού (βλέπε σχήμα 1.10.1) η "διόρθωση των άκρων" θεωρείται σχεδόν ίδια και για τα δυο και δίνεται από τον τύπο:

$$c_{HR} = \frac{16r_{HR}}{3\pi} \approx 1.7r_{HR} \quad (1.10.3)$$

Όπου r_{HR} η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας του στομίου του συντονιστή.

Για πολλούς συντονιστές εντοιχισμένους σε τετραγωνική διάταξη, απέχοντας απόσταση L_{HR} η διόρθωση των άκρων δίνεται από την σχέση [1.3.5]:

$$c_{HR} = 0.79r_{HR} \left[1 - 1.47 \sqrt{\frac{\pi r_{HR}^2}{L_{HR}^2}} + 0.47 \sqrt{\left(\frac{\pi r_{HR}^2}{L_{HR}^2} \right)^3} \right]. \quad (1.10.4)$$

1.10.2 Τύποι υπολογισμού συχνότητας συντονισμού

Οι Panton και Miller [1.10.1] έδειξαν ότι ο τύπος με τον οποίο υπολογίζουμε τη συχνότητα συντονισμού (σχέση 1.3.1) για συντονιστές, των οποίων οι διαστάσεις υπερβαίνουν το 1/16 του μήκους κύματος, δεν ισχύει και πρότειναν τον παρακάτω τύπο:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{HR}}{(L_{HR} + c_{HR})V_{HR} + \frac{1}{3}l_{HR}S_{HR}}} \quad (1.10.5)$$

Στην παραπάνω σχέση με τον όρο l_{HR} συμβολίζουμε το μήκος της κοιλότητας του συντονιστή.

Επίσης ο Li [1.10.2] για την περίπτωση που το μήκος της κοιλότητας και του λαιμού υπερβαίνει το μήκος κύματος του ήχου, αλλά η διάμετρος της κοιλότητας είναι μικρότερη από ένα μήκος κύματος, έδειξε ότι ισχύει η σχέση:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{3(L_{HR} + c_{HR})s_{HR} + l_{HR}S_{HR}}{2(L_{HR} + c_{HR})^3 s_{HR}}} + \sqrt{\left(\frac{3(L_{HR} + c_{HR})s_{HR} + l_{HR}S_{HR}}{2(L_{HR} + c_{HR})^3 s_{HR}} \right)^2 + \frac{3S_{HR}}{(L_{HR} + c_{HR})^3 l_{HR}S_{HR}}} \quad (1.10.6)$$

Όπου s_{HR} η διατομή της κοιλότητας του συντονιστή.

Σύμφωνα με τον Tang, η συχνότητα συντονισμού για ένα συντονιστή, με μακρύ και λεπτό λαιμό, μεταβλητής διατομής, δίνεται με καλή προσέγγιση από τον τύπο [1.4.4]:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi r_i r_0}{L_{HR} V_{HR}}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi r_i^2}{L_{HR} V_{HR}}} + \frac{m_a \pi}{V_{HR}} \quad (1.10.7)$$

όπου V_{HR} ο όγκος του συντονιστή,

r_i η εσωτερική ακτίνα του λεπτού λαιμού,

r_0 η αντίστοιχη εξωτερική ακτίνα,

m_a η κλίση της μεταβολής της διαμέτρου του λαιμού και

L_{HR} το μήκος του λεπτού λαιμού.

Σχήμα 1.10.2 Συντονιστής με μακρύ και λεπτό λαιμό, σύμφωνα με τον Tang [1.4.4].

Για την περίπτωση πιο σύνθετων συντονιστών, μεγάλη ακρίβεια δίνει ο τύπος του Alster [1.4.2] ο οποίος δίνει την συχνότητα συντονισμού από την σχέση:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{f_n}{1.21(V_{HR} + V_n) \left\{ \frac{V_{HR}}{V_{HR} + V_n + V_{01}} \frac{h}{h + l_N + l_{01}} [l_v + (l_N + l_{01})A] + l_{02} \right\}}} \quad (1.10.8)$$

όπου:

f_n το εμβαδόν διατομής του λαιμού,

V_N ο όγκος που καταλαμβάνει ο λαιμός,

V_{HR} ο όγκος του συντονιστή χωρίς τον λαιμό,

l_{01}, l_{02} οι τελικές διορθώσεις του ανοίγματος που δίνονται από τις σχέσεις $l_{01} = l_{02} = 0.24r$

h το ύψος του συντονιστή μέχρι τον λαιμό

l_v ο παράγοντας μορφής του συντονιστή ο οποίος εξαρτάται από την γεωμετρία του συντονιστή δίνεται από την σχέση:

$$l_v = \frac{f_n}{V_h} \int_0^h \frac{xV(x)}{F(x)} dx \quad (1.10.9)$$

$F(x)$ είναι η διατομή του συντονιστή ως συνάρτηση της απόστασης από τον πυθμένα, $V(x)$ ο όγκος της κοιλότητας του συντονιστή:

$$V(x) = \int_0^x F(\xi) d\xi \quad (1.10.10)$$

και

$$A_{HR} = \left(1 + \frac{1}{2} \left[\frac{V_N + V_{01}}{V} + \frac{l_N + l_{01}}{h} \right] + \frac{1}{3} \frac{V_N + V_{01}}{V} \frac{l_N + l_{01}}{h} \right) \quad (1.10.11)$$

όπου A_{HR} η ενεργός διατομή της κοιλότητας του συντονιστή.

Στην περίπτωση σφαιρικών συντονιστών (σχήμα 1.10.3) ο παράγοντας μορφής μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση:

$$l_V = \frac{r_{HR}^2}{R_{HR}} \frac{1}{2-H} \left[\frac{1}{3} - \frac{1}{2(H+1)} - \frac{2}{(H+1)^2} + \frac{4}{(H+1)^3} \ln \frac{2}{1-H} \right] \quad (1.10.12)$$

όπου

$$H = \sqrt{1 - \left(\frac{r_{HR}}{R_{HR}} \right)^2} \quad (1.10.13)$$

Σχήμα 1.10.3 Σφαιρικός συντονιστής σε τομή.

Στην περίπτωση όπου μελετάμε κατανεμημένους συντονιστές σε κανονική διάταξη, που υλοποιείται με μια διάτρητη επιφάνεια, ο τρόπος υπολογισμού της συχνότητας συντονισμού δε διαφέρει κατά πολύ. Θεωρούμε τις οπές της επιφάνειας ανεξάρτητες μεταξύ τους, δηλαδή το εμβαδό της οπής S_{HR} θεωρείται αρκετά μικρότερο από την ενεργό διατομή της κοιλότητας A_{HR} . Η μικρότερη δυνατή απόσταση για να ισχύει αυτό είναι [1.3.6]:

$$d_0 = \frac{\lambda_0}{\sqrt{2\pi}} \quad (1.10.14)$$

Έτσι ξεκινώντας από την εξίσωση 1.3.1 και με μερικές τροποποιήσεις έχουμε:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\Phi}{d(l+\delta)}} \quad (1.10.15)$$

όπου $\Phi = S / A_{HR}$ είναι η διάτρηση της επιφάνειας, η οποία έχει τοποθετηθεί σε απόσταση d από έναν σταθερό τοίχο (σχήμα 1.10.4).

Σχήμα 1.10.4 Κατανεμημένος συντονιστής με μορφή διάτρητης πλάκας. Οι οπές είναι αρκετά μακριά η μια από την άλλη, έτσι ώστε να θεωρείται ότι ο κάθε συντονιστής λειτουργεί αυτόνομα. Εδώ έχουν σημασία το εμβαδόν της οπής ή αλλιώς ενεργός διατομή S_{HR} αλλά και η ενεργός διατομή της κοιλότητας A_{HR} .

Η ίδια εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση όπου η διάτρηση δεν έχει γίνει με οπές αλλά με σχισμές [1.3.5].

1.10.3 Ο παράγων ποιότητας του συντονιστή

Ο παράγοντας ποιότητας Q καθορίζει το συχνοτικό εύρος της απορρόφησης και δίνεται από την σχέση [1.3.5]:

$$Q = 2\pi \sqrt{V_{HR} \left(\frac{L_{HR}}{S_{HR}} \right)^3} \quad (1.10.16)$$

1.11 Απορρόφηση και σκέδαση από τους συντονιστές

1.11.1 Απώλεια ενέργειας συντονιστών

Όταν στον συντονιστή δεν υπάρχει ηχοαπορροφητικό υλικό, οι απώλειες της ενέργειας στις επιφάνειες του συντονιστή οφείλονται σε δύο κυρίως αιτίες:

- i. Απώλειες λόγω ιξώδους
- ii. Απώλειες λόγω θερμικής αγωγής

Απώλειες λόγω ιξώδους

Οι απώλειες αυτές μπορούν επίσης να χωριστούν σε δύο μέρη:

1. Αυτές που οφείλονται στα εσωτερικά τοιχώματα του λαιμού του ανοίγματος του συντονιστή. Η έκφραση για αυτές τις απώλειες είναι:

$$P_{i1} = \frac{1}{2} R_s 2\pi r_0^2 t_{HR} u_s^2 \quad (1.11.1)$$

όπου:

u_s η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας στα εσωτερικά τοιχώματα του λαιμού του ανοίγματος του συντονιστή, υπολογισμένη από την λύση της κυματικής εξίσωσης αν αγνοήσουμε το ιξώδες,

t_{HR} το πάχος των τοιχωμάτων και R_s η επιφανειακή αντίσταση (surface resistance) που δίνεται από την σχέση:

$$R_s = \frac{1}{2} (2\rho\eta\omega)^{1/2} \quad (1.11.2)$$

Στην σχέση αυτή με το σύμβολο η συμβολίζεται το ιξώδες.

Κάτω από συνθήκες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας για το R_s μπορούμε να γράψουμε:

$$R_s \approx 0.83 \cdot 10^{-3} \sqrt{f} \quad (1.11.3)$$

2. Οι απώλειες που προέρχονται από τις επιφάνειες των τοιχωμάτων της κοιλότητάς του. Έτσι η έκφραση για αυτές τις απώλειες είναι:

$$P_{i2} = \frac{1}{2} \int_s R_s |u_s|^2 ds \quad (1.11.4)$$

όπου s η επιφάνεια.

Κατά τον Nielsen το παραπάνω ολοκλήρωμα μπορεί να προσεγγισθεί από την σχέση [1.3.6]:

$$P_{i2} = \frac{1}{2} R_s 2\pi r_{HR}^2 u_s^2 \quad (1.11.5)$$

Συνολικά η αντίστοιχη ειδική ακουστική αντίσταση δίνεται από την προσεγγιστική σχέση [1.3.6]:

$$R_i = 4R_s \left(1 + 0.5 \frac{L_{HR}}{r_{HR}} \right) \quad (1.11.6)$$

Απώλειες λόγω θερμικής αγωγής

Γενικά οι απώλειες από θερμική αγωγή θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με τις απώλειες λόγω του ιξώδους. Οι απώλειες αυτές δίδονται από το ολοκλήρωμα:

$$P_k = \frac{1}{2} \int H_s |p|^2 ds \quad (1.11.7)$$

όπου:

$$H_s = (\gamma - 1) \frac{k}{\rho c} \sqrt{\frac{\lambda_\kappa}{2\omega c_p \rho}} \quad (1.11.8)$$

Στην σχέση αυτή:

λ_k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα (Coefficient of heat conduction) και c_p η ειδική θερμότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση (specific heat at constant pressure)

Κάτω από συνήθεις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας το H_s μπορούμε να το εκφράσουμε ως:

$$H_s \approx \frac{1}{\rho c} 10^{-6} \sqrt{f} \quad (1.11.9)$$

Κατά τον Gilford και Jordan μια προσεγγιστική σχέση που περιλαμβάνει όλες τις παραπάνω ενέργειες είναι [1.3.6], [1.4.1]:

$$R_i = \frac{1}{s} \sqrt{2\rho\eta\omega} \left(\frac{L_{HR}}{r_{HR}} + \frac{16}{3\pi} \right) \quad (1.11.10)$$

Απώλειες λόγω ακτινοβολίας

Μια ακριβής έκφραση για την αντίσταση ακτινοβολίας είναι η [1.3.6], [1.3.11]

$$R_r = 4R_s \left(1 + 0.5 \frac{L_{HR}}{a} \right) C_1 (kR_0)^6 \quad (1.11.11)$$

όπου:

$$C_1 = 0.316 \left(\frac{R_s}{\rho c} \right)^{-1} h_{l/a} \quad (1.11.12)$$

και

$$h_{l/a} = \frac{\left(0.9 + 0.59 \frac{L_{HR}}{r_{HR}} \right)^2}{1 + 0.5 \frac{l}{r_{HR}}} \quad (1.11.13)$$

Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας μπορούν να περιγραφούν από την προσεγγιστική σχέση [1.3.6]

$$R_r = \frac{\rho\omega^2 s^2}{2\pi c} = 2\pi\rho c \left(\frac{s}{\lambda} \right)^2 \quad (1.11.14)$$

1.11.2 Ενεργός διατομή απορρόφησης

Σε αντίθεση με τους κλασικούς απορροφητές, η απορρόφηση των συντονιστών δεν εξαρτάται από το εμβαδόν που αυτοί καταλαμβάνουν. Όταν για παράδειγμα βρίσκονται ενσωματωμένοι σε ένα τοίχο, αντί για τον συντελεστή απορρόφησης, που για έναν απλό συντονιστή είναι χωρίς νόημα, χρησιμοποιούμε την ενεργό διατομή απορρόφησης (absorption cross section). Η ενεργός διατομή απορρόφησης ορίζεται από τον ρυθμό

απορρόφησης της ενέργειας από τον συντονιστή ανά sec στην θέση του συντονιστή προς την ένταση που θα είχε ο ήχος στην ίδια θέση αν δεν υπήρχε ο συντονιστής.

$$\sigma_{abs} = \frac{P_{abs}}{I_0}$$

Η μέγιστη τιμή της ενεργού διατομής απορρόφησης ($\sigma_{abs,max}$) βρίσκεται στη συχνότητα συντονισμού, όταν αυτός βρίσκεται σε συνθήκες προσαρμογής, όπου η εσωτερική αντίσταση ισούται με την αντίσταση εκπομπής και δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{abs,max} = \frac{P_{abs,max}}{I} = \frac{\lambda_0^2}{4\pi} \quad (1.11.15)$$

όπου λ_0 το μήκος κύματος στη συχνότητα συντονισμού, $P_{abs,max}$ η μέγιστη απορροφώμενη ενέργεια [1.4.6] και I η ένταση του προσπίπτοντος κύματος στο συντονιστή. Η μέγιστη απορροφώμενη ενέργεια κατά το συντονισμό εκφράζεται από τον τύπο:

$$P_{abs,max} = \frac{\lambda_0}{2\pi} I \quad (1.11.16)$$

1.11.3 Ενεργός διατομή σκέδασης

Οι συντονιστές Helmholtz δεν λειτουργούν μόνο ως απορροφητές ήχου. Σύμφωνα με τον Heckl [1.4.2], ο συντονιστής Helmholtz είναι ένας πολύ καλός σκεδαστής του ήχου. Για την περιγραφή της σκέδασης χρησιμοποιούμε την ενεργό διατομή σκέδασης (scattering cross section) και ορίζεται με ανάλογο τρόπο όπως και στην απορρόφηση:

Η ενεργός διατομή σκέδασης ορίζεται από τον ρυθμό σκέδασης της ενέργειας από τον συντονιστή ανά sec στην θέση του συντονιστή (P_{sc}) προς την ένταση που θα είχε ο ήχος στην ίδια θέση αν δεν υπήρχε ο συντονιστής (I_0).

$$\sigma_{sc} = \frac{P_{sc}}{I_0}$$

Ο συντονιστής έχει εκπληκτική ενεργό διατομή σκέδασης, όταν η συχνότητα διέγερσης συμπίπτει με τη συχνότητα συντονισμού κάτω από συνθήκες προσαρμογής και είναι ίση με την ενεργό διατομή απορρόφησης.

$$\sigma_{sc,max} = \frac{P_{sc,max}}{I} = \frac{\lambda_0^2}{4\pi}$$

1.11.4 Εξάρτηση απωλειών από τη συχνότητα

Μέχρι τώρα ασχοληθήκαμε μόνο με τη συμπεριφορά ενός συντονιστή στον συντονισμό. Η ολική αντίσταση εξαρτάται από τη συχνότητα. Κατά τον Ingard με καλή προσέγγιση, για την έκφραση της ολικής κανονικοποιημένης ειδικής σύνθετης αντίστασης μπορούμε να γράψουμε:

$$\zeta = \frac{(R_i + R_r)_0}{\rho c} [1 - iQ(\gamma - 1/\gamma)], \text{ όπου } \gamma = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad (1.11.17)$$

ω είναι η γωνιακή συχνότητα εργασίας και ω_0 η γωνιακή συχνότητα συντονισμού.

Ο παράγοντας ποιότητας Q του συντονιστή μπορεί να γράφει σε συνάρτηση με την διεγείρουσα συχνότητα από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q = \frac{k_0(l + \delta)}{(R_i + R_r)_0} \quad (1.11.18)$$

όπου k_0 ο γωνιακός κυματάρριθμος και $(R_i + R_r)_0$ η συνολική αντίσταση στον συντονισμό.

Οι ενεργές διατομές απορρόφησης και σκέδασης για οποιαδήποτε συχνότητα σε σχέση με την τιμή τους κατά τον συντονισμό, μπορούν τότε να γραφούν:

$$\frac{\sigma_{sc}}{\sigma_{sc,0}} = \frac{\gamma^2}{1 + Q \left[\gamma - \frac{1}{\gamma} \right]^2}, \quad \frac{\sigma_{abs}}{\sigma_{abs,0}} = \frac{1}{1 + Q \left[\gamma - \frac{1}{\gamma} \right]^2} \quad (1.11.19)$$

όπου $\sigma_{sc,0}$ και $\sigma_{abs,0}$ είναι οι τιμές των ενεργών διατομών σκέδασης και απορρόφησης στη συχνότητα συντονισμού, που αντιστοιχούν σε $\gamma = \omega/\omega_0 = 1$.

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η ενεργός διατομή σκέδασης φθάνει τη μέγιστη τιμή της σε μια συχνότητα μεγαλύτερη από αυτή του συντονισμού. Στην πραγματικότητα, η μέγιστη τιμή απαντάται όταν:

$$\gamma = \left(1 - \frac{1}{4Q^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1.11.20)$$

και η αντίστοιχη μέγιστη ενεργός διατομή σκέδασης είναι

$$\sigma_{sc,max} = \sigma_{sc,0} \left(1 - \frac{1}{4Q^2} \right)^{-1} \quad (1.11.21)$$

Το σχήμα 1.11.1 δείχνει την εξάρτηση της ενεργού διατομής σκέδασης από τον λόγο γ [1.3.6]. Από το σχήμα φαίνεται ότι η μέγιστη ενεργός διατομή πετυχαίνεται μόνο όταν ισχύει $Q > 1/\sqrt{2}$. Όταν έχουμε $Q < 1/\sqrt{2}$ τότε η ενεργός διατομή σκέδασης αυξάνει

μονότονα με την αύξηση του γ . Συνεπώς η ανάλυση που παρουσιάζεται ισχύει μόνο για την θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού, και εφόσον είναι φανερό ότι υψηλότεροι συντονισμοί (αρμονικοί) θα προκαλούν επίσης απορρόφηση και σκέδαση, η απόκριση της συχνότητας πρέπει να τροποποιηθεί κατάλληλα. [1.3.6]

Σχήμα 1.11.1 Γράφημα που φαίνεται η συμπεριφορά των ενεργών διατομών σκέδασης σε σχέση με το γ . Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε άλλη τιμή του παράγοντα Q . Φαίνεται ότι όταν ισχύει $Q > 1/\sqrt{2}$ η ενεργός διατομή σκέδασης γίνεται μέγιστη, ενώ όταν ισχύει $Q < 1/\sqrt{2}$ τότε η ενεργός διατομή αυξάνει μονότονα με την αύξηση του γ .

Το σχήμα 1.11.2 δείχνει την εξάρτηση της ενεργούς διατομής απορρόφησης από τον λόγο γ , για διάφορες τιμές του παράγοντα ποιότητας. Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι καμπύλες είναι περίπου συμμετρικές ως προς την συχνότητα συντονισμού ($\gamma=1$) [1.3.6].

Σχήμα 1.11.2 Γράφημα που φαίνεται η συμπεριφορά των ενεργών διατομών απορρόφησης ξ σε σχέση με το γ . Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε άλλη τιμή του παράγοντα Q .

Η εξαρτημένη από τη συχνότητα απορροφώμενη ενέργεια δίνεται από τον τύπο:

$$P(\omega) = P_{abs, \max} \frac{1}{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}, \quad Q^2 = \frac{\pi}{V} \left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \right)^2 \quad (1.11.22)$$

Όπου Q είναι ο παράγοντας ποιότητας του συντονιστή που δίνεται και από τις εξισώσεις 1.10.16 και 1.11.18 αλλά πιο απλά κατά το συντονισμό χρησιμοποιείται ο παραπάνω τύπος (εξίσωση 1.11.22).

Η ένταση του επανεκπεμπόμενου ήχου συνάρτηση της απόστασης r , προκύπτει από τον τύπο:

$$I_s = \left(\frac{\lambda_0}{2\pi r} \right)^2 I \quad (1.11.23)$$

Ο ήχος μέσα στην κοιλότητα του συντονιστή επανεκπέμπεται από αυτόν. Ο χρόνος αντήρησης του συντονιστή δίνεται για τη συχνότητα συντονισμού από την παρακάτω εξίσωση:

$$T = \frac{13.8Q}{\omega_0} \quad (1.11.24)$$

1.11.5 Εξάρτηση από την αντίσταση

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω αντιστοιχούν στην κατάσταση προσαρμογής. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση ($R_i \neq R_r$) πάντοτε στην συχνότητα συντονισμού, από το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του σχήματος (3.3.4) προκύπτει ότι η ενεργός διατομή απορρόφησης και σκέδασης μπορεί να γραφεί [1.3.5], [1.3.6]:

$$\sigma_{abs} = \frac{\lambda^2}{8\pi} \frac{4\mu}{(1+\mu)^2} \quad (1.11.25)$$

Όπου:

$$\mu = \frac{R_i}{R_r} \quad (1.11.26)$$

$$\sigma_{sc} = \left(\frac{\lambda_0}{2\pi r} \right)^2 \frac{4}{(1+\mu)^2} \quad (1.11.27)$$

Κάτω από ιδανικές συνθήκες, η ενεργός διατομή της σκέδασης έχει την ίδια τιμή με τη ενεργό διατομή της απορρόφησης:

$$\sigma_{abs, \max} = \sigma_{sc, \max} = \frac{\lambda_0^2}{2\pi} \quad (1.11.28)$$

Το αντίστοιχο ζωνικό εύρος απορρόφησης είναι συνήθως πολύ μικρό. Αν το R_i αυξηθεί με την προσθήκη ενός πορώδους υλικού ή με ένα ειδικό σχήμα του ανοίγματος, τότε το εύρος απορρόφησης αυξάνεται με κόστος, βέβαια, τη μείωση της τιμής της ενεργού διατομής απορρόφησης. Σε γενικές γραμμές και σύμφωνα με τον Ingard, το R_r θεωρείται αμελητέο σε

σχέση με το R_i . Έτσι το ζωνικό εύρος καθορίζεται από την αντίσταση του συστήματος, η οποία με τη σειρά της σχετίζεται με την απώλεια ενέργειας στον συντονιστή.

Η ανάλυση δείχνει ότι ένας συντονιστής με λεία και σκληρά τοιχώματα -χωρίς κάποια επιπλέον αντίσταση στο λαιμό- συχνά έχει τιμή Q της τάξης από 30 έως 40. Τέτοια τιμή του Q είναι γενικά πολύ υψηλή για πρακτική χρήση του συντονιστή ως συσκευή απορρόφησης ήχου. Σε μια τέτοια περίπτωση επιλέγουμε υλικά που παρέχουν μεγαλύτερη αντίσταση. Συνήθως, πρέπει να γίνει ένας σχεδιασμός, ο οποίος έχει σαν αποτέλεσμα έναν συντονιστή με απορρόφηση στη συχνότητα συντονισμού, σε ελεύθερο πεδίο αισθητά μικρότερη από $\lambda^2/4\pi$.

Ας υποθέσουμε ότι υπάρχουν N συντονιστές διατεταγμένοι σε τετραγωνική διάταξη με απόσταση r μεταξύ τους. Αν οι συντονιστές βρίσκονται σε ικανοποιητική απόσταση μεταξύ τους, τότε δρουν αυτόνομα ο καθένας, οπότε η συνολική ενεργός διατομή απορρόφησης μπορεί να γραφεί [1.3.5]:

$$\sigma_{abs} = n \frac{\lambda^2}{2\pi} \frac{4\mu}{(1+\mu)^2} \quad (1.11.29)$$

Αν τώρα οι συντονιστές είναι τοποθετημένοι ο ένας κοντά στον άλλο, τότε η συνολική απορρόφηση είναι μικρότερη από την περίπτωση που θεωρούνται αυτόνομοι. Για μια άπειρη, δύο διαστάσεων διάταξη συντονιστών σε επαρκώς μικρή απόσταση μεταξύ τους, η ενεργός διατομή απορρόφησης είναι [1.3.5, 1.3.6]:

$$\sigma_{abs} = \frac{4s_0\mu}{(1+\mu)^2} \quad (1.11.30)$$

όπου $s_0 = l_0^2$ είναι η αντίστοιχη επιφάνεια του τοίχου που αντιστοιχεί σε κάθε συντονιστή. l_0 είναι η απόσταση μεταξύ τους

Η οριακή απόσταση μέχρι την οποία υπάρχει αλληλεπίδραση των συντονιστών εξαρτάται από το μήκος κύματος του ήχου και κατά τον Ingard δίδεται από την σχέση:

$$l_0 = \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi}} \quad (1.11.31)$$

1.12 Ακουστικές παράμετροι

Οι βασικότερες ποσότητες που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της ακουστικής συμπεριφοράς ενός χώρου ονομάζονται δείκτες. Οι βασικότεροι δείκτες περιγράφονται στους κανονισμούς ISO 3382 και περιγράφονται παρακάτω.

Χρόνος αντήχησης T

Ο χρόνος αντήχησης (T), που είναι από τις βασικότερες παραμέτρους που σχετίζονται με την ακουστική συμπεριφορά των κλειστών χώρων, ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται, ώστε η στάθμη θορύβου (Lp) σε κάποιο σημείο να ελαττωθεί κατά 60dB, μετά το μηδενισμό του εκπεμπόμενου θορύβου από την πηγή. Μονάδα μέτρησης του χρόνου αντήχησης είναι το sec. Όταν μιλάμε για τον ίδιο χώρο, ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου και για το λόγο αυτό ορίζεται για τις κεντρικές συχνότητες κάθε οκτάβας ή τριτοκτάβας όπως ακριβώς συμβαίνει και με το συντελεστή απορρόφησης. Για

μια δεδομένη συχνότητα τώρα, οι παράγοντες που τον επηρεάζουν είναι η απορρόφηση και ο όγκος του χώρου. Ο χρόνος αντήχησης είναι το σπουδαιότερο μέγεθος που περιγράφει την ακουστική ποιότητα των κλειστών χώρων.

Δυστυχώς, ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης δεν είναι πολύ εύκολος και αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι προϋποθέτει διάχυτα πεδία, τα οποία στην πράξη δεν απαντώνται στην ιδανική τους μορφή. Ο χρόνος αντήχησης μπορεί να εκτιμηθεί από αναλυτικούς τύπους. Οι πιο γνωστές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό είναι αυτές του Sabine και των Norris - Eyring [1.12.1], αλλά υπάρχουν ακόμα και αυτή του Fitzroy, των Sette - Millington κτλ.

Η προσεγγιστική σχέση του Sabine, που ο υπολογισμός της στηρίχθηκε σε ενεργειακά μοντέλα, ισχύει ικανοποιητικά για χώρους με μικρή απορρόφηση και δίνεται από τον τύπο:

$$T = \frac{0.161V_r}{A} \quad (1.12.1)$$

όπου A η ολική επιφανειακή απορρόφηση του χώρου $A = \sum_{i=1}^{N_s} a_i s_i$ όπου a_i ο συντελεστής απορρόφησης της κάθε επιφάνειας s_i , N_s ο αριθμός των επιφανειών και V_r ο όγκος του χώρου.

Στον Sabine μαζί με τον Franklin οφείλεται και άλλη μια σχέση η οποία δίνει το χρόνο αντήχησης στην περίπτωση που στο χώρο περιλαμβάνονται μεγάλα ανοιχτά παράθυρα και η απορρόφηση από τα αντικείμενα του χώρου είναι μεγάλη. Η σχέση είναι:

$$T = \frac{24V_r \ln 10}{Ac} \quad (1.12.2)$$

Η σχέση των Norris-Eyring, που υπολογίστηκε με βάση τα μοντέλα της γεωμετρικής ακουστικής βασίζεται σε μια πιο λεπτομερή μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς των μεγάλων χώρων, δίδεται δε από την σχέση:

$$T = \frac{0.161}{A_N} \quad (1.12.3)$$

όπου A_N η ολική απορρόφηση του χώρου $A_N = s \ln(1 - \bar{a})^{-1}$ όπου $\bar{a}$ ο μέσος συντελεστής απορρόφησης του χώρου και s το σύνολο των επιφανειών που περιορίζουν τον χώρο.

Η ακρίβεια αυτής της σχέσης είναι μεγάλη όταν η απορρόφηση όλων των επιφανειών του χώρου είναι ίδια. Αν οι διαφορές μεταξύ των επιφανειών είναι έντονες, οι ανωτέρω σχέσεις δίνουν σημαντικές αποκλίσεις από τις μετρήσεις.

Σε περιπτώσεις με ισχυρά μη ομοιόμορφη απορρόφηση χρησιμοποιείται η σχέση του Fitzroy που δίνεται από το τύπο:

$$T = \frac{s_x}{s} \left[\frac{0.161V_r}{s \ln(1 - \bar{a}_x)^{-1}} \right] + \frac{s_y}{s} \left[\frac{0.161V_r}{s \ln(1 - \bar{a}_y)^{-1}} \right] + \frac{s_z}{s} \left[\frac{0.161V_r}{s \ln(1 - \bar{a}_z)^{-1}} \right] \quad (1.12.4)$$

όπου:

s_x το εμβαδόν των τοίχων που βρίσκονται παράλληλα στη διάσταση του μήκους,

s_y το εμβαδόν των τοίχων που βρίσκονται παράλληλα στη διάσταση του πλάτους,

s_z το εμβαδόν του πατώματος και της οροφής και

$\bar{a}_x, \bar{a}_y, \bar{a}_z$ οι αντίστοιχοι μέσοι συντελεστές απορρόφησης.

Σε περιπτώσεις ανομοιομόρφης απορρόφησης εκτός από την παραπάνω σχέση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η σχέση των Sette - Millington, η οποία δίνει πολύ καλά αποτελέσματα και όταν υπάρχουν επιφάνειες με πολύ μεγάλο συντελεστή απορρόφησης που καθιστούν στη σχέση των Norris - Eyring το συντελεστή απορρόφησης μεγαλύτερο από τη μονάδα. Ο τύπος λοιπόν είναι:

$$T = \frac{0.161V_r}{\sum_{i=1}^{N_s} s_i \ln(1-a)^{-1}} \quad (1.12.5)$$

Τέλος, σε περιπτώσεις όπου ο υπό εξέταση χώρος είναι υπερβολικά μεγάλος όπως π.χ. εκκλησίες, θέατρα κ.λ.π. παίζει πολύ σημαντικό ρόλο η απορρόφηση του αέρα και οι παραπάνω τύποι πρέπει να τροποποιηθούν ώστε να περιλάβουν και τον παράγοντα αυτόν. Έτσι ο τύπος των Norris-Eyring τροποποιείται ως εξής:

$$T = \frac{0.161V_r}{A_N + 4m_r V_r} \quad (1.12.6)$$

όπου m_r ο συντελεστής εξασθένησης της ενέργειας που η τιμή του εξαρτάται από την υγρασία, τη συχνότητα και την θερμοκρασία.

Early Decay Time (EDT)

Σ' ένα κλειστό χώρο με μια πηγή και ένα μικρόφωνο εκτός από την απευθείας ηχητική ενέργεια που φθάνει στο μικρόφωνο, υπάρχει και η ανακλώμενη ηχητική ενέργεια που οφείλεται στις ανακλάσεις των ηχητικών κυμάτων στους τοίχους του χώρου αυτού. Οι ανακλάσεις αυτές διακρίνονται σε πρώιμες και καθυστερημένες. Οι πρώιμες ανακλάσεις είναι πολύ σημαντικές και επηρεάζουν την ακουστική συμπεριφορά του χώρου, ενώ οι καθυστερημένες έχουν χάσει μεγάλο μέρος της ενέργειας που μεταφέρουν και έτσι δεν παίζουν σπουδαίο ρόλο στην ακουστική του χώρου. Έτσι, όταν η κλίση του ρυθμού πτώσης δεν είναι ομαλή χρησιμοποιούμε τον πρώιμο ρυθμό μείωσης EDT , που υπολογίζεται από το πρώτο τμήμα του ρυθμού μείωσης της στάθμης (από 0 έως -10 dB) και λαμβάνει υπόψη τις πρώιμες ανακλάσεις.

Κεντρικός χρόνος T_s (Center Time ή Center of Gravity)

Ο Küster όρισε τον κεντρικό χρόνο T_s ως το χρόνο του κέντρου βαρύτητας της τετραγωνισμένης κρουστικής απόκρισης και δίνεται από τον τύπο:

$$T_s = \frac{\sum_0^{\infty} t h^2(t)}{\sum_0^{\infty} h^2(t)} \quad (1.12.7)$$

όπου $h(t)$ η κρουστική απόκριση του χώρου στο σημείο λήψης.

Η μονάδα μέτρησης του κεντρικού χρόνου είναι το sec (ή msec).

Διακριτότητα D_{50} (Definition)

Ένας άλλος δείκτης που αξιολογεί την ακουστική συμπεριφορά ενός χώρου είναι ο δείκτης διακριτότητας (Definition, Deutlichkeit). Ο πρώτος που προσπάθησε να μετρήσει τη διακριτότητα με αντικειμενικά κριτήρια ήταν ο Thiele, ορίζοντάς την ως το λόγο της πρώιμης ηχητικής ενέργειας που φτάνει στα πρώτα 50 msec προς τη συνολική ηχητική ενέργεια εκφρασμένη σε ποσοστό επί της εκατό. Η σχέση που την ορίζει είναι:

$$D = \frac{\int_0^{50\text{msec}} h(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} h(t)^2 dt} 100\% \quad (1.12.8)$$

Οι πιο πρακτικές τιμές για την διακριτότητα είναι 0 έως 1, ενώ σε ποσοστό από 0 έως 100%. Ο Bore μέσω των πειραμάτων του απέδειξε ότι η διακριτότητα και η επί της % αντιληπτότητα σχετίζονται άμεσα.

Ευκρίνεια ή Δείκτης Διαύγειας C_{80} (Clarity)

Εκτός από τη διακριτότητα υπάρχει και ένα άλλο παρεμφερές μέγεθος, η ευκρίνεια ή δείκτης διαύγειας που χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει και τη "διαφάνεια" (Transparency) της μουσικής. Η ευκρίνεια ορίζεται ως ο λόγος της "χρήσιμης ενέργειας" της κρουστικής απόκρισης που φτάνει στον ακροατή στα πρώτα 80msec και της "επιβλαβούς ενέργειας" που φτάνει μετά από αυτή και η σχέση που τη εκφράζει:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80\text{msec}} h(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} h(t)^2 dt} = 10 \log \frac{E_{80}}{E_{80-\infty}} \quad (1.12.9)$$

όπου E_{80} και $E_{80-\infty}$ η ενέργεια που φτάνει στα πρώτα 80msec και μετά τα 80msec αντίστοιχα.

Η ευκρίνεια μετριέται σε dB, οι πιο πρακτικές τιμές της είναι από -10 έως 50dB και όσο μεγαλύτερη είναι τόσο καλύτερη είναι η αντιληπτότητα της ομιλίας. Όταν, τέλος, σχετίζεται με τη μουσική αντίληψη, τότε το διάστημα χρόνου που υπολογίζεται είναι 0-80msec ενώ για τις άλλες περιπτώσεις, πχ ομιλία, είναι 0- 50msec και συμβολίζεται με C_{50} .

Δείκτης $RASTI$ (Rapid Speech Transmission Index)

Ο δείκτης $RASTI$ δείχνει το βαθμό της αντιληπτότητας του ομιλούντος και υπολογίζεται από τις κρουστικές αποκρίσεις. Δηλαδή ο δείκτης $RASTI$ εκτιμά στην ουσία το ποσοστό των σωστών συλλαβών που αντιλαμβάνεται ο μέσος ακροατής, λαμβάνοντας υπόψη τον θόρυβο βάθους και τον χρόνο αντήχησης. Οι τιμές που μπορεί να πάρει είναι από 0 έως 1 ενώ για τιμές πάνω από 0.7 θεωρούμε ότι έχουμε καλή αντιληπτότητα.

Δείκτης ισχύος G (Strength)

Όπως έχει αναφερθεί, όταν σε ένα κλειστό χώρο μια πηγή παράγει ένα ηχητικό σήμα, στο δέκτη φθάνουν εκτός από το απευθείας σήμα, και οι ανακλάσεις πρώιμες και καθυστερημένες. Η συμπεριφορά του ήχου όμως, σε ελεύθερο πεδίο είναι διαφορετική γιατί δεν υπάρχουν ανακλάσεις. Ο δείκτης ισχύος G λοιπόν, συσχετίζει τις δυο καταστάσεις, εκφράζοντας τη διαφορά μεταξύ της στάθμης ηχητικής πίεσης (SPL), μετρημένης στη θέση του δέκτη σε κλειστό χώρο, και τη στάθμη που παράγεται από την ίδια παντοκατευθυντική πηγή σε ελεύθερο πεδίο και σε απόσταση 10 m. Είναι ένας λογαριθμικός λόγος και γι' αυτό μετριέται σε dB. Ο δείκτης ισχύος G δίνεται από τη σχέση:

$$G = 10 \log \frac{\sum_0^{\infty} h(t)^2}{\sum_0^{\infty} h_{10}(t)^2} (dB) = L_{pE} - L_{pE,10} \quad (1.12.10)$$

όπου:

$$L_{pE} = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \sum_0^{\infty} \frac{h(t)^2}{h_0^2} \right), \text{ σε dB η ηχητική στάθμη της } h(t) \quad (1.12.11)$$

$$L_{pE} = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \sum_0^{\infty} \frac{h_{10}(t)^2}{h_0^2} \right), \text{ σε dB η ηχητική στάθμη της } h_{10}(t) \quad (1.12.12)$$

με $h(t)$ συμβολίζουμε τη κρουστική απόκριση στο σημείο μέτρησης και με $h_{10}(t)$ την κρουστική απόκριση που μετρήθηκε στο ελεύθερο πεδίο σε απόσταση 10m από την πηγή. Το h_0 ισούται με 20μPa και το T_0 με 1sec.

Στην πράξη, για να υπολογίσουμε το δείκτη ισχύος G , λαμβάνουμε τη διαφορά μεταξύ της στάθμης ηχητικής πίεσης και της στάθμης ηχητικής ισχύος της πηγής προσθέτοντας 31 dB.

Πλευρικές ανακλάσεις LEF (Lateral Energy Fraction)

Η ευρυχωρία είναι ένα χαρακτηριστικό των κλειστών χώρων που μας δείχνει την αίσθηση που δίδει ο χώρος και είναι πολύ σημαντική για κάποιες κατασκευές όπως θέατρα, αίθουσες συναυλιών κτλ. Οι πλευρικές ανακλάσεις, λοιπόν, ή πιο απλά το LEF , εκφράζει το μέρος της ενέργειας που φθάνει στο δέκτη στα πρώτα 80msec από πλευρικές όμως διευθύνσεις. Η σχέση που τον εκφράζει:

$$LEF = 100 \frac{\sum_0^{80msec} h(t)^2}{\sum_0^{80msec} h(t)^2} \quad (1.12.13)$$

Βιβλιογραφία

- [1.2.1] Αριστοτέλης, "Προβλήματα", μετάφραση: Βασίλειος Μανδηλαράς, Κάκτος 1995.
- [1.2.2] Βιτρούβιος, "Περί αρχιτεκτονικής", μετάφραση από το αρχαίο κείμενο: Παύλος Λέφας, Πλέθρον 1997.
- [1.2.3] Hermann von Helmholtz, "Die Lehre von den Tonempfindungen", 1863.
- [1.2.4] Hermann von Helmholtz, "On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music", Αγγλική μετάφραση Alexander John Ellis, Longmans Green and Co., 1875.
- [1.2.5] Alexander Graham Bell, "Messungen über den zeitlichen Verlauf der Zuckung animalischer Muskeln und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in den Nerven. In: Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin. Jg.", Veit & Comp., Berlin, 1850.
- [1.3.1] E.Kinsler, R.Frey, B.Coppens and V.Sanders, "Fundamentals Of Acoustics", third edition, Wiley, 1982.
- [1.3.2] Junker M J, "Helmholtz resonators in load- Bearing wall", Noise control engineering, vol.4, No1, 1975.
- [1.3.3] Everest F. A. και Polhmann K, "The master handbook of Acoustics", 5th Edition Mc Graw Hill, 2009.
- [1.3.4] Rolf Tore Randeberg, "Perforated Panel Absorbers with Viscous Energy Dissipation Enhanced by Orifice Design", διδακτορική διατριβή στο Trondheim, 2000.
- [1.3.5] C. L. S. Gilford, "Helmholtz resonators in the acoustic treatment of broadcasting studios", British Journal of Applied Physics, 1951.
- [1.3.6] K.U. Ingard, "On the theory and design of acoustic resonators", Journal of the Acoustical Society of America 25, 1953.
- [1.4.1] V. Jordan "The application of Helmholtz resonators to Sound absorbing structures" Journal Acoustical Society of America, Volume 19, 1947.
- [1.4.2] M.Alster, "Improved calculation of resonant frequencies of Helmholtz resonators", Journal of Sound and Vibration, vol. 24 no 1, 1972.
- [1.4.3] J. Mohring "Helmholtz Resonators with Large Aperture", Acta Acustica united with Acustica, vol 85, no 6, 1999.
- [1.4.4] S.K. Tang, "On Helmholtz resonators with tapered necks", Journal of Sound and vibration 279, 2005.
- [1.4.5] Simon J. Estève και Marty E. Johnson "Reduction of sound transmission into a circular cylindrical shell using distributed vibration absorbers and Helmholtz resonators", J. Acoust. Soc. Am., Volume 112, Issue 6, 2002.
- [1.4.6] S. Dequand, S. Hulshoff, H. Van Kuijk, J. Willems και A. Hirschberg, "Resonator Self-Sustained Oscillations, Part 2: Detailed Flow Measurements and Numerical Simulations", AIAA Journal, Volume 41, No. 3, 2003.
- [1.4.7] Fei Liu, Alex Phipps, Stephen Horowitz, Khai Ngo, Louis Cattafesta¹, Toshikazu Nishida και Mark Sheplak, "Acoustic energy harvesting using an electromechanical

- Helmholtz resonator*", Journal of the Acoustical Society of America, Volume 123, Issue 4, 2008.
- [1.4.8] S P Matova, R Elfrink, R J M Vullers και R van Schaijk, "*Harvesting energy from airflow with a micromachined piezoelectric harvester inside a Helmholtz resonator*", Journal of Micromechanics and Microengineering, 2011.
- [1.4.9] Smoker J., Nouh, M., Aldraihem O. και Baz A, "*Energy harvesting from a standing wave thermoacoustic-piezoelectric resonator*", Journal of Applied Physics, Volume 111, Issue 10, 2012.
- [1.4.10] Daniel O. Ludqigsen, Cayla Jewett και Matthew Jusczyk, "*Better Understanding of Resonance through Modeling and Visualization*", Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference, Boston, 2006.
- [1.4.11] P.D. Joppa και I.M. Fyfe, "*A finite element analysis of the impedance properties of irregular shaped cavities with absorptive boundaries*", Journal of Sound and Vibration, Volume 56, Issue 1, 1978.
- [1.4.12] Laurent Georges, Grégoire Winckelmans, Stéphane Caro και Philippe Geuzaine: "*Aeroacoustic simulation of the flow in a Helmholtz resonator*", Computational Fluid Dynamics, 2006.
- [1.4.13] Andrea Panteghini, Francesco Genna και Edoardo Piana, "*Analysis of a perforated panel for the correction of low frequency resonances in medium size rooms*", Applied Acoustics, 68, 2007.
- [1.4.14] S. Polychronopoulos, D. Skarlatos και J. Mourjopoulos, "*Measuring resonator panels' frequency absorption and Q factor, using Finite Elements Method*", ICSV17 congress, Cairo, 2010.
- [1.4.15] Vasile, O. και Gillich, G., "*Finite Element Analysis Of Acoustic Pressure Levels And Transmission Loss Of A Muffler*", 6th Wseas European Computing Conference, Prague, 2012.
- [1.4.16] S. Mekid και M. Farooqui, "*Design of Helmholtz resonators in one and two degrees of freedom for noise attenuation in pipelines*", Acoustics Australia, vol. 40, no. 3, 2012.
- [1.4.17] S. Polychronopoulos, A. Kokkinos και D. Skarlatos, "*The effect of sound source position to the frequency response of the perforated panels*", πρακτικά Ελληνικού συνεδρίου "Acoustics 2010", 2010.
- [1.4.18] S. Polychronopoulos, D. Skarlatos και J. Mourjopoulos, "*A FEM model of a highway tunnel to observe and propagate the noise from the vehicles.*", πρακτικά Ελληνικού συνεδρίου "Acoustics 2010", 2010.
- [1.4.19] Ken Steiglitz, "*A Digital Signal Processing Primer: With Applications to Digital Audio and Computer Music*", Prentice Hall, 1996.
- [1.4.20] Tomasz Starecki, "*Loss-improved electroacoustical modeling of small Helmholtz resonators*", Journal of the Acoustical Society of America, Volume 122, Issue 4, 2007.
- [1.4.21] Qibo Mao και Stanislaw Pietrzko, "*Experimental study for control of sound transmission through double glazed window using optimally tuned Helmholtz resonators*", Applied Acoustics 71, 2010.

- [1.4.22] S. Unnikrishnan Naira, C.D. Shetea, A. Subramoniam, K.L. Handoo και C. Padmanabhan, *"Experimental and computational investigation of coupled resonator-cavity systems"*, Applied Acoustics 71, 2010.
- [1.4.23] Olivier Cherriera, Valerie Pommier-Budinger και Frank Simonb, *"Panel of resonators with variable resonance frequency for noise control"*, Applied Acoustics 73, 2012.
- [1.4.24] Li Deyu και Li Cheng, *"Acoustically coupled model of an enclosure and a Helmholtz resonator array"*, Journal of Sound and Vibration, Volume 305, Issues 1–2, 2007.
- [1.4.25] Satoshi Konishi, Mitsuhiro Yoda, Susumu Sugiyama και Sadao Akishita, *"Tunable Acoustic Absorber Using A Micro Acoustic Hole Array"*, Electronics and Communications in Japan, Part 2, Vol. 83, No. 1, 2000.
- [1.4.26] Pedro Cobo, Jaime Pfretzschner, Mari'a Cuesta και David K. Anthony, *"Hybrid passive-active absorption using microperforated panels"*, Instituto de Acustica, CSIC, Serrano 144, 2004.
- [1.4.27] Jaime Pfretzschner, Pedro Cobo, Francisco Simo' n, Mari'a Cuesta και Alejandro Fernandez, *"Microperforated insertion units: An alternative strategy to design microperforated panels"*, Applied Acoustics 67, 2005.
- [1.4.28] Heidi Ruiza , Pedro Cobo και Finn Jacobsenb, *"Optimization of multiple-layer microperforated panels by simulated annealing"*, Applied Acoustics Volume 72, Issue 10, 2011.
- [1.4.29] Pedro Cobo και Francisco Montero de Espinosa, *"Proposal of cheap microperforated panel absorbers manufactured by infiltration"*, Applied Acoustics Volume 74, Issue 9, 2013.
- [1.4.30] Kimihiro Sakagami, Masayuki Morimoto και Wakana Koike, *"A numerical study of double-leaf microperforated panel absorbers"*, Applied Acoustics Volume 67, Issue 11, 2006.
- [1.4.31] Kimihiro Sakagami, Masayuki Morimoto, Motoki Yairib και Atsuo Minemura, *"A pilot study on improving the absorptivity of a thick microperforated panel absorber"*, Applied Acoustics Volume 69, Issue 2, 2008.
- [1.4.32] Kimihiro Sakagami, Masayuki Morimoto και Motoki Yairib, *"A note on the relationship between the sound absorption by microperforated panels and panel/membrane-type absorbers"*, Applied Acoustics Volume 70, Issue 11, 2009.
- [1.4.33] Kimihiro Sakagami, Tomohito Nakamoria, Masayuki Morimoto και Motoki Yairib, *"Double-leaf microperforated panel space absorbers: A revised theory and detailed analysis"*, Applied Acoustics Volume 70, Issue 11, 2009.
- [1.4.34] Masahiro Toyodaa, Rui Lin Mub και Daiji Takahashib, *"Relationship between Helmholtz-resonance absorption and panel-type absorption in finite flexible microperforated-panel absorbers"*, Applied Acoustics Volume 71, Issue 9, 2010.
- [1.4.35] Rui Lin Mua, Masahiro Toyodab και Daiji Takahashia, *"Sound insulation characteristics of multi-layer structures with a microperforated panel"*, Applied Acoustics Volume 72, Issue 11, 2011.
- [1.4.36] J. Liu, X. Hua και D.W. Herrin, *"Estimation of effective parameters for microperforated panel absorbers and applications"*, Applied Acoustics Volume 75, 2014.

- [1.4.37] Kosuke Nagaya Yasudide Hano και Akihisa Suda, "*Silencer consisting of two-stage Helmholtz resonator with auto-tuning control*", Journal of the Acoustical Society of America, Volume 110, 2001.
- [1.4.38] Sang-Hyun Seo και Yang-Hann Kim, "*Silencer design by using array resonators for low-frequency band noise reduction*", Journal of the Acoustical Society of America, Volume 118, 2005.
- [1.4.39] Floriot R., "*Contribution à l'étude des vases acoustiques du moyen âge*", διδακτορική διατριβή στο Faculté des sciences, Université d'Aix-Marseille, Marseille, 1964.
- [1.4.40] Floriot, R., "*Les vases acoustiques du moyen âge*", Bulletin du Groupe d'Acoustique Musicale, pp. 15, 1978.
- [1.4.41] Koumanoudis I., "*On the theory of Christian Church vases*", διδακτορική διατριβή στο Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2004 (στα Ελληνικά).
- [1.4.42] Koumanoudis I., "*On the theory of acoustic pots in Greek Churches*", πρακτικά Ελληνικού συνεδρίου "Acoustics 2002", 2002.
- [1.4.43] D. Skarlatos, T. Zakynthinos και I Koumanoudis, "*The use of ceramic pots in old Churches, Ceramic Research Advances*", Nova Science Publishers, 2007.
- [1.4.44] Zakynthinos και T. Skarlatos D., "*The effect of ceramic pots on the acoustics of old Greek orthodox churches*", Applied Acoustics 2006 Volume 68, Issue 11-12, 2007.
- [1.4.45] Mijic M. και Sumarac- Pavlovic D., "*Analysis of contribution of Acoustic resonators found in Serbian orthodox churches*", Building Acoustics, Volume 11, No3, 2004.
- [1.4.46] Mutbul Kayili, "*Evolution of acoustics and effects of worship buildings on it*", Forum Acusticum Sevilla, 2002.
- [1.4.47] Desarnaulds V., Loerincic Y. και Carvalho P., "*Efficiency of the 13th century acoustics ceramic pots in two Swiss churches*", Noise Conference, 2001.
- [1.4.48] Carvalho P. A., Desarnaulds V. και Loerincic Y., "*Acoustic behaviour of acoustic pots used in middle age worship spaces – A laboratory analysis*", 9th international Congress on sound and Vibration ICSV9, 2002.
- [1.4.49] Spyros Polychronopoulos, Dimitris Kougias, Polykarpos Polykarpou και Dimitris Skarlatos, "*The Use of Resonators in Ancient Greek Theatres*", Acta Acustica united with, Acustica Vol. 99, 2013.
- [1.10.1] Panton R. και Miller J., "*Resonant frequencies of cylindrical Helmholtz resonators*", Journal Acoustical Society of America, Volume 57, 1975.
- [1.10.2] Li D., "*Vibroacoustic behaviour and noise control studies of advanced composite structures*", διδακτορική διατριβή στο University of Pittsburch, 2003.
- [1.12.1] Wallace Clement Sabine, "*Collected Papers on Acoustics*", Dover, 1964, first published in 1922.

2ο Κεφάλαιο

Εξομοίωση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

2.1 Εισαγωγή

Το χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων. Η βασική έννοια της μεθόδου είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία, τα οποία συνδέονται με ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Τα πεπερασμένα στοιχεία -σε δύο διαστάσεις- είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά. Για να γίνει χρήση της μεθόδου απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Το πρόβλημα εκφράζεται ως ένα σύνολο (σύστημα) γραμμικών εξισώσεων, οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους. Για να επιτευχθεί ακριβής λύση ενός συγκεκριμένου προβλήματος στη διακριτοποιημένη μορφή του, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβιβαστότητας στο εσωτερικό των στοιχείων αλλά και στα σύνορά τους. Μια διακριτή προσομοίωση δεν μπορεί να αποδώσει με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου, ανεξαρτήτως του αριθμού των διακριτών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται. Υπάρχει, δηλαδή, πάντοτε ένα σφάλμα, το οποίο, όμως, μπορεί να περιορισθεί και να γίνει αμελητέο και τοπικό. Ένας τρόπος να περιορισθεί το εν λόγω σφάλμα είναι να χρησιμοποιηθούν μικρότερα και περισσότερα στοιχεία, καθώς έτσι θα δημιουργηθούν περισσότεροι κόμβοι και συνεπώς περισσότερα σημεία, στα οποία θα ικανοποιείται η συμβιβαστότητα. Όσο, όμως, αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων, τόσο αυξάνεται ο χρόνος υπολογισμού και αρκετές φορές το πρόβλημα δεν επιλύεται με την υπάρχουσα υπολογιστική ισχύ. Σε πολλές περιπτώσεις, η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων χρησιμοποιείται για να αποκτηθεί ακριβέστερη εικόνα της τοπικής συμπεριφοράς (σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ανοίγματα, κοντά στο σημείο εφαρμογής του εξωτερικού φορτίου, κλπ). Λόγω της μεγάλης ποικιλίας κατασκευών και φορτίσεων δεν είναι δυνατό να δοθεί γενικός κανόνας σχετικά με τον αριθμό, το μέγεθος των στοιχείων ή τον τρόπο διακριτοποίησης, που απαιτούνται για επαρκή ακρίβεια.

Για την εξομοίωση μοντέλων με σκοπό τη μελέτη των ακουστικών τους παραμέτρων, το σημαντικότερο στοιχείο για την εύρεση της βέλτιστης διακριτοποίησης είναι το μήκος κύματος (λ) της ακουστικής πίεσης που εκπέμπει η πηγή στο μοντέλο. Δε θα πρέπει σε καμία περίπτωση το εν λόγω μήκος να είναι μικρότερο από κάποια από τις διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος της ακουστικής πίεσης της πηγής, τόσο το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να είναι πυκνότερο. Γι αυτό με τη μέθοδο αυτή είναι δύσκολο, λόγω της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος, ακόμη και για απλά μοντέλα να μελετήσουμε τη συμπεριφορά τους σε υψηλές συχνότητες.

2.2 Εξομοίωση ακουστικών μοντέλων με πεπερασμένα στοιχεία

Εξίσωση του Helmholtz

Για την επίλυση των τρισδιάστατων μοντέλων στο πεδίο της συχνότητας και στην περίπτωση αρμονικών κυμάτων, στα οποία οι μεταβλητές χωρίζονται, η ακουστική πίεση ως λύση της κυματικής εξίσωσης έχει την μορφή:

$$p(x, t) = p(x)e^{i\omega t} \quad (2.2.1)$$

Όταν τα κύματα διαδίδονται σε μέσο χωρίς απώλειες όπου λαμβάνεται υπόψη η συμβολή των ηχητικών κυμάτων λόγω ανακλάσεων η κυματική εξίσωση καταλήγει στην εξίσωση του Helmholtz που περιγράφεται από την γενική εξίσωση:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}_d) \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c^2} = Q_m \quad (2.2.2)$$

Στην παραπάνω εξίσωση για την ακουστική πίεση p ισχύει: $p=p(x, \omega)$, όπου το ω (γωνιακή συχνότητα) προσδιορίζει την εξάρτηση της πίεσης από τη συχνότητα. Το $\mathbf{q}_d$ συμβολίζει την διπολική πηγή, ενώ το Q_m την αντίστοιχη μονοπολική. Στην περίπτωση της ομογένειας, οι δύο αυτοί όροι είναι ίσοι με το 0. Ο όρος $\rho_0 c^2$ αντιστοιχεί στο αδιαβατικό μέτρο ελαστικότητας (bulk modulus). Σε μοντέλα για την απόσβεση των ταλαντώσεων του υλικού το ρ_0 και το c παίρνουν μιγαδικές τιμές. Σε αυτή την εργασία όμως δεν έχουν υλοποιηθεί τέτοια μοντέλα.

Για μοντέλα δύο διαστάσεων η εξίσωση 2.2.2 γράφεται:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}_d) \right) - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\omega^2}{c^2} - k_z^2 \right) p = Q_m \quad (2.2.3)$$

όπου k_z ο κυματάριθος.

Στην περίπτωση διάδοσης σε μέσο με απώλειες η παραπάνω εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$\frac{1}{\rho_0 c_s^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - d_a \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}_d) \right) = Q_m \quad (2.2.4)$$

Συνοριακές συνθήκες

Τα όρια, μέσα στα οποία θα λυθεί το μοντέλο, παίζουν σημαντικό ρόλο καθώς μπορούμε ανάλογα με τις ιδιότητες που θα τους δοθούν να εξομοιώσουν, συνθήκες ελεύθερου πεδίου, κλειστού χώρου, ανοιχτού χώρου με πάτωμα και άλλα. Στην περίπτωση εξομοίωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διακρίνονται τρεις περιπτώσεις ορίων: τα πλήρως ανακλαστικά όρια (Hard boundaries), τα πλήρως απορροφητικά όρια (Soft boundaries) και η ενδιάμεση κατάσταση ορίων (Impedance boundary condition).

Στην πρώτη περίπτωση η κάθετη σε αυτά συνιστώσα της επιτάχυνσης θα είναι μηδέν κι έτσι θα ισχύει:

$$-\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right) = 0 \quad (2.2.5)$$

Η παράγωγος της πίεσης στο όριο αυτό θα είναι μηδέν: $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$.

Στην δεύτερη περίπτωση για την διαφορική πίεση μπορούμε να γράψουμε:

$$p = 0 \quad (2.2.6)$$

Στην τρίτη περίπτωση που ουσιαστικά αποτελεί μια γενίκευση των άλλων δύο ισχύει:

$$\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right) - \frac{i\omega p}{Z} = 0 \quad (2.2.7)$$

Η εμπέδηση του μέσου (Z) που περιορίζει το τοίχωμα μπορεί να γραφεί με την μορφή:

$$Z = \zeta Z_0 \quad Z_0 = \rho c \quad (2.2.8)$$

όπου ζ αδιάστατη ποσότητα.

Η παραπάνω συνθήκη, όμως, είναι ακραία και δεν απαντάται σε φυσικά συστήματα. Εάν εξομοιωθεί κάποιος τοίχος ενός πραγματικού χώρου θα έχει κάποιο ποσοστό απορρόφησης και εκπομπής. Έτσι, η εξίσωση, η οποία εκφράζει την πίεση σε αυτό το όριο, περιγράφεται από τη σχέση:

$$\mathbf{n} \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right) = \mathbf{a}_n \quad (2.2.9)$$

όπου $\mathbf{a}_n$ η επιτάχυνση στο όριο αυτό.

Η εξίσωση των Helmholtz Kirchhoff

Για ομογενή μέσα, η λύση της εξίσωσης του Helmholtz σε οποιοδήποτε σημείο που βρίσκεται έξω από μια επιφάνεια που περικλείει πηγές, η λύση μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση των όρων που υπολογίζονται επάνω στην επιφάνεια ως εξής:

$$-\nabla \cdot \nabla p - k^2 p = 0 \quad (2.2.10)$$

Όπου:

$$p(\mathbf{R}) = \int_S (G(\mathbf{R}, \mathbf{r}) \nabla p(\mathbf{r}) - \nabla G(\mathbf{R}, \mathbf{r}) p(\mathbf{r})) \mathbf{n} ds \quad (2.2.11)$$

Στην σχέση αυτή το διάνυσμα συντεταγμένων $\mathbf{r}$ παραμετροποιεί το s . Το μοναδιαίο διάνυσμα $\mathbf{n}$ είναι το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια προς τον εξωτερικό χώρο από αυτήν. Η συνάρτηση $G(\mathbf{R}, \mathbf{r})$ είναι η συνάρτηση του Green που ικανοποιεί την συνθήκη:

$$-\nabla \cdot \nabla G(\mathbf{R}, \mathbf{r}) - k^2 G(\mathbf{R}, \mathbf{r}) = \delta^{(3)}(\mathbf{R} - \mathbf{r}) \quad (2.2.12)$$

Στον χώρο των τριών διαστάσεων η συνάρτηση του Green μπορεί να γραφεί με την μορφή:

$$G(\mathbf{R}, \mathbf{r}) = \frac{e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{R}|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{R}|} \quad (2.2.13)$$

Στην περίπτωση των δύο διαστάσεων η συνάρτηση του Green μπορεί να γραφεί με την βοήθεια της συνάρτησης του Hankel:

$$G(\mathbf{r} - \mathbf{R}) = \frac{i}{4} H_0^{(2)}(k(\mathbf{r} - \mathbf{R})) \quad (2.2.14)$$

Αν εισαγάγουμε τις παραπάνω σχέσεις στην (2.2.11) τότε προκύπτει:

Για την περίπτωση των τριών διαστάσεων:

$$p(\mathbf{R}) = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{e^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{R}|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{R}|} \left(\nabla p(\mathbf{r}) + p(\mathbf{r}) \frac{1+ik|\mathbf{r}-\mathbf{R}|}{|\mathbf{r}-\mathbf{R}|^2} (\mathbf{r} - \mathbf{R}) \right) \mathbf{n} ds \quad (2.2.15)$$

Για την περίπτωση των δύο διαστάσεων:

$$p(\mathbf{R}) = -\frac{i}{4} \int_S \left(H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}-\mathbf{R}|) \nabla p(\mathbf{r}) + kp(\mathbf{r}) \frac{H_1^{(2)}(k|\mathbf{r}-\mathbf{R}|)}{|\mathbf{r}-\mathbf{R}|} (\mathbf{r}-\mathbf{R}) \right) \cdot \mathbf{n} dS \quad (2.2.16)$$

Το όριο του μακρινού πεδίου

Η εξίσωση των Helmholtz Kirchhoff δίνει την ακουστική πίεση σε μια συγκεκριμένη απόσταση από την πηγή. Για μεγάλες σχετικά αποστάσεις από την πηγή, όταν το διάνυσμα $\mathbf{R}$ τείνει στο άπειρο, για την πίεση στην περίπτωση των τριών διαστάσεων μπορούμε να γράψουμε:

$$p_{far}(\mathbf{R}) = -\frac{1}{4\pi} \int_S e^{ik\frac{\mathbf{r}\cdot\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|}} \left(\nabla p(\mathbf{r}) - ip(\mathbf{r}) \frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|} \right) \cdot \mathbf{n} ds \quad (2.2.17)$$

Για την περίπτωση των δύο διαστάσεων η εξίσωση είναι παρόμοια με αυτήν των τριών διαστάσεων:

$$p_{far}(\mathbf{R}) = -\frac{1-i}{4\sqrt{\pi k}} \int_S e^{ik\frac{\mathbf{r}\cdot\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|}} \left(\nabla p(\mathbf{r}) - ikp(\mathbf{r}) \frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|} \right) \cdot \mathbf{n} ds \quad (2.2.18)$$

Για την εξομοίωση του ελεύθερου πεδίου στο συχνοτικό πεδίο, χρησιμοποιούνται οι επαναδιατυπωμένες συνθήκες του Higdon από τους Givoli και Neta [2.2.1] που αναφέρονται σε επίπεδα κύματα. Τα κυλινδρικά και σφαιρικά κύματα προσεγγίζονται από τις εκφράσεις των Bayliss, Gunzburger και Turkel [2.2.2].

Για την οριακή επιφάνεια στο πεδίο της συχνότητας:

$$\mathbf{n} \left(\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right) + (ik + \kappa(r)) \frac{p}{\rho_0} = (ik + \kappa(r)) \frac{p_i}{\rho_0} + \mathbf{n} \frac{\nabla p_i}{\rho_0} \quad (2.2.19)$$

όπου k ο κυματάριθμος και $\kappa(r)$ η εξίσωση της οποίας η μορφή εξαρτάται από τον τύπο του κύματος.

Για επίπεδο κύμα:

$$\mathbf{n} \left(\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right) + i \frac{k}{\rho_0} p + \frac{i}{2k\rho_0} \Delta_T p = \frac{i}{2k\rho_0} \Delta_T p_i (ik + \kappa(r)) + i \frac{k}{\rho_0} p_i + \mathbf{n} \frac{\nabla p_i}{\rho_0} \quad (2.2.20)$$

Για κυλινδρικό κύμα:

$$\mathbf{n} \left(\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right) = ik + \frac{1}{2r} - \frac{1}{8r(1+ikr)} \frac{p_i - p}{\rho_0} + \mathbf{n} \frac{\nabla p_i}{\rho_0} - \frac{r\Delta_T p_i + r\Delta_T p}{2(1+ikr)\rho_0} \quad (2.2.21)$$

Για σφαιρικό κύμα:

$$\mathbf{n} \left(\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right) + \left(ik + \frac{1}{r} \right) \frac{p}{\rho_0} - \frac{r\Delta_T p}{2\rho_0(ikr+1)} = \mathbf{n} \frac{\nabla p_i}{\rho_0} + \left(ik + \frac{1}{r} \right) \frac{p_i}{\rho_0} + \frac{r\Delta_T p_i}{2\rho_0(ikr+1)} \quad (2.2.22)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις το Δ_T , σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο πάνω στην οριακή επιφάνεια, υποδηλώνει την εξίσωση Laplace στο επίπεδο το οποίο εφάπτεται σε αυτό το σημείο.

Αντίστοιχα η έκφραση για την οριακή επιφάνεια στο πεδίο του χρόνου θα είναι:

$$\mathbf{n} \left(\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - \mathbf{q}) \right) + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial p}{\partial t} + \kappa(r)p \right) = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial p_i}{\partial t} + \kappa(r)p_i + \mathbf{n} \nabla p_i \right) \quad (2.2.23)$$

όπου $\kappa(r)$ η ίδια εξίσωση με τον πιο πάνω ορισμό της, που όμως εδώ εξαρτάται από την ιδιοσυχνότητα και p_i η προαιρετική πίεση για το προσπίπτον κύμα.

Η ακουστική πίεση στους υπολογισμούς της σταθμής της ακουστικής πίεσης SPL υπολογίζεται με βάση την μέση τετραγωνική ρίζα της RMS πίεσης:

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{1}{2} p \text{conj}(p)} \quad (2.2.24)$$

Ενδεικτικά η πίεση αναφοράς για τον αέρα (η οποία έχει χρησιμοποιηθεί και στην συγκεκριμένη εργασία) είναι 0.02 mPa ($20 \cdot 10^{-6}$ Pa). Ο επιλεγμένος συντελεστής εξασθένισης σε dB/m (decibel ανά μέτρο) εκφράζεται από τη σχέση:

$$k_c = \frac{\omega}{c} - i \ln(10) \frac{a}{20} \quad (2.2.25)$$

όπου a ο συντελεστής απορρόφησης του μέσου διάδοσης.

2.3 Εξομοίωση απλού συντονιστή Helmholtz με πεπερασμένα στοιχεία

Η εξομοίωση συντονιστών Helmholtz σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να πραγματοποιείται σε τρεις διαστάσεις,. Αυτό γιατί εάν σχεδιαστεί το μοντέλο σε δύο διαστάσεις ο όγκος (V_{HR}) απεικονίζεται και υπολογίζεται σε δύο διαστάσεις αντί τρεις και η επιφάνεια του στομίου (S_{HR}) σε μια διάσταση αντί δύο. Έτσι, η συχνότητα συντονισμού (f_0) και η απορρόφηση, που θα προκύψει από ένα τέτοιο δισδιάστατο μοντέλο, δεν είναι οι πραγματικές. Δισδιάστατα μοντέλα συντονιστών Helmholtz, ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση αποτελεσμάτων όταν δηλαδή θέλουμε απλά να μελετήσουμε τη συμπεριφορά μιας παραμέτρου συγκρίνοντας δύο δισδιάστατα μοντέλα.

Στο Σχήμα 2.3.1 απεικονίζεται το πλέγμα (mesh) ενός εξομοιωμένου συντονιστή Helmholtz σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων [2.3.1]. Οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων είναι τέτοιες, ώστε το μοντέλο να μπορεί να υπολογίσει στο ακουστικό πεδίο συχνότητες έως και 700Hz.

Σχήμα 2.3.1 Το πλέγμα (mesh) ενός εξομοιωμένου συντονιστή Helmholtz σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων.

Στο παραπάνω μοντέλο, τα όρια της περιοχής μέσα στην οποία θα μελετηθεί το ακουστικό πεδίο είναι πλήρως απορροφητικά, εξομοιώνοντας με αυτό τον τρόπο το ελεύθερο πεδίο. Η θερμοκρασία ορίστηκε στους 27°C, η πυκνότητα του αέρα στα 1.24 kg/m³ και το υλικό του συντονιστή ξύλο (σύννηθες υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή διάτρητων επιφανειών) πυκνότητας 1500 kg/m³. Μια σημειακή παντοκατευθυντική πηγή, η οποία διεγείρει το σύστημα με διακριτά ημίτονα από 20-700Hz με βήμα 1Hz, τοποθετήθηκε σε απόσταση 2m από το στόμιο του συντονιστή. Ο τελευταίος έχει γεωμετρικά χαρακτηριστικά: $V_{HR} = 0.0008 \text{ m}^3$, $L_{HR} = 0.0951 \text{ m}$ και $S_{HR} = 0.0025 \text{ m}^2$. Στο Σχήμα 2.3.2 απεικονίζεται η συχνотική απόκριση του συστήματος σε απόσταση 1m από το στόμιο του συντονιστή. Είναι εμφανές στο σχήμα, πως ο συντονιστής απορροφά την ακουστική ενέργεια στο μακρινό του πεδίο στη συχνότητα συντονισμού (σε αυτή την περίπτωση $f_0=313\text{Hz}$) και την ενισχύει σε γειτονική συχνότητα.

Σχήμα 2.3.2 Αποτέλεσμα πεπερασμένων στοιχείων, η συχνотική απόκριση ενός συντονιστή Helmholtz.

2.4 Μελέτη της κλίσης των ηχοπετασμάτων με πεπερασμένα στοιχεία

Ένα από τα βασικά προβλήματα των αυτοκινητοδρόμων είναι ο θόρυβος που προέρχεται από διερχόμενα αυτοκίνητα και κυρίως τα μεγάλης ιπποδύναμης φορτηγά. Η κατασκευή ήσυχων δρόμων, που ακόμη βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, καθώς και η κατασκευή ηχοφραγμάτων αποτελεί δύο από τους σπουδαιότερους τρόπους μείωσης του δημιουργούμενου θορύβου. Η ύπαρξη παραλλήλων ηχοπετασμάτων μειώνει μεν τον θόρυβο σε περιοχές εκτός του δρόμου, αλλά αυξάνει την στάθμη θορύβου στον δρόμο λόγω των διαδοχικών ανακλάσεων σ αυτά (φαινόμενο σήραγγας), και για τον λόγο αυτό μελετήθηκε η επίδραση την κλίσης των ηχοπετασμάτων στον συνιστάμενο θόρυβο. Ένα βασικό πρόβλημα είναι η απόδοση των φραγμάτων που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Μερικοί από αυτούς είναι: το ύψος, το πάχος, γενικότερα η γεωμετρία τους καθώς και η διαμόρφωση του περιβάλλοντα χώρου. Η βασικότερη αιτία που μειώνει την απόδοση των φραγμάτων είναι το φαινόμενο της περίθλασης από την πάνω πλευρά του φράγματος. Γενικά, υπάρχουν τρεις τρόποι υπολογισμού της απόδοσης των φραγμάτων:

1. με μετρήσεις στο φυσικό τους περιβάλλον ή με μετρήσεις σε μοντέλα υπό κλίμακα,
2. με την βοήθεια αναλυτικών τύπων και
3. με την βοήθεια αριθμητικών μεθόδων.

Κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα, τα οποία μπορούν με ικανοποιητική προσέγγιση να υπολογίσουν την ηχομείωση από τα φράγματα. Για παράδειγμα στην Ε.Ε. και ειδικότερα στο πρόγραμμα HARMONOISE, προτείνεται η χρήση του μοντέλου των Defrance και Gabilet, το οποίο όμως δεν λαμβάνει υπόψη άλλους παράγοντες εκτός από το ύψος του φράγματος (Harmonoise WP 3 2005) [2.4.1]. Επί προσθέτως, άλλα μοντέλα προσδιορίζουν με την μορφή διορθωτικών όρων την επίδραση άλλων παραμέτρων, όπως το πάχος του φράγματος, την επίδραση του εδάφους την διαμόρφωση του άνω ορίου του φράγματος καθώς και την απορρόφηση του ήχου από αυτά. Σε αυτό το κεφάλαιο (2.4) εξετάζεται η επίδραση της κλίσης με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) [2.4.2], καθώς και η επίδραση των διάτρητων επιφανειών στην ηχομόνωση που προσφέρουν τα ηχοπετάσματα. Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Comsol Multiphysics [2.3.1].

Εξισώσεις μοντέλου

Η διάδοση ηχητικών κυμάτων μικρού πλάτους σε ομογενές μέσο περιγράφεται από την κυματική εξίσωση που μπορεί να γραφεί με την γενική μορφή:

$$\Delta p(x,t) - c^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} p(x,t) = -\rho \frac{\partial}{\partial t} \gamma(x,t) \quad x \in \Omega, \quad t \geq 0 \quad (2.4.1)$$

Η ποσότητα $\gamma(x,t)$ δηλώνει την πυκνότητα των ηχητικών πηγών στο εσωτερικό του χωρίου Ω .

Αν λάβουμε υπόψη την εξάρτηση από την συχνότητα και την συμβολή των κυμάτων από τις ανακλάσεις καταλήγουμε στην εξίσωση του Helmholtz:

$$(\Delta + \kappa^2) \hat{p}(x) = i\rho c \kappa \hat{\gamma}(x) \quad (2.4.2)$$

Όπου κ η ακουστική αγωγιμότητα και $\hat{p}$, $\hat{\gamma}$ τα ανεξάρτητα του χρόνου εύρη.

Υποθέτοντας ομογενείς αρχικές συνθήκες (δηλαδή ηρεμία του μέσου σε πρωθύστερες χρονικές στιγμές του ακουστικού πεδίου), ο καθορισμός της κατανομής του ήχου σε μία περιοχή Ω , εσωτερικά ή εξωτερικά μιας συνοριακής επιφάνειας Γ ικανοποιεί τις παρακάτω συνοριακές συνθήκες στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας αντίστοιχα:

$$\frac{\partial}{\partial n_x} p(x,t) = q(x,t) = \tilde{q}(x,t), x \in \Gamma, t \geq 0 \quad (2.4.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial n_x} p(x) = q(x) = \tilde{q}(x), x \in \Gamma \quad (2.4.4)$$

Οι συνθήκες αυτές περιγράφουν και την περίπτωση της σκέδασης από σκληρές επιφάνειες καθώς και την ηχητική ακτινοβολία από επιφάνειες με γνωστή κατανομή ταχύτητας. Οι επιφάνειες με απορρόφηση χαρακτηρίζονται από την συνθήκη του Robin στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας αντίστοιχα:

$$q(x,t) = -\frac{1}{c} \left[\frac{1-a_r(x)}{1+a_r(x)} \right] \frac{\partial}{\partial t} p(x,t) = -A \frac{\partial}{\partial t} p(x,t) \quad (2.4.5)$$

$$\tilde{q}(x) = A(x) i \omega \tilde{p}(x) \quad (2.4.6)$$

Όπου $a_r(x)$ ο συντελεστής ανάκλασης της επιφάνειας και $A(x)$ το φανταστικό μέρος της ακουστικής της εμπέδησης.

Ξεκινώντας από την ολοκληρωτική εξίσωση του Kirchhoff και χρησιμοποιώντας την μέθοδο των υπολοίπων, οι δισδιάστατες ολοκληροδιαφορικές εξισώσεις στο πεδίο του χρόνου μπορούν να γραφούν με την μορφή:

$$d\xi p(\xi,t) - \int_0^t \oint_{\Gamma} \frac{\partial r}{\partial n} \frac{c}{2\pi R} H(t' - \frac{r}{c}) \left[\frac{1}{c} \dot{p}(x,\tau) + \frac{1}{ct' + r} p(x,\tau) \right] d\Gamma_x d\tau =$$

$$\int_0^t \left\{ \oint_{\Gamma} \frac{c}{2\pi R} H(t' - \frac{r}{c}) q(x,t) d\Gamma_x + \rho \int_{\Omega} \dot{\gamma}(x,\tau) \frac{c}{2\pi R} H(t' - \frac{r}{c}) d\Omega_x \right\} d\tau \quad (2.4.7)$$

Όπου ο συντελεστής βήματος $d\xi$ έχει τις τιμές 1 και 0.5 για τα σημεία ξ στο εσωτερικό της Ω και στο σύνορο Γ αντίστοιχα.

Για σημειακές πηγές στην θέση x' με $R_l = \sqrt{c^2 t'^2 - |x' - \xi|^2}$ ισχύει

$$\int_0^t \rho \int_{\Omega} \dot{\gamma}(x,\tau) \frac{c}{2\pi R} H(t' - \frac{r}{c}) d\Omega_x d\tau = \int_0^t \rho \sum_{l=1}^L \dot{g}_l(\tau) \frac{c}{2\pi R_l} H(\frac{x' - \xi}{c}) d\tau \quad (2.4.8)$$

Όπου H είναι η βηματική συνάρτηση του Heaviside.

Σε δύο διαστάσεις κατά μήκος κάθε συνοριακού στοιχείου Γ^e η πίεση δίνεται από:

$$p(x,\tau) = \frac{1}{\Delta t} \left[(t_{m+1} - \tau) p^{em} + (\tau - t_m) p^{em+1} \right], \quad q(x,\tau) = q^{em+1}, \quad x \in \Gamma^e \quad (2.4.9)$$

Όπου Δt το χρονικό διάστημα του βήματος $[t_m, t_{m+1}]$.

Στο πεδίο της συχνότητας η διαφορική εξίσωση του προβλήματος προκύπτει από την εφαρμογή του θεωρήματος του Betti και η εξίσωση (3) στο πεδίο της συχνότητας καταλήγει στην μορφή:

$$d(\xi) \tilde{p}(\xi) = \oint_{\Gamma} \left[\tilde{q}(x) \tilde{p}^*(x, \xi; \kappa) - \tilde{p}(x) \tilde{q}^*(x, \xi; \kappa) \right] d\Gamma_x - \rho i c \kappa \int_{\Omega} \tilde{\gamma}(x) \tilde{p}^*(x, \xi; \kappa) d\Omega_x \quad (2.4.10)$$

Η γενική λύση και η πρώτη παράγωγος $\tilde{q}^*(x, \xi; \kappa)$ δίνεται από τις σχέσεις:

$$p^* = \frac{1}{2\pi} K_0(i\kappa r) \quad (2.4.11)$$

και

$$q^* = \frac{i\kappa}{2\pi} K_1(i\kappa r) \frac{\partial r}{\partial n} \quad (2.4.12)$$

Όπου K_0 και K_1 οι συναρτήσεις Bessel δευτέρου τύπου μηδενικής και πρώτης τάξης αντίστοιχα.

Περιγραφή του μοντέλου

Στο παρακάτω σχήμα (2.4.1) φαίνεται το δισδιάστατο μοντέλο εξομοίωσης, το οποίο αποτελείται από δύο ηχοφράγματα τοποθετημένα παράλληλα σε κάθε πλευρά του δρόμου. Τα ηχοφράγματα επεκτείνονται και μέσα στο έδαφος για τον περιορισμό της διάδοσης του ήχου μέσα από αυτό. Τα πλευρικά όρια που καθορίζουν την περιοχή μελέτης του μοντέλου θεωρήθηκαν πλήρως απορροφητικά, εξομοιώνοντας έτσι το ελεύθερο πεδίο που υπάρχει γύρω από την διάταξη των ηχοπετασμάτων. Για το μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν τρία υλικά. Ο δρόμος (πλάτους 10 μέτρων) και γενικότερα το υπέδαφος θεωρήθηκε ότι είναι από τσιμέντο. Τα ηχοφράγματα, ύψους 4 μέτρων το κάθε ένα, επεκτείνεται σε ίσο βάθος μέσα στο έδαφος. Το υλικό των ηχοφραγμάτων θεωρήθηκε το plexiglass συνολικού πάχους 10 εκατοστών. Ο αέρας στο μοντέλο αντιστοιχεί σε πίεση 1atm θερμοκρασία 27°C και πυκνότητα 1,25 kg/m³. Η πηγή βρίσκεται στο γεωμετρικό μέσο της απόστασης των φραγμάτων και σε ύψος 0.5 μέτρα από το έδαφος και συμπίπτει με την αρχή του άξονα των x. Ο υπολογισμός της στάθμης πίεσης έγινε για τις συχνότητες 125, 250, 500 και 1000 Hz. Για τον υπολογισμό των τιμών ώστε να σχεδιαστούν οι γραφικές του σχήματος 2.4.3 έχει υπολογιστεί η στάθμη πίεσης του ήχου σε dB κατά μήκος της ευθείας (στο σχήμα 2.4.1 σημειώνεται με κόκκινο χρώμα) που απεικονίζεται στο σχήμα 2.4.1 με τους δέκτες να βρίσκονται σε μεταξύ τους απόσταση 0.01 μέτρα (από το σημείο x=0 έως x=15 μέτρα). Λόγω της συμμετρίας του προβλήματος δεν έγινε γραφική παράσταση για αρνητικές τιμές του άξονα των x. Θεωρήθηκε όμως απαραίτητο να σχεδιαστούν δύο ηχοφράγματα στο μοντέλο, διότι, λόγω των ανακλάσεων στις δύο επιφάνειες των φραγμάτων, δημιουργούνται φαινόμενα συμβολής ηχητικών κυμάτων, γεγονός που έχει σαν συνέπεια την αύξηση της στάθμης στην περιοχή του δρόμου μεταξύ των δύο φραγμάτων. Οι υπολογισμοί έγιναν τόσο για θετικές όσο και για αρνητικές κλίσεις των φραγμάτων.

Σχήμα 2.4.1 Το μοντέλο εξομοίωσης όπου απεικονίζεται η θετική γωνία στρέψης των ηχοπετασμάτων, η πηγή και η ευθεία πάνω στην οποία βρίσκονται οι δέκτες.

Αποτελέσματα

Στο σχήμα 2.4.2 φαίνεται η κατανομή της ακουστικής πίεσης στο χώρο (ακουστικό πεδίο) για τις δυο ακραίες κλίσεις των ηχοφραγμάτων +20° (2.4.2α) και -20° (2.4.2β) που έχουν μελετηθεί, με την πηγή να εκπέμπει τόνους συχνότητας 125, 250, 500 και 1000Hz.

Σχήμα 2.4.2 Η κατανομή της ακουστικής πίεσης στο χώρο στα 125, 250, 500 και 1000Hz για τις δυο ακραίες κλίσεις των ηχοφραγμάτων : $\alpha.$ $+20^\circ$ και $\beta.$ -20° .

Σχήμα 2.4.3 Στάθμη της ακουστικής πίεσης σε σχέση με την απόσταση όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.4.1 για **α.** 125Hz **β.** 250Hz **γ.** 500Hz **δ.** 1000Hz.

Από τις παραπάνω γραφικές φαίνεται πως το ηχοπέτασμα λειτουργεί καλύτερα σε υψηλές συχνότητες. Αυτό ήταν αναμενόμενο, λόγω του ότι το φαινόμενο της περίθλασης εκφυλίζεται σε μεγάλες συχνότητες εφ' όσον το μήκος κύματος του ήχου γίνεται σημαντικά μικρότερο από τα περιθλώντα πετάσματα). Ακόμη, παρατηρούμε πως η θετική κλίση των ηχοπετασμάτων λειτουργεί καλύτερα στις χαμηλές συχνότητες παρά στις υψηλές, που όπως φαίνεται, η αρνητική κλίση των τελευταίων λειτουργεί καλύτερα. Τα μέγιστα και τα ελάχιστα που παρατηρούνται σε όλες τις γραφικές είναι λόγω της συχνότητας εκπομπής της πηγής. Γι αυτό ακριβώς σε υψηλότερες συχνότητες -όπως του σχήματος 2.4.3δ, στα 1000Hz- η συχνότητα εμφάνισης των μεγίστων και ελαχίστων είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις χαμηλότερες συχνότητες -όπως του σχήματος 2.4.3α, στα 125Hz-.

2.5 Μελέτη της εφαρμογής διάτρητης επιφάνειας σε τούνελ με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων

Το πρόβλημα της δημιουργίας υψηλής στάθμης θορύβου από κινούμενα αυτοκίνητα είναι μεγάλο και απασχολεί εδώ και αρκετά χρόνια την επιστημονική κοινότητα. Αρχικά, όλες οι προσπάθειες μείωσης του θορύβου των οχημάτων ήταν προς την κατεύθυνση της μείωσης του θορύβου ο οποίος προέρχεται από το ίδιο το αυτοκίνητο με την κατασκευή ήσυχων μηχανών. Η προσπάθεια αυτή είχε θεαματικά αποτελέσματα. Ωστόσο λόγω των υψηλών ταχυτήτων που κυριαρχούν στους αυτοκινητοδρόμους, το πρόβλημα παραμένει, διότι σε υψηλές ταχύτητες η κυρίαρχη πηγή του θορύβου είναι το σημείο επαφής των ελαστικών με το έδαφος. Οι προσπάθειες των κατασκευαστών έχει στραφεί στην

κατασκευή "ήσυχων δρόμων" με απορροφητικό ασφαλτοτάπητα. Η κατάσταση αυτή είναι ιδιαίτερα προβληματική μέσα στα τούνελ, όπου λόγω των διαδοχικών ανακλάσεων του ήχου στα τοιχώματά τους ενισχύεται η ηχητική στάθμη δραματικά. Ένας καλός τρόπος περιορισμού του προβλήματος είναι η επένδυση των εσωτερικών τοιχωμάτων των τούνελ με απορροφητικά υλικά.

Σε αυτό το κεφάλαιο (2.5) με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων εξετάζεται η επίδραση της απορρόφησης του θορύβου στα τούνελ [2.5.1]. Ως απορροφητικά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν διάτρητες επιφάνειες. Για τις ανάγκες της μελέτης αυτής σχεδιάστηκαν σε περιβάλλον Comsol Multiphysics [2.3.1] διδιάστατα μοντέλα αυτοκινήτου σε ανοικτό αυτοκινητόδρομο και τούνελ με τα ίδια χαρακτηριστικά του ασφαλτοτάπητα. Αρχικά, έγινε σύγκριση της στάθμης θορύβου που δημιουργείται μέσα στο αυτοκίνητο, όταν αυτό κινείται σε ανοικτό αυτοκινητόδρομο (αυτοκινητόδρομος σε ελεύθερο πεδίο) και σε κλειστό τούνελ. Επίσης, έγιναν δύο διαφορετικοί υπολογισμοί για το ενδεχόμενο το αυτοκίνητο να έχει ανοικτά ή κλειστά παράθυρα.

Μοντέλο πηγής

Κατά την κίνηση ενός αυτοκινήτου σε αυτοκινητόδρομο, οι πηγές εκπομπής θορύβου από αυτό είναι η μηχανή ή εξάτμιση και ο θόρυβος των ελαστικών. Το σχήμα 2.5.1 δείχνει σύμφωνα με το project Harmonoise της Ε.Ε. τον εκπεμπόμενο θόρυβο από τις τρεις πηγές θορύβου συναρτήσει της ταχύτητας του οχήματος για δύο τύπους οχημάτων: Οχήματα με μηχανές diesel και σπορ αυτοκίνητα [2.4.1]. Στο σχήμα με μπλε χρώμα σημειώνεται ο εκπεμπόμενος θόρυβος από την μηχανή, με πράσινο από τα ελαστικά και με κόκκινο ο θόρυβος από την εξάτμιση. Όπως φαίνεται από το σχήμα, για ταχύτητες μεγαλύτερες από 50 Km/h ο θόρυβος από τα ελαστικά κυριαρχεί, έτσι σε συνήθεις ταχύτητες σε τούνελ (80-120 Km/h) μπορούμε να θεωρήσουμε τις άλλες πηγές αμελητέες.

Σχήμα 2.5.1 Θόρυβος από τις τρεις πηγές θορύβου συναρτήσει της ταχύτητας του οχήματος για δύο τύπους οχημάτων, με πράσινο ο θόρυβος από τα ελαστικά, με μπλε από τη μηχανή και με κόκκινο από την εξάτμιση: **α.** για αυτοκίνητο με diesel μηχανή και **β.** για σπορ αυτοκίνητο

Στο μοντέλο FEM, για την παραγωγή ήχου χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 6 πηγές: 3 πηγές (μονοπολικές) για κάθε τροχό του αυτοκινήτου, οι οποίες τοποθετήθηκαν μία στο κέντρο και δύο στα άκρα της επαφής του ελαστικού με την άσφαλτο (σχήμα 2.5.2). Οι έξι πηγές θεωρήθηκε ότι είναι ισότροπες και ότι εκπέμπουν διακριτά ημίτονα από 20Hz έως 500Hz με βήμα των 5Hz ανά μέτρηση.

Σχήμα 2.5.2 Όψη του μοντέλου του αυτοκινήτου στο δρόμο με τις θέσεις των πηγών και του δέκτη.

Μοντέλο τούνελ

Ως μοντέλο για την εργασία σχεδιάστηκε ένα τούνελ από τσιμέντο πάχους $S_4 = 2.7\text{m}$. Το τούνελ- ημικυλινδρικού σχήματος σε 3 διαστάσεις- που σχεδιάστηκε (σε 2 διαστάσεις) είναι ημικυκλικό με ύψος 12.15m και περιβάλλει ένα αυτοκινητόδρομο πλάτους $S_1 = 24.3\text{m}$ (σχήμα 2.5.3). Το τούνελ εξετάστηκε σε δύο καταστάσεις: μία με γυμνό μπετόν και μία με καλυμμένη την εσωτερική επιφάνεια απορροφητή, τύπου συντονιστή.

Σχήμα 2.5.3 Γεωμετρία του FEM μοντέλου αυτοκίνητο - τούνελ - ηχοαπορροφητική επιφάνεια από διάτρητο υλικό (στο επάνω μέρος φαίνεται λεπτομέρεια της διάτρησης).

Μοντέλο αυτοκινήτου

Ως αυτοκίνητο σχεδιάστηκε ένα όχημα πλάτους $S_2 = 1.7\text{m}$ και ύψους $S_3 = 1.4\text{m}$, τοποθετημένο στον άξονα του δρόμου (σχήμα 2.5.3). Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εξομοίωση του αυτοκινήτου είναι αλουμίνιο για το αμάξωμα, γυαλί για τα τζάμια και ελαστικό (rubber) για τα λάστιχα. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν δύο καταστάσεις αυτοκινήτου: Μία με ανοικτά παράθυρα και μία με κλειστά. Η ταχύτητα του αυτοκινήτου θεωρήθηκε ότι είναι μεγαλύτερη $>100\text{ Km/h}$, έτσι ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη της κυρίαρχης πηγής θορύβου που είναι τα ελαστικά.

Μοντέλο απορροφητικής επιφάνειας

Ως απορροφητική επιφάνεια σχεδιάστηκε μια διάτρητη ημικυκλική επιφάνεια που αποτελεί μια συνήθη μορφή απορροφητών που χρησιμοποιούνται σε εξωτερικούς χώρους. Για να είναι δυνατή η σύγκριση των μετρήσεων με και χωρίς τη διάτρητη επιφάνεια, το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη διάτρητη επιφάνεια θεωρήθηκε ότι έχει επικάλυψη από τσιμέντο με πάχος $S_6 = 0.05\text{m}$. Η απόστασή του από τον τοίχο θεωρήθηκε ότι είναι $S_7 = 0.2\text{m}$ και η διάτρηση της επιφάνειας έγινε από σπές με διάμετρο $S_5 = 0.02\text{m}$, που αντιστοιχεί σε ποσοστό διάτρησης 39.27% όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.3.

Αποτελέσματα

Σχήμα 2.5.4 Εξομοιωμένο μοντέλο αυτοκινήτου στο οδόστρωμα με τη μέθοδο FEM (οι πηγές εκπέμπουν ημίτονα 300Hz) **α.** σε ελεύθερο πεδίο **β.** σε τούνελ.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προκύπτει ότι η ύπαρξη απορροφητή τύπου συντονιστή στην εσωτερική επιφάνεια των τούνελ μειώνει σημαντικά την στάθμη θορύβου εντός των διερχόμενων αυτοκινήτων. Η μείωση αυτή δεν είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση που τα αυτοκίνητα κινούνται με ανοικτά παράθυρα. Στο σχήμα 2.5.5 απεικονίζονται συγκριτικά οι στάθμες για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Σχήμα 2.5.5 Σύγκριση τιμών των υπολογισμένων σταθμών θορύβου (dB) σε ανοικτούς δρόμους, σε τούνελ και τούνελ με διάτρητη επιφάνεια.

2.6 Εξομοίωση σε δύο διαστάσεις και μελέτη παραμέτρων των διάτρητων επιφανειών με μεμβράνη

Η διάτρητη επιφάνεια χρησιμοποιείται πολύ συχνά για τη βελτίωση της ακουστικής χώρων. Σε αρκετές δε περιπτώσεις, τοποθετείτε και σε απορροφητές τύπου μεμβράνης. Τα απορροφητικά τύπου μεμβράνης είναι και αυτά ένα είδος συντονιστών που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες με πολύ ευρεία καμπύλη συντονισμού. Για να μελετηθεί η συμπεριφορά ενός μικτού απορροφητή, τύπου μεμβράνης και διάτρητης επιφάνειας, σχεδιάστηκε (σε δύο διαστάσεις) ένα μοντέλο -σε πεπερασμένα στοιχεία- το οποίο αποτελείται από μια επιφάνεια απορροφητή τύπου μεμβράνης με απορροφητή τύπου συντονιστή κάτω από την μεμβράνη (σχήμα 2.6.1).

Σχήμα 2.6.1 Γεωμετρία του δισδιάστατου μοντέλου απορροφητή μεμβράνης.

Στο σχήμα 2.6.1, r_1 και r_2 είναι οι αποστάσεις του δέκτη και της πηγής από τη διάτρητη επιφάνεια αντίστοιχα, S_p και S_{HR} η επιφάνεια του απορροφητή και η επιφάνεια του στομίου του συντονιστή, όπου στη δισδιάστατη εξομοίωση εκφράζονται σε m και όχι σε m², τέλος, όπου h_1 και h_2 οι αποστάσεις της μεμβράνης από τη διάτρητη επιφάνεια και της διάτρητης επιφάνειας από τον τοίχο αντίστοιχα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων επτά μοντέλων, τα οποία εξομοιώθηκαν σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων [2.3.1]. Σε όλες τις περιπτώσεις, η πηγή και ο δέκτης βρίσκονται στην ίδια απόσταση από την επιφάνεια. Η πηγή εκπέμπει διακριτά ημίτονα από 20Hz ως 100Hz με βήμα 1Hz. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εξομοίωση είναι πανί για τη μεμβράνη, ξύλο για τη διάτρητη επιφάνεια και τούβλο για τον τοίχο από τη βιβλιοθήκη του Comsol Multiphysics [2.3.1]. Το δισδιάστατο μοντέλο θεωρήθηκε ότι βρίσκεται σε κυκλική περιοχή, η οποία στο εσωτερικό της έχει ως υλικό αέρα στους 27°C και με πλήρως απορροφητικά όρια (εξομοιώνοντας το ελεύθερο πεδίο).

model	S (m)	h_1 (m)	h_2 (m)	D (m)	μεμβράνη	r_1 (m)	r_2 (m)	διάτρητη επιφάνεια
1 st	2	0.18	0.18	0.005	ναι	0.33	3.83	ναι
2 nd	2	0.18	0.18	0.095	ναι	0.33	3.83	ναι
3 rd	2	0.11	0.11	0.005	ναι	0.33	3.83	ναι
4 th	2	-	-	-	ναι	0.33	3.83	όχι
5 th	2	0.18	0.18	-	ναι	0.33	3.83	όχι
6 th	2	0	0.36	0.005	ναι	0.33	3.83	ναι
7 th	2	0	0.36	0.005	όχι	0.33	3.83	ναι

Πίνακας 2.6.1 Γεωμετρία των επτά εξομοιωμένων μοντέλων.

Στο σχήμα 2.6.2 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μοντέλων στο πεδίο της συχνότητας. Βλέπουμε, λοιπόν, πως η συχνότητα απορρόφησης του 1^{ου}, 2^{ου} και 5^{ου} μοντέλου είναι παραπλήσια - κοντά στα 50Hz- όμως παρατηρώντας προσεκτικά το συχνотικό εύρος της απορρόφησης το 1^ο μοντέλο έχει λίγο μικρότερο παράγοντα ποιότητας (Q). Έτσι, προκύπτει ότι με την παρουσία μεμβράνης πάνω από τη διάτρητη επιφάνεια, δεν επιδρά ουσιαστικά στην διάτρητη επιφάνεια όσον αφορά τη συχνότητα συντονισμού, όμως, μπορεί να μεταβάλλει τον παράγοντα ποιότητας (Q) του συστήματος. Το 3^ο μοντέλο, όπως ήταν αναμενόμενο, έχει υψηλότερη συχνότητα απορρόφησης λόγω του μικρότερου του όγκου. Το 4^ο μοντέλο (μόνο μεμβράνη), δεν παρουσιάζει συντονισμό στην περιοχή συχνοτήτων που μελετήθηκε (20-100 Hz). Στο 6^ο μοντέλο, όπου η διάτρητη επιφάνεια εφάπτεται στη μεμβράνη, δεν παρατηρείται συντονισμός. Σε αντίθεση το μοντέλο 7, που έχει ακριβώς τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, αλλά δεν έχει μεμβράνη, παρουσιάζει συντονισμό (80Hz) και μάλιστα σε υψηλότερη συχνότητα από τα υπόλοιπα μοντέλα και με αρκετά μικρότερο παράγοντα ποιότητας (Q) [2.6.1].

Σχήμα 2.6.2 Συχνотική απόκριση των μοντέλων του πίνακα 2.6.1.

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.6.3) απεικονίζεται το ακουστικό πεδίο του πρώτου μοντέλου του Πίνακα 2.6.1, σε τρεις διαφορετικές συχνότητες εκπομπής της πηγής. Στη δεύτερη φάση η πηγή εκπέμπει ημίτονο 50Hz που είναι και η συχνότητα συντονισμού (f_0) της διάτρητης επιφάνειας. Έτσι παρατηρούμε μείωση της ακουστικής ενέργειας στο πεδίο (2^η φάση), ενώ στις δύο άλλες φάσεις (1^η και 3^η φάση), όπου η πηγή εκπέμπει ημίτονα τα οποία βρίσκονται συχνотικά μακριά από τη συχνότητα συντονισμού της διάτρητης επιφάνειας, η ακουστική ενέργεια έχει υψηλές τιμές.

Σχήμα 2.6.3 Ακουστικό πεδίο του 1^{ου} μοντέλου για διέγερση σε τρεις διαφορετικές συχνότητες.

2.7 Εξομοίωση διάτρητης επιφάνειας σε τρεις διαστάσεις

Στο Σχήμα 2.7.1 απεικονίζεται η εξομοίωση μιας διάτρητης επιφάνειας, σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων και σε τρεις διαστάσεις, με 64 (8x8) κυκλικού τύπου διατρήσεις ακτίνας 0.0015m, οι οποίες βρίσκονται σε μεταξύ τους απόσταση 0.08m. Οι διαστάσεις της είναι $x=0.57\text{m}$, $y=0.57\text{m}$, $z=0.205\text{m}$ και το πάχος της 0.01m. Η πηγή, θεωρήθηκε σε απόσταση 0.5m από τη διάτρητη επιφάνεια και εκτός άξονα κατά 0.2m, εκπέμπει διακριτά ημίτονα από 20-200Hz με βήμα 0.5Hz. Είναι σημαντικό το βήμα κατά την επίλυση να είναι σχετικά μικρό διότι, όπως ήδη έχει αναφερθεί στο 1^ο κεφάλαιο (βλ. σχήμα 1.3.3), ο συντονιστής Helmholtz λειτουργεί στη συχνότητα συντονισμού του και σε μια στενή συχνοτική περιοχή γύρω από αυτή. Έτσι εάν το βήμα γίνει μεγαλύτερο είναι πολύ πιθανό τα αποτελέσματα της εξομοίωσης να είναι λάθος, καθώς μπορεί να προσπεραστεί η συχνοτική περιοχή της λειτουργίας του συντονιστή ή της διάτρητης επιφάνειας. Ακόμη ο χώρος που πραγματοποιήθηκε η επίλυση του μοντέλου είναι μια σφαίρα ακτίνας 1.5m, της οποίας το όριο είναι πλήρως απορροφητικό (εξομοιώνοντας το ελεύθερο πεδίο) και στο εσωτερικό της περιέχει αέρα σε θερμοκρασία 27°C. Το υλικό της διάτρητης επιφάνειας θεωρήθηκε ότι είναι ξύλο του οποίου οι ιδιότητες ελήφθησαν από την βιβλιοθήκη υλικών του Comsol Multiphysics [2.3.1].

Σχήμα 2.7.1 Μοντέλο διάτρητης επιφάνειας (8x8) σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η απόκριση συχνότητας του μοντέλου σε δύο διαφορετικά σημεία ένα στο κοντινό και ένα στο μακρινό πεδίο. Στο σχήμα 2.7.2α, (ο δέκτης βρίσκεται στο μακρινό πεδίο) σε κατακόρυφη απόσταση 2m από την επιφάνεια με καρτεσιανές συντεταγμένες $x=0, y=1, z=2$, ενώ στο σχήμα 2.7.2β (ο δέκτης βρίσκεται στο κοντινό πεδίο) εφάπτεται στην επιφάνεια ($x=0, y=0, z=0$). Παρατηρούμε, λοιπόν, από τις γραφικές παραστάσεις, κάτι το οποίο είναι ήδη γνωστό και έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 1 [2.7.1-2.7.4], ότι δηλαδή στο μακρινό πεδίο της διάτρητης επιφάνειας κυριαρχεί η απορρόφηση ενώ στο κοντινό η ενίσχυση.

α.

β.

Σχήμα 2.7.2 Απόκριση συχνότητας της εξομοιωμένης διάτρητης επιφάνειας
α. στο μακρινό πεδίο β. στο κοντινό πεδίο.

Στο επόμενο μοντέλο έγινε μια σύγκριση της συχνότητας συντονισμού (f_0) και της απορρόφησης του ήχου στο ακουστικό πεδίο από μοντέλα διάτρητων επιφανειών [2.7.5]. Για την εξομοίωση των μοντέλων αυτών οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν όπως οι διαστάσεις της επιφάνειας, τα υλικά, η θερμοκρασία, το περίβλημα της σφαίρας, η θέση της πηγής και του δέκτη είναι όμοιοι με το προηγούμενο μοντέλο. Να επισημανθεί εδώ πως το βήμα, με το οποίο η πηγή εκπέμπει τα διακριτά ημίτονα, είναι της τάξης των 0.5Hz - όπως και στο προηγούμενο μοντέλο. Το βήμα αυτό, για να μελετηθεί σωστά η συχνότητα συντονισμού και η απορρόφηση που δημιουργεί η διάτρητη επιφάνεια στο πεδίο, είναι οριακά αποδεκτό λόγω της πολύ στενής περιοχής απορρόφησης της διάτρητης επιφάνειας. Όμως, για την επίλυση του καθενός από αυτά τα μοντέλα ένας σύγχρονος υπολογιστής χρειάζεται 12 ώρες και εάν το βήμα ήταν 0.1Hz τότε, όπως αναφέρεται και στο 4^ο κεφάλαιο (βλ. πίνακας 4.3.2), ο χρόνος για την επίλυση θα ήταν 2 ημέρες.

Έτσι, λοιπόν, μελετήθηκε το μοντέλο που απεικονίζεται στο σχήμα 2.7.1 με μεταβλητό, όμως, όγκο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.7.3. Επιλύθηκαν 6 διαφορετικά μοντέλα διάτρητων επιφανειών, όπου ο όγκος τους μεταβάλλονταν, καθώς ανυψώνονταν η πλάτη με βήμα 0.02m, μικραίνοντας έτσι τον διαθέσιμο όγκο, για κάθε συντονιστή. Στο σχήμα 2.7.4 απεικονίζεται το ακουστικό πεδίο της διάτρητης επιφάνειας για συχνότητα εκπομπής της πηγής 100Hz. Στην γραφική παράσταση του σχήματος 2.7.5 απεικονίζονται οι αποκρίσεις συχνότητας στο σημείο του δέκτη (με καρτεσιανές συντεταγμένες: $x=0, y=1, z=2$) για το κάθε μοντέλο. Όπως ήταν αναμενόμενο όσο μειώνεται ο όγκος, τόσο η συχνότητα συντονισμού μεγαλώνει κι έτσι ενώ στο πρώτο μοντέλο, με το μεγαλύτερο όγκο (μαύρη συνεχής γραμμή), η συχνότητα συντονισμού είναι περίπου 117Hz, στο μοντέλο με το μικρότερο όγκο (λαδή γραμμή με τελείες) είναι 150Hz.

Σχήμα 2.7.3 Τρισδιάστατα μοντέλα της διάτρητης επιφάνειας με μεταβλητό όγκο, σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων.

Σχήμα 2.7.4 Ακουστικό πεδίο σε συχνότητα 100Hz της διάτρητης επιφάνειας (επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία).

Σχήμα 2.7.5 Συχνотική απόκριση μοντέλου (διάτρητης επιφάνειας).

Σχήμα 2.7.6 Η συχνότητα συντονισμού της διάτρητης επιφάνειας με μεταβλητό όγκο όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5.3.

Βιβλιογραφία:

- [2.2.1] D. Givoli και B. Neta, *"High-order non-reflecting boundary scheme for time-dependent waves"*, J. Comput. Phys., vol. 186, 2004.
- [2.2.2] A. Bayliss, M. Gunzburger και E. Turkel, *"Boundary Conditions for the Numerical Solution of Elliptic Equations in Exterior Regions"*, SIAM J. Appl. Math., vol. 42, no. 2, 1982.
- [2.3.1] Comsol Multiphysics ver.3.4 acoustic module, 2009.
- [2.4.1] Harmonoise Work Package 1.1, *"Source modelling of road vehicles HAR11TR-020614-SP-05"*, Technical report, 2003.
- [2.4.2] Polychronopoulos S., Skarlatos A. και Skarlatos D. *"Βελτιστοποίηση της απόδοσης των φραγμάτων θορύβου με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων"*, Helina convention paper Xanthi, 2010.
- [2.5.1] Polychronopoulos S., Kokkinos A. και Skarlatos D., *"A FEM model of a highway tunnel to observe and propagate the noise from the vehicles"*, Helina convention paper Athens, 2010.
- [2.6.1] Polychronopoulos S., Skarlatos D. και Mourjopoulos J., *"The effect of sound source position to the frequency response of the perforated panels"*, Helina convention paper Athens, 2010.
- [2.7.1] Kuttruff H., *"Room Acoustics"*, Elsevier Applied Science third Edition, 1991.
- [2.7.2] Crighton D. G., Dowling A. P., Ffowcs Williams J. E. Heckl M., Leppington F. G., *"Modern Methods in Analytical Acoustics"*, Lecture notes Springer Verlag London, 1996.
- [2.7.3] E.Kinsler, R.Frey, B.Coppens and V.Sanders, *"Fundamentals Of Acoustics"*, third edition, Wiley, 1982.
- [2.7.4] Polychronopoulos S., Skarlatos D., and Mourjopoulos J., *"Measuring resonator panels' frequency absorption and Q factor, using Finite Elements Method"*, ICSV17, congress Cairo, 2010.

3ο Κεφάλαιο

Η συμβολή των συντονιστών στα αρχαία θέατρα: Το θέατρο της Λυττούς

3.1 Εισαγωγή

Στις Μεσογειακές χώρες, τα αρχαία ελληνορωμαϊκά θέατρα θεωρούνται πολύτιμα, λόγω της πολιτιστικής τους κληρονομιάς. Τα περισσότερα από αυτά οικοδομούνταν από υλικά που ανακλούν τον ήχο, όπως η πέτρα και το μάρμαρο. Για να ενισχύσουν και γενικότερα να βελτιώσουν την ακουστική τους χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τεχνικές και υλικά, όπως οι μάσκες των ηθοποιών και τα ακουστικά αντηχεία ή βάζα. Ακόμη ορισμένοι ερευνητές πιστεύουν πως οι κοιλότητες κάτω από τα καθίσματα των θεατών είχαν αυτή τη γεωμετρία για λόγους ακουστικής. Όπως επισημάνθηκε και στο κεφάλαιο 2.1, η πρώτη πληροφορία που έχουμε για την χρήση των ακουστικών αντηχείων προέρχεται από τον Ρωμαίο αρχιτέκτονα και μηχανικό Marcus Vitruvius Pollio, ο οποίος μας γνωστοποίησε την οικοδομική τεχνολογία της εποχής του, καθώς και των προγενέστερων εποχών, στο έργο του με τίτλο "Δέκα βιβλία για την Αρχιτεκτονική" [3.1.1]. Το έργο του αποτελεί το πρώτο γραπτό μνημείο για την κατασκευή των θεάτρων στην αρχαία Ελλάδα και την Ρωμαϊκή εποχή.

Σύμφωνα με τον Βιτρούβιο τα εν λόγω βάζα ήταν κατασκευασμένα από ορείχαλκο και έπρεπε να τοποθετηθούν στις θέσεις των θεάτρων, σε ειδικές κοιλότητες ώστε να ενισχύεται οι αρμονικές των ηχητικών σημάτων. Γι' αυτό, επεξήγησε τους συντονισμούς, τη δομή και το σωστό τρόπο τοποθέτησής τους στα θέατρα. Σύμφωνα με το Βιτρούβιο, τα "ηχεία", που είναι στην πραγματικότητα οι συντονιστές Helmholtz, τοποθετούνταν στα ελληνικά αρχαία θέατρα, ώστε, αφενός να βελτιωθεί η ακουστική τους, αφετέρου να μειωθεί το κόστος κατασκευής τους. Αναφέρει δε ακόμη, ότι κατά την εποχή του δεν υπήρχαν στη Ρώμη θέατρα που να χρησιμοποιήθηκαν τέτοια αγγεία, εν τούτοις, υπήρξαν τέτοια θέατρα σε περιοχές της Ιταλίας και σε πολυάριθμες ελληνικές πολιτείες και αναφέρει ως αξιόπιστο μάρτυρα το Λούκιο Μόμμιο, ο οποίος αφού κατέστρεψε το θέατρο των Κορινθίων, έφερε στη Ρώμη τα ορειχάλκινα αγγεία που υπήρχαν εκεί και τα αφιέρωσε ως λάφυρα πολέμου στο ναό της Σελήνης. Εκτός από τον Βιτρούβιο υπάρχουν και άλλες μαρτυρίες μεταγενέστερων ιστορικών, για την ύπαρξη αντηχείων στα αρχαία θέατρα, όπως αυτή του Onorio Belli [3.1.2].

Δυστυχώς, όμως, μέχρι μερικά χρόνια πριν σε κανένα αρχαίο θέατρο οι αρχαιολόγοι δεν ανακάλυψαν κάποιο στοιχείο που να επιβεβαιώνει τη θεωρία του Βιτρούβιου, ενδεχομένως διότι αυτά δεν ήταν ενσωματωμένα στην κατασκευή τους αλλά φορητά. Εξαίρεση αποτελεί το Ρωμαϊκό θέατρο της αρχαίας Σκυθόπολης που βρισκόταν στην σημερινή τοποθεσία Beth Sean στο Ισραήλ, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Υπάρχουν, όμως και αντιφατικές απόψεις για τη χρήση των εν λόγω αγγείων [3.1.3-3.1.7]. Ορισμένοι επιστήμονες ακουστικής, όπως για παράδειγμα ο Knudsen [3.1.3], πίστευαν ότι τα βάζα του Βιτρούβιου, δηλαδή οι συντονιστές Helmholtz, δρουν ως απορροφητές ήχου. Άλλοι είχαν την άποψη ότι χρησιμοποιούνταν για την ενίσχυση της φωνής [3.1.4]. Στο κεφάλαιο V, ο Βιτρούβιος αναφέρει ότι : "... καθώς τα θέατρα χτίζονται από στέρεα υλικά όπως λίθους, πέτρα ή μάρμαρο, που δεν μπορούν να λειτουργήσουν ως αντηχεία, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι κανόνες των ηχείων...". Σύμφωνα μ' αυτή την άποψη, θεωρούμε ότι οι συντονιστές απορροφούν τον ήχο. Άλλη μια εκδοχή είναι ότι τα βάζα

χρησιμοποιούνταν για να προσδώσουν μια τεχνητή αντήχηση στα θέατρα, εφόσον θεωρητικά οι ανοικτοί χώροι δεν έχουν. Παρ' όλ' αυτά, η αποτελεσματικότητά τους είναι αβέβαιη μέχρι και στις μέρες μας και αυτό αποτελεί ακόμη αντικείμενο έρευνας. Σύμφωνα όμως, με τις περιγραφές του Onorio Belli, "...υπήρχαν 3 σειρές από μπρούτζινα βάζα (ηχεία) ..., όπου τα ίχνη τους είναι ακόμη ορατά..." (βλέπε σχήμα 3.1.1) [3.1.2].

Σχήμα 3.1.1 Τα αγγεία στα αρχαία θέατρα σύμφωνα με τον Francesco di Martino (αριστερά) και αναπαράσταση αρχαίου θεάτρου με συντονιστές κατά τον Floriot (δεξιά).

3.2 Ιστορικά στοιχεία του θεάτρου της Λυττούς

Η αρχαία πόλη Λυκτός ή Λυττός, βρίσκεται στα ανατολικά της Κνωσού και κατά πολλούς ιστορικούς είναι η αρχαιότερη Δωρική πόλη της Κρήτης (σχήμα 3.2.1). Είχε κυρίαρχη παρουσία στην Κρήτη από την Μινωική εποχή μέχρι τουλάχιστον την Ρωμαϊκή περίοδο. Για πολλά χρόνια αμφισβήτησε την κυριαρχία της Κρήτης από την Κνωσό και συμμετείχε επανειλημμένα με τη Σπάρτη στις εσωτερικές διαμάχες των κρητικών πόλεων. Είναι μια από τις επτά κρητικές πόλεις που αναφέρονται στα Ομηρικά έπη, την Ιλιάδα και την Οδύσσεια, ενώ παράλληλα συμμετείχε στον Τρωικό πόλεμο. Οι αναφορές των ιστορικών και των περιηγητών αλλά και τα αρχαιολογικά ευρήματα υποδηλώνουν τόσο την διαρκή παρουσία της στην μεγαλόνησο κατά την αρχαιότητα, όσο και το επίπεδο του πολιτισμού της.

Σχήμα 3.2.1 Θέση της αρχαίας Λυττούς.

Ανάμεσα στα σημαντικά μνημεία της Λυττούς κυρίαρχη θέση είχε το αρχαίο θέατρό της. Το θέατρο αυτό ήταν το μεγαλύτερο θέατρο σε όλο το νησί. Η κατασκευή του ανάγεται στην Ρωμαϊκή περίοδο. Πληροφορίες για το αρχαίο αυτό θέατρο καθώς και ένα εξαιρετικό

του σχέδιο έχουμε από τον Βικεντίνο γιατρό Onorio Belli ο οποίος, αφού το 1583 διορίστηκε γιατρός του Γενικού Προβλεπτή της Κρήτης Luigi di Antonio Grimani, έζησε για μερικά χρόνια στην Κρήτη περιηγούμενος το νησί. Έπεισε μάλιστα τον γενικό Προβλεπτή να κάνει και ανασκαφές, φέρνοντας στο φως αξιόλογα ευρήματα ανάμεσα στα οποία και επιγραφές που υποδήλωναν ονόματα αρχαίων πόλεων άγνωστα μέχρι εκείνη την εποχή. Το 1586 συνέγραψε ένα πολύ αξιόλογο δοκίμιο για την ιστορία της Κρήτης με πολλές περιγραφές αρχαιοτήτων ανάμεσα στις οποίες ήταν και τα αρχαία θέατρα. Με το πέρασμα του χρόνου όμως, το θέατρο καλύφθηκε από χώμα και σήμερα αγνοείται η ακριβής τοποθεσία του. Το θέατρο της Λυττούς είχε διάμετρο 600 πόδια, τέσσερα διαζώματα κερκίδων και μια σκηνή που κατά τον Belli δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστεί η ακριβής κατασκευή της, λόγω των ερειπίων που την σκέπαζαν.

Αυτό που κάνει το θέατρο της Λυττούς αξιοσημείωτο και ίσως μοναδικό, δεν είναι τόσο το μέγεθος αλλά τα ευρήματα μέσα σε αυτό, όπως αυτά περιγράφονται από τον Onorio Belli, ο οποίος αναφέρει χαρακτηριστικά: *"...Είχε τρεις σειρές χάλκινα αγγεία (ηχεία) για να πολλαπλασιάζουν τους ήχους και φαίνονται σχεδόν όλες οι θέσεις που ήταν τοποθετημένα..."*. Το σημαντικό λοιπόν χαρακτηριστικό που καθιστά το θέατρο της Λυττούς ξεχωριστό και άξιο έρευνας είναι τα ηχεία αυτά που ταιριάζουν απόλυτα με τις περιγραφές του Βιτρούβιου. Στο Σχήμα 3.2.2, βλέπουμε την αποτύπωση του θεάτρου της Λυττούς από τον Onorio Belli όπως δημοσιεύτηκε στο δοκίμιό του και αναδημοσιεύεται εδώ από το άρθρο *"Theatres and other remains in Crete from a Ms History of Candia"* του Onorio Belli το 1586 από τον Edward Falkener.

Σχήμα 3.2.2 Πλάνο του θεάτρου της Λυττούς, σύμφωνα με τον Onorio Belli. Στο πλάνο, βλέπουμε τα 4 μέρη του θεάτρου με 13 θάλαμους στο καθένα.

Στο παραπάνω σχήμα, που παρουσιάζεται ένα πλάνο του θεάτρου της Λυττούς (σύμφωνα με τον Onorio Belli) απεικονίζονται 3 γραμμές με 13 θαλάμους ακουστικών βάζων στο καθένα. Αυτό το σχήμα χρησιμοποιήθηκε για να σχεδιαστεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο με τη χρήση του προγράμματος Autocad. Αυτό το σχέδιο του θεάτρου που απεικονίζει 3 σειρές με

13 βάζα στο καθένα [3.1.2] -που όπως αναφέρθηκε παραπάνω- ταιριάζει με εκείνη την περιγραφή του Βιτρούβιου.

Η θεωρία του Βιτρούβιου στην σύγχρονη εποχή αμφισβητήθηκε από πολλούς λόγω του ότι μέχρι πριν μερικά χρόνια σε κανένα θέατρο δεν βρέθηκαν αποδείξεις που να μαρτυρούν την ύπαρξη τέτοιων βάζων. Ωστόσο η θεωρία του Βιτρούβιου υπήρξε αρκετά δημοφιλής και κατά την περίοδο κυρίως του μεσαίωνα και τις αρχές της Αναγέννησης οι Αρχιτέκτονες βασιζόμενοι πιθανόν στην θεωρία του Βιτρούβιου σε αρκετές εκκλησίες εντοίχιζαν αγγεία με σκοπό την βελτίωση της ακουστικής τους, πολλά από τα οποία σώζονται και σήμερα. Εκκλησίες με αγγεία βρέθηκαν σε περιοχές που εκτείνονται από την Σκανδιναβική χερσόνησο μέχρι την Μέση Ανατολή. Η τεχνική αυτή επεκτάθηκε και σε τζαμιά. Ο περίφημος Έλληνας εξισλαμισθείς αρχιτέκτων Sinan στα τζαμιά που έκτισε συνήθιζε τον εντοχισμό τέτοιων αγγείων. Τα τζαμιά αυτά φημίζονται για την ακουστική τους. Το θέμα της αποτελεσματικότητας των αγγείων μελετάται ακόμη και σήμερα και εξακολουθεί να διχάζει τους επιστήμονες.

Τα αγγεία αυτά στην πραγματικότητα λειτουργούν ακριβώς όπως οι συντονιστές Helmholtz, που χρησιμοποιούνται σήμερα με διάφορες μορφές, όπως για παράδειγμα στις διάτρητες επιφάνειες, κυρίως για την απορρόφηση του ήχου. Οι συντονιστές αυτοί, ένα μέρος του ήχου που απορροφούν, το επανεκπέμπουν σε μικρή απόσταση από αυτούς. Ορισμένοι ερευνητές πιστεύουν ότι τα αγγεία χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση του ήχου, άλλοι για την βελτίωση της ακουστικής ποιότητας των χώρων αλλά οι περισσότεροι πιστεύουν ότι η τοποθέτησή τους δεν είχε να προσφέρει τίποτα στην ακουστική των χώρων αυτών. Κατά τον Crunell, όσον αφορά την αποτελεσματικότητα των αγγείων, υπάρχει το εξής ιστορικό παράδοξο: Αν τα αγγεία δεν είναι αποτελεσματικά, γιατί εξαπλώθηκαν σε όλο τον τότε πολιτισμένο κόσμο; Αν είναι, όμως, αποτελεσματικά, γιατί σταμάτησε η χρήση τους τον 17^ο - 18^ο αιώνα;

Επανερχόμενοι στο θέατρο της Λυττούς είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον το γεγονός ότι στην περιγραφή του Onorio Belli βλέπουμε την πρώτη ίσως αναφορά της ύπαρξης αγγείων σε θέατρα, (αν εξαιρέσουμε το αναφερόμενο από τον ίδιο τον Βιτρούβιο το θέατρο της Κορίνθου). Επίσης, σύμφωνα με τις περιγραφές του Onorio Belli *"...στο θέατρο υπάρχουν τρεις σειρές με 13 κοιλότητες για ακουστικά αγγεία η κάθε μία..."*. Ο αριθμός 13 δεν είναι τυχαίος αλλά ταιριάζει απόλυτα με την θεωρία του Βιτρούβιου. Το θέατρο της Λυττούς όπως το είδε ο Onorio Belli ήταν βέβαια σε κατάσταση ερειπίων και δεν γνωρίζουμε την εποχή που κατασκευάστηκαν οι εσοχές με τα αγγεία. Ωστόσο, το γεγονός της αναφοράς της ύπαρξης των ηχείων από τον Belli, ο οποίος μάλιστα έδωσε λεπτομερή περιγραφή της θέσης τους, μας κάνει να εικάσουμε την αξιοπιστία της πληροφορίας και να δοθεί ένα πρόσθετο κίνητρο για την μελέτη του αρχαίου θεάτρου της Λυττούς σε ότι αφορά την ακουστική του συμπεριφορά.

3.3 Επιλογή του θεάτρου της Λυττούς

Για την μελέτη επιλέχτηκε το θέατρο της Λυττούς έστω και αν αυτό δεν διασώθηκε. Η επιλογή δεν ήταν τυχαία αλλά έγινε για τους παρακάτω λόγους:

1. Είναι μεγάλο θέατρο που κατά την κατασκευή του θα έπρεπε να έχει προσεγμένη ακουστική
2. Οι περιγραφές του Onorio Belli ταιριάζουν απόλυτα με την θεωρία του Βιτρούβιου και ίσως είναι το μοναδικό θέατρο στο οποίο είναι αποτυπωμένες ακριβώς οι θέσεις των αγγείων και ο αριθμός τους είναι ταυτόσημος με τις περιγραφές του Βιτρούβιου.

Δυστυχώς το θέατρο αυτό όχι μόνο δεν υπάρχει σήμερα, αλλά δεν είναι γνωστή ούτε η τοποθεσία του. Ωστόσο έχουμε κάποιες λεπτομέρειες κατασκευής του όπως διασώθηκαν από τον Onorio Belli και ο οποίος αναφέρει ότι "... τα καθίσματα είναι σκαμμένα στο βουνό που είναι όλο από μαλακή πέτρα...την μαλακή αυτή πέτρα την λένε λεπίδα".

Η σύγχρονη τεχνολογία έδωσε την δυνατότητα μετά από προσεκτική μελέτη των πηγών και του εξαιρετικού σχεδίου του Onorio Belli να ανακατασκευαστεί το αρχαίο θέατρο σε ψηφιακή μορφή και να μελετηθούν τα ακουστικά του χαρακτηριστικά, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση των αγγείων στην ακουστική του συμπεριφορά. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν σε υπολογιστή τρεις προσομοιώσεις του θεάτρου (CAD), μία με την παρουσία αγγείων μία χωρίς αυτά αλλά με κοιλότητες κάτω από τα καθίσματα και μια με επίπεδες επιφάνειες κάτω από τα καθίσματα. Στην κατασκευή των μοντέλων συναντήθηκαν αρκετά προβλήματα που αφορούν στις λεπτομέρειες κατασκευής του θεάτρου. Για παράδειγμα δεν είναι γνωστό το ακριβές δομικό υλικό του θεάτρου, το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στην ακουστική του καθώς και η γεωμετρία των καθισμάτων, αφού δεν υπάρχουν καθόλου σχετικά ευρήματα. Όσον αφορά στο δομικό υλικό υιοθετήθηκε η πέτρα που ανέφερε ο Onorio Belli. Για τις υπόλοιπες λεπτομέρειες ελήφθησαν υπόψη άλλα θέατρα με ανάλογες κατασκευές.

Σε ό,τι αφορά την μορφολογία των αγγείων, επιλέχτηκε η δομή που περιγράφεται από τον Izenour [3.3.1, 3.3.2] ο οποίος αναφέρει ότι στις ανασκαφές που έγιναν στο Ρωμαϊκό θέατρο του Beth Shean στο Ισραήλ κοντά στην αρχαία Σκυθόπολη, βρέθηκε η ύπαρξη 9 (αντί των 13 που περιγράφει ο Βιτρούβιος) ισαπεχουσών κοιλοτήτων για ακουστικά αγγεία. Σύμφωνα με τον Izenour τα αγγεία ήταν τοποθετημένα σε κοιλότητες όπως φαίνονται στο σχήμα 3.3.1.

Σχήμα 3.3.1 Αναπαράσταση κοιλότητας με αντηχείο στο θέατρο Beth Sean κατά τον Izenour.

Με τη χρήση των μαθηματικών μοντέλων υπολογίστηκαν οι δείκτες που αφορούν στην ακουστική συμπεριφορά του θεάτρου. Η δυνατότητα προσομοίωσης του θεάτρου χωρίς τα αγγεία μας επιτρέπει να εικάσουμε το ακουστικό του πεδίο χωρίς αυτά. Δεδομένου ότι τα μεγάλα αρχαία θέατρα, όπως αυτό της Λυττούς, χρησιμοποιούνταν κυρίως για θεατρικές παραστάσεις και για συγκεντρώσεις κατοίκων, η βασική ιδιότητα που έπρεπε να διαθέτει η ακουστική του θεάτρου είναι η καταληπτότητα (ή αντιληπτικότητα). Η δυνατότητα δηλαδή που έχει ο ακροατής να αντιλαμβάνεται τον λόγο και μάλιστα σε όλες τις θέσεις του θεάτρου. Στη σύγχρονη ακουστική επιστήμη η καταληπτότητα μετράται με τον δείκτη *RASTI* (βλέπε παράγραφο 1.12) που υπολογίζεται από κατάλληλο λογισμικό που στηρίζεται στα κατασκευαστικά δεδομένα του θεάτρου.

Άλλος σημαντικός δείκτης που υπολογίστηκε είναι ο χρόνος αντήχησης (βλέπε παράγραφο 1.12). Ο χρόνος αυτός παίζει σημαντικό ρόλο στην ακουστική, όταν σε έναν χώρο οργανώνονται μουσικές συναυλίες ή θεατρικές παραστάσεις. Μικρός χρόνος αντήχησης ευνοεί την καταληπτότητα της ομιλίας σε αντίθεση με ένα μεγάλο χρόνο που δίδει καλύτερο μουσικό αποτέλεσμα. Ο χρόνος αντήχησης δεν έχει καθοριστική σημασία

στα ανοικτά θέατρα και μάλιστα της περιόδου, όπου στα θέατρα παιζόταν αρχαίο δράμα. Επίσης, δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την ύπαρξη των αγγείων. Για τον λόγο αυτό, στην αξιολόγηση της ακουστικής του θεάτρου της Λυττούς, η έρευνα επικεντρώθηκε στον δείκτη καταληπτότητας καθώς και στην μέτρηση της απώλειας έντασης της ηχητικής πηγής στα διαφορετικά σημεία του θεάτρου.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η χρήση των αγγείων βελτιώνει σε μικρό βαθμό την ακουστική του θεάτρου. Δεν παρατηρήθηκε αξιολογη ενίσχυση του ήχου με την χρήση τους, παρατηρήθηκε όμως μια μικρή βελτίωση στον δείκτη καταληπτότητας (*RASTI*), ο οποίος πάντως εκτιμήθηκε υψηλός σε όλα τα σημεία του θεάτρου. Ενδεχομένως ο αριθμός των αγγείων να ήταν μικρός σε σχέση με το μέγεθος του θεάτρου για να υπάρξει σημαντική βελτίωση της ακουστικής του.

Σχήμα 3.3.2 Τρισδιάστατο CAD μοντέλο του θεάτρου της Λυττούς.

Για την μελέτη της επίδρασης των συντονιστών στην ακουστική του θεάτρου της Λυττούς στο μοντέλο προσομοίωσης που σχεδιάστηκε, εξετάστηκαν τα εξής:

1. Η επίδραση της κοιλότητας κάτω από τα καθίσματα των θεατών.
2. Η επίδραση των ηχείων και των θέσεων που βρίσκονται.

3.4 Η επίδραση της κοιλότητας των καθισμάτων

Η κοιλότητα κάτω από τα καθίσματα λειτουργεί ως κοιλότητα συντονισμού. Για την μελέτη της επίδρασης της κοιλότητας στην ακουστική του θεάτρου έγιναν δύο προσομοιώσεις: Μία με κοιλότητα κάτω από τα καθίσματα και μία με κοιλότητα. Λεπτομέρεια της κοιλότητας φαίνεται στο σχήμα 3.4.1. Η εξομοίωση της κοιλότητας κάτω από τα καθίσματα (εφόσον δεν υπήρχαν πληροφορίες για το θέατρο της Λυττούς) πραγματοποιήθηκε βάση της γεωμετρίας διασωθέντων θεάτρων ή και αναφορών σε αυτά. Το σχήμα 3.4.1α δείχνει την μορφή των καθισμάτων από το θέατρο του Διονύσου στην Αθήνα. Η μορφή αυτή των καθισμάτων υιοθετήθηκε για την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης (σχήμα 3.4.1β).

Σχήμα 3.4.1 Κοιλοτήτες των καθισμάτων α. Τυπική μορφή καθισμάτων β. σύμφωνα με την εξομοίωση.

Η πηγή λευκού θορύβου τοποθετήθηκε στο κέντρο της σκηνής και για λόγους σύγκρισης επιλέχθηκαν τρία σημεία, ένα στις πρώτες θέσεις (F) ένα στο μέσο του θεάτρου (M) και ένα στο επάνω μέρος του θεάτρου (E), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4.2. Για την προσομοίωση του θεάτρου, χρησιμοποιήθηκε λογισμικό, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο ray tracing [3.2.1].

Σχήμα 3.4.2 Θέσεις που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό των δεικτών ακουστικής ποιότητας στο μοντέλο προσομοίωσης.

Το σχήμα 3.4.3 δείχνει με ανάλυση οκτάβας τις στάθμες στις τρεις επιλεγμένες θέσεις του θεάτρου της Λυττούς. Από το σχήμα φαίνεται ξεκάθαρα η μείωση της στάθμης σε σχέση με την απόσταση των καθισμάτων από την πηγή. Στις πλησιέστερες στην πηγή θέσεις, η

στάθμη του θορύβου σε χαμηλές συχνότητες είναι βελτιωμένη για τα καθίσματα χωρίς κοιλότητα (flat), ενώ στις υψηλότερες συχνότητες το φαινόμενο αντιστρέφεται. Στις δε απομακρυσμένες θέσεις καθώς και στις θέσεις με μέση απόσταση συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο.

Σχήμα 3.4.3 Οκταβικές στάθμες θορύβου στις τρεις θέσεις μέτρησης (κοντά-κέντρο-μακριά).

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται στις τρεις επιλεγμένες θέσεις οι χρόνοι αντήχησης $T15$ και $T30$. Σε όλες τις περιπτώσεις η ύπαρξη της κοιλότητας (hollow) αυξάνει αυτές τις παραμέτρους. Αξιοσημείωτο πάντως είναι το γεγονός των μεγάλων τιμών του χρόνου αντήχησης σε όλες τις περιπτώσεις.

Σχήμα 3.4.4 Χρόνοι αντήχησης στις τρεις θέσεις μέτρησης.

Στο σχήμα 3.4.5 φαίνεται ο δείκτης στιβαρότητας της πηγής στις τρεις προαναφερθείσες θέσεις. Όπως φαίνεται από το σχήμα, οι τιμές του δείκτη G είναι βελτιωμένες στις κοντινότερες στην πηγή θέσεις, για τα καθίσματα με κοιλότητα, σε όλες τις συχνότητες. Στις μεσαίες θέσεις υπάρχει μια μικρή βελτίωση (χαμηλότερη από αυτή των κοντινών στην πηγή θέσεων) στις σχετικά χαμηλές συχνότητες, ενώ στις απομακρυσμένες θέσεις δεν υπάρχει καμία επίδραση.

Σχήμα 3.4.5 Στιβαρότητα πηγής στις τρεις θέσεις μέτρησης.

Το σχήμα 3.4.6 δείχνει τις τιμές του δείκτη *LEF*, ο οποίος περιγράφει την καθυστερημένη ενέργεια που φθάνει στην θέση του αποδέκτη. Σε κοντινές στην πηγή θέσεις φαίνεται η αύξηση του δείκτη σε σημαντικό βαθμό σε όλες σχεδόν τις συχνότητες, ενώ για τις μεσαίες θέσεις το φαινόμενο αντιστρέφεται. Για τις δε απομακρυσμένες θέσεις η τιμή του δείκτη *LEF* είναι αρκετά μικρή.

Σχήμα 3.4.6 Δείκτης *LEF* στις τρεις θέσεις μέτρησης.

Το σχήμα 3.4.7 δείχνει το δείκτη *RASTI* που περιγράφει την αντιληπτότητα της ομιλίας. Σε όλες τις περιπτώσεις η ύπαρξη της κοιλότητας βελτιώνει τις τιμές αυτού του δείκτη.

Σχήμα 3.4.7 Δείκτης *RASTI* στις τρεις θέσεις μέτρησης.

Η μελέτη των υπόλοιπων δεικτών ακουστικής ποιότητας δεν έδειξε σημαντική επίδραση της κοιλότητας των καθισμάτων στην γενικότερη ακουστική συμπεριφορά του θεάτρου.

3.5 Η επίδραση των συντονιστών και η μοντελοποίησή τους

Για την μελέτη της επίδρασης των συντονιστών στην ακουστική των αρχαίων θεάτρων κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα: ένα με συντονιστές στις θέσεις που περιγράφει ο Onorio Belli και ένα χωρίς αυτούς. Στο σχήμα 3.5.1 απεικονίζονται οι θέσεις που τοποθετήθηκαν οι συντονιστές (για το πρώτο μοντέλο το οποίο έχει συντονιστές) και στο σχήμα 3.5.2 φαίνεται η λεπτομέρεια του ψηφιοποιημένου αγγείου.

Σχήμα 3.5.1 Πλάνο του θεάτρου της Λυττούς από το τρισδιάστατο μοντέλο του CAD που απεικονίζει τις θέσεις των βάζων (A01-A39) και τις θέσεις των δεκτών (01-47).

Σχήμα 3.5.2 Λεπτομέρεια του ψηφιοποιημένου αγγείου.

Σύμφωνα με το σχέδιο του Belli, παίρνοντας υπόψη το διαθέσιμο χώρο, όπου είναι τοποθετημένες οι κοιλότητες- συντονιστές και ελλείψει άλλης πληροφορίας, υπολογίσαμε κατά προσέγγιση τις ακόλουθες γεωμετρικές διαστάσεις για τις κοιλότητες και τους συντονιστές: άνοιγμα κοιλότητας: 450X300 mm, βάθος κοιλότητας: 885 mm, διάμετρος της ανοιχτής επιφάνειας του συντονιστή 170 mm, μήκος του λαιμού του συντονιστή: 20 mm, διάμετρος συντονιστή 215 mm. Από τις διαστάσεις αυτές, προκύπτει θεωρητικά για το συντονιστή συχνότητα συντονισμού $f_0=273\text{Hz}$. Η ακριβής τιμή της συχνότητας συντονισμού προέκυψε από την εξομοίωσή του σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων (FEM).

Η συνδυαστική συμπεριφορά του συστήματος συντονιστή - κοιλότητας μελετήθηκε χρησιμοποιώντας την μέθοδο FEM [3.2.2]. Στο σχήμα 3.5.3α απεικονίζεται το πλέγμα (mesh) του μοντέλου με τις αντίστοιχες διαστάσεις. Στην εικόνα, η κοιλότητα δεν παρουσιάζεται πλήρως αλλά έχει κοπεί στη μέση, έτσι ώστε να είναι ορατό το αγγείο. Το σχήμα 3.5.3β δείχνει τη συχνотική απόκριση του συστήματος συντονιστή - κοιλότητας στο

σημείο του δέκτη, το οποίο είναι τοποθετημένο στον άξονα του συντονιστή, 1 μέτρο μακριά από το άνοιγμα της κοιλότητας. Το σύστημα διεγείρεται από ευρυζωνικό θόρυβο (20-800Hz). Παρατηρώντας τη συχνотική απόκριση του συστήματος συντονιστή - κοιλότητας (συνεχής κόκκινη γραμμή), δύο κύριες συχνότητες συντονισμού γίνονται αντιληπτές, η μία στα 270Hz και η άλλη στα 310Hz. Από την εξίσωση 1.3.1, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του αγγείου και της κοιλότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.2β, η μικρότερη συχνότητα (270Hz) αντιστοιχεί στην συχνότητα συντονισμού του συντονιστή, ενώ η δεύτερη (310Hz) στην συχνότητα συντονισμού της κοιλότητας. Επομένως, η κύρια επίδραση του συστήματος κοιλότητας- συντονιστή βρίσκεται στην οκτάβα των 250Hz, με παράγοντα ποιότητας του συντονιστή $Q=0.76$. Εμφανώς κάποιος μπορεί να παρατηρήσει, από την μπλε διακεκομμένη γραμμή του σχήματος 3.5.3β, η οποία αναπαριστά την απόκριση του συντονιστή χωρίς την κοιλότητα, ότι ο συντονιστής ουσιαστικά λειτουργεί στη συχνότητα συντονισμού του, παρ' όλο που κάποιες μικρές επιδράσεις παρατηρούνται στις άλλες συχνότητες.

Σχήμα 3.5.3 α. Το πλέγμα του FEM μοντέλου του συστήματος κοιλότητα - συντονιστής. **β.** Συχνотική απόκριση του συστήματος (κόκκινη συνεχής γραμμή), συγκρινόμενη με τη συχνотική απόκριση του συντονιστή χωρίς την κοιλότητα (μπλε διακεκομμένη γραμμή).

Για την προσομοίωση του θεάτρου, χρησιμοποιήθηκε λογισμικό, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο ray tracing [3.2.1]. Το λογισμικό αυτό, όμως, έχει κάποιο περιορισμό όσον αφορά στον αριθμό των επιφανειών που μπορεί να χειριστεί (μέχρι 5000 επιφάνειες) [3.2.1]. Για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία, καθώς και για να ενσωματωθεί η επίδραση των συντονιστών Helmholtz σ' αυτό το λογισμικό, υποθέσαμε ότι ο κάθε συντονιστής συμπεριφέρεται σαν μια πηγή (σύστημα εμβόλου τοποθετημένο σε πλήρως απορροφητική επιφάνεια [3.2.3]). Το εμβαδόν της απορροφητικής επιφάνειας σχεδιάστηκε έτσι ώστε να έχει την ίδια επιφάνεια απορρόφησης με εκείνη της ενεργού διατομής του συντονιστή, όπως δίνεται από την εξίσωση 1.11.15.

Για να επιβεβαιωθεί η ορθότητα αυτής της επιλογής, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων του συντονιστή, ο οποίος βρίσκεται σε μια θεωρητικά άπειρη επίπεδη επιφάνεια φτιαγμένη από πέτρα με μια σημειακή πηγή τοποθετημένη σε μία πλήρως απορροφητική ($\alpha=1$) πεπερασμένη επιφάνεια, εμβαδού ίσου με την ισοδύναμη ενεργό διατομή του συντονιστή χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [3.2.2]. Στο σχήμα 3.5.4 απεικονίζονται τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης σε μορφή ισοδύναμων γραμμών. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τη σύγκριση του σχήματος 3.5.4α με το 3.5.4β, η επίδραση των δύο μοντέλων στο ακουστικό τους πεδίο είναι αρκετά όμοια.

Η ένταση του επανεκπεμπόμενου ήχου του κάθε συντονιστή καθορίστηκε από την εξίσωση 1.11.23, όπου I η ένταση του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος, το οποίο

εκπέμπεται από την προσομοιωμένη πηγή, που βρίσκεται επί της σκηνής (A00 στο σχήμα 3.5.1), χρησιμοποιώντας το παραπάνω λογισμικό [3.2.2].

Σχήμα 3.5.4 Το ακουστικό πεδίο των FEM μοντέλων στη συχνότητα συντονισμού (270Hz) του συντονιστή. **α.** Η επιφάνεια με το σύστημα κοιλότητα - συντονιστή. **β.** Η επιφάνεια με την ισοδύναμη πηγή.

Το σχέδιο CAD της Λυττούς εισήχθηκε στο παραπάνω λογισμικό ακουστικής προσομοίωσης, φτάνοντας τις περιορισμένες σε αριθμό επιφάνειες, που μπορεί να διαχειριστεί το πρόγραμμα [3.2.1]. Υποθέσαμε ότι το θέατρο ήταν φτιαγμένο από πέτρα, ένα κοινό υλικό για την ευρύτερη περιοχή που βρισκόταν το θέατρο. Η τιμή του συντελεστή απορρόφησης (α) της πέτρας-που χρησιμοποιήθηκε κατά την εξομοίωση- για την οκτάβα με κεντρική συχνότητα 250Hz, ήταν 0.05. Οι υπόλοιποι συντελεστές απορρόφησης βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές 0.05 (για τις χαμηλές συχνότητες) και 0.2 (για τις υψηλές συχνότητες).

Μια παντοκατευθυντική πηγή ήχου (σημείο A00, Σχήμα 3.2.3) τοποθετήθηκε στο κέντρο της ορχήστρας, εκπέμποντας ροζ θόρυβο στάθμης 94dB. Οι δέκτες τοποθετήθηκαν σε διασκορπισμένες θέσεις σε όλο το κοίλο μέρος του θεάτρου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.5 (01-12).

Για την μελέτη των συντονιστών, θεωρήθηκαν 39 συντονιστές (εξομοιωμένοι βάση του ισοδύναμου συστήματος "πηγής - επιφάνειας απορρόφησης" όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους) σε θέσεις σημειωμένες με Axx, όπου xx ο αριθμός συντονιστή. Γι' αυτή την εξομοίωση έγινε χρήση του συνόλου του αριθμού των επιφανειών που μπορεί να χειριστεί το λογισμικό. Επιπλέον, η ακουστική συμπεριφορά κάθε συντονιστή μελετήθηκε μεμονωμένα σε σχέση με την απόσταση από αυτόν, για να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα λόγω συμβολής από πηγές στενής συχνοτικής περιοχής (narrow band correlated resonant).

Εξομοιώθηκαν τρία μοντέλα. Το πρώτο εξομοιώνει το θέατρο χωρίς τους συντονιστές και το δεύτερο με τους συντονιστές, τοποθετημένους στις θέσεις που φαίνεται στο σχήμα 3.5.5.

Σχήμα 3.5.5 Κάτοψη του θεάτρου της Λυττούς που απεικονίζει τη θέση της κεντρικής πηγής (A00) (►), των αγγείων (A01-A39) (►) και των δεκτών (01-12) (●).

Σχήμα 3.5.6 Λεπτομέρεια που δείχνει την θέση των συντονιστών.

3.6 Αποτελέσματα

3.6.1 Η επίδραση των συντονιστών στο θέατρο της Λυττούς

Για τη μελέτη της επίδρασης των συντονιστών στην ακουστική συμπεριφορά του θεάτρου της Λυττούς, χρησιμοποιήθηκαν δύο εξομοιώσεις: η μία με την παρουσία των συντονιστών και η άλλη χωρίς αυτούς. Και στις δύο περιπτώσεις το θέατρο υποτέθηκε ότι ήταν άδειο (χωρίς κοινό).

Τα σχήματα 3.6.1 έως 3.6.2 δείχνουν την επίδραση της πηγής (τοποθετημένη στη θέση A00, βλέπε σχήμα 3.5.5) στις διάφορες θέσεις, ως συνάρτηση της απόστασης από την κύρια πηγή (συνεχής γραμμή), καθώς επίσης την επίδραση του κοντινότερου συντονιστή (διακεκομμένη γραμμή) για την οκταβική ζώνη των 250Hz. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η

ζώνη αυτή περιέχει τις συχνότητες συντονισμού του συντονιστή και της κοιλότητας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.1, η κύρια επίδραση των συντονιστών παρατηρείται στον δείκτη του κεντρικού χρόνου, που περιγράφει το κέντρο βαρύτητας της τετραγωνισμένης κρουστικής απόκρισης. Ο κεντρικός χρόνος (T_s) συνήθως περιγράφει την ισορροπία ανάμεσα στον πρώιμο και καθυστερημένο ήχο. Αυτή είναι μια ένδειξη του "χρόνου αντήχησης". Στο σχήμα αυτό, ο κεντρικός χρόνος έχει υπολογιστεί σε διάφορα σημεία του θεάτρου, ως συνάρτηση του χρόνου καθυστέρησης από την πηγή A00 (κύρια πηγή στη σκηνή), από ένα μόνο συντονιστή (που συμπεριφέρεται ως πηγή) τοποθετημένο χαμηλά (A03), στη μέση (A17) και πιο ψηλά (A30) στις θέσεις του θεάτρου. Για όλες τις θέσεις, όπως είναι αναμενόμενο ο κεντρικός χρόνος είναι μεγαλύτερος κοντά στους συντονιστές και μειώνεται όταν απομακρύνεται απ' αυτούς. Να σημειωθεί ότι χωρίς την παρουσία των συντονιστών, ο κεντρικός χρόνος παραμένει σταθερός (συνεχής γραμμή). Γι' αυτό, οι συντονιστές φαίνεται να αυξάνουν τον κεντρικό χρόνο σε θέσεις πιο κοντά σ' αυτούς στο θέατρο και η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη στο κοντινό τους πεδίο.

Σχήμα 3.6.1 Καμπύλες κεντρικού χρόνου (T_s) για την οκτάβα των 250Hz σε σχέση με την απόσταση από την κύρια ή τη δευτερεύουσα πηγή. Η πηγή A00 είναι η κύρια πηγή που βρίσκεται στο κέντρο της σκηνής, ενώ οι πηγές A03, A17 και A30, είναι οι δευτερεύουσες πηγές όπως φαίνονται στο σχήμα 3.5.5.

Σ' αυτό το σχήμα μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι ο κεντρικός χρόνος, που αντιστοιχεί στην εκπομπή από τους συντονιστές, είναι ιδιαίτερα υψηλός. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο συντονιστής φαίνεται να έχει επίδραση στο κοντινό του πεδίο, είναι λογικό να υποθέσει κανείς ότι, ο υψηλός αυτός κεντρικός χρόνος, είναι μια συνέπεια της παρουσίας των συντονιστών.

Η γενική επίδραση των συντονιστών στην ενίσχυση του ήχου είναι μικρή. Στο σχήμα 3.6.2 συγκρίνεται το επίπεδο πίεσης ήχου από την κύρια πηγή A00 με εκείνο της πηγής A03 για την οκταβική ζώνη των 250Hz. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί απ' αυτό το σχήμα, η παραγόμενη στάθμη του ήχου από τους συντονιστές είναι ιδιαίτερα χαμηλή (κατά προσέγγιση 30dB) σε σχέση με εκείνη της κύριας πηγής. Η επίδραση αυτή αιτιολογεί την άποψη ότι οι συντονιστές δεν προσφέρουν τίποτα στην ενίσχυση του ήχου.

Στις θέσεις αυτές ενώ ο κεντρικός χρόνος που ανταποκρίνεται στην εκπομπή των συντονιστών είναι ιδιαίτερα υψηλός, σηματοδοτώντας μια αύξηση του χρόνου αντήχησης του θεάτρου, η στάθμη του ήχου από την εκπομπή των συντονιστών είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνη της κύριας πηγής.

Σχήμα 3.6.2 Σύγκριση της ακουστικής πίεσης που παράγει η κύρια πηγή (πηγή A00 συνεχής κόκκινη γραμμή) και από τη δευτερεύουσα πηγή (συντονιστής "πηγή" A03, διακεκομμένη μπλε γραμμή).

Επιδράσεις παρατηρήθηκαν στον δείκτη *LEF*. Ο δείκτης *LEF*, που περιγράφει την μεταγενέστερη ηχητική ενέργεια, συγκρινόμενα με τον απευθείας ήχο καθώς και τις πρώτες ανακλάσεις [3.6.1], έχει υψηλές τιμές για μικρές αποστάσεις γύρω από τους συντονιστές, αλλά αυτή η επίδραση σταδιακά μειώνεται με την αύξηση της απόστασης.

Σχήμα 3.6.3 Η επίδραση στον δείκτη *LEF* (250Hz σε μπάντα οκτάβας) της κύριας πηγής A00 και των συντονιστών "πηγές" A03, A17 και A30 σε συνάρτηση της απόστασης.

3.6.2 Συγκρίνοντας την ακουστική των θεάτρων της Λυττούς και της Επιδαύρου

Αρχικά, η ακουστική μελέτη του εξομοιωμένου θεάτρου της Λυττούς συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα των μετρήσεων των Ψαρά κ.α. [3.6.2] στο θέατρο της Επιδαύρου.

Σχήμα 3.6.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων από το εξομοιωμένο θέατρο της Λυττούς με τις μετρήσεις από το θέατρο της Επιδαύρου από τον Ψαρά κ.α. [3.2.4]. **α.** strength G vs frequency **β.** clarity $C80$ vs frequency.

Από τη σύγκριση αυτή φαίνεται ότι η ακουστική συμπεριφορά του θεάτρου της Λυττούς με εκείνη της Επιδαύρου είναι παρόμοιες. Στο σχήμα 3.6.4α, παρουσιάζονται η υπολογιζόμενη στιβαρότητα της πηγής G και ο δείκτης διαύγειας $C80$ των μετρήσεων των Ψαρά κ.α. του θεάτρου της Επιδαύρου [3.6.2] και της Λυττούς (εξομοιωμένο μοντέλο χωρίς συντονιστές). Είναι φανερό από το σχήμα 3.6.4α ότι ο υπολογιζόμενος δείκτης στιβαρότητας (G) του θεάτρου της Λυττούς είναι μικρότερος από εκείνον της Επιδαύρου, παρ' όλο που αυτή η διαφορά ποικίλει ανάλογα με τη συχνότητα. Στα 125Hz η διαφορά αυτή είναι 7dB αλλά στα 4 kHz αυτή είναι 0dB. Οι τιμές του $C80$, για όλες τις συχνότητες είναι μεγαλύτερες για το θέατρο της Λυττούς (σχήμα 3.6.4β).

Το σχήμα 3.6.5 δείχνει τα αποτελέσματα εξομοίωσης του θεάτρου της Λυττούς (χωρίς συντονιστές) συγκρινόμενα με τα αποτελέσματα εξομοίωσης του θεάτρου της Επιδαύρου, όπως διεξήχθησαν από τους Βασιλαντωνόπουλου κ.α. [3.6.3], σε διαφορετικές θέσεις δεκτών. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς στα σχήματα 3.6.5b και 3.6.5c, ο δείκτης διαύγειας ($C80$) και οι παράμετροι του $RASTI$ έχουν χαμηλότερες τιμές στο θέατρο της Επιδαύρου για διαφορετικές θέσεις. Αυτό μας επιτρέπει να υποθέσουμε ότι η καθυστερημένη σχετική ενέργεια της κρουστικής απόκρισης είναι μεγαλύτερη στο θέατρο της Επιδαύρου που ουσιαστικά αποτελεί μια ένδειξη για μια μεγαλύτερη "αντήχηση" στο θέατρο της Επιδαύρου. Η παράμετρος $D50$, όπως μπορεί να φανεί στο σχήμα 3.6.5α, είναι μικρότερη μόνο στο θέατρο της Λυττούς για μεγαλύτερες αποστάσεις από την πηγή. Γι' αυτό έχει υποθεθεί ότι γι' αυτές τις αποστάσεις, η ουρά της κρουστικής απόκρισης είναι μικρότερη από εκείνη του θεάτρου της Επιδαύρου.

Σχήμα 3.6.5 Αποτελέσματα εξομοίωσης του θεάτρου της Λυττούς και του θεάτρου της Επιδάουρου από τους Vassilantonopoulos *et al.*

3.7 Συμπεράσματα

Το θέατρο της Λυττούς ήταν το μεγαλύτερο θέατρο της Κρήτης (Candia) και πιθανόν ένα από τα μεγαλύτερα θέατρα της αρχαίας Ελλάδας. Η κατασκευή του θεάτρου, σύμφωνα με τον Βενετό περιηγητή Onorio Belli, ταιριάζει απόλυτα με την περιγραφή του Βιτρούβιου, όσον αφορά τη χρήση των "ηχητικών βάζων". Η χρήση του προγράμματος εξομοίωσης του θεάτρου χωρίς τους συντονιστές έδειξε ότι οι ενδείξεις της ακουστικής συμπεριφοράς είναι συγκρίσιμες με εκείνες του θεάτρου της Επιδάουρου.

Από την παρούσα εργασία, φαίνεται ότι οι συντονιστές επηρεάζουν, τόσο στον κεντρικό χρόνο, όσο και στον δείκτη *LEF*. Η επίδραση στον κεντρικό χρόνο είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι οι ανοικτοί χώροι θεωρητικά δεν έχουν αντήχηση. Πιθανότατα, οι συντονιστές, σε συνδυασμό με τις κοιλότητες κάτω από τις θέσεις, να χρησιμοποιούνταν για να προσφέρουν μια τεχνητή αντήχηση στα αρχαία θέατρα. Η επίδρασή τους στους άλλους δείκτες είναι μάλλον μικρή, συγκρινόμενη με την επίδραση της κύριας πηγής (επί της σκηνής). Ίσως και αυτός να είναι ο λόγος της μη περαιτέρω χρήσης τους.

Βιβλιογραφία:

- [3.1.1] Βιτρούβιος, "*Περί αρχιτεκτονικής*", μετάφραση από το αρχαίο κείμενο: Παύλος Λέφας, Πλέθρον 1997.
- [3.1.2] Falkener Edward, "*A description of some important theatres and other remains in Crete: from a ms. history of Candia by Onorio Belli in 1586*", Trubner & Co London, 1854.
- [3.1.3] Knudsen V., "*Architectural Acoustics*", Scientific American, vol. 209, issue 5, 1963.
- [3.1.4] Junger M., "*Comments on Review of Acoustics*", Historical and Philosophical Development R. B. Lindsay Ed, Journal of Acoustic Society of America vol 56 No2, 1974.
- [3.1.5] Driesch P., "*Acoustic control in enclosures using optimally designed Helmholtz resonators*", Doctoral thesis, The Pennsylvania state University, 2002.
- [3.1.6] Bruel V., "*Models of ancient sound vases*", Journal of Acoustic Society of America vol 112, 2333, 2002.
- [3.1.7] Tilemachos Zakynthinos and Dimitris Skarlatos, "*The effect of ceramic pots on the acoustics of old Greek orthodox churches*", Applied Acoustics 68, σελίδες 1307-1322, 2011.
- [3.2.1] CATT Acoustics Prediction module v7.2.
- [3.2.2] Comsol multiphysics. Acoustic module v3.4
- [3.2.3] Kuttruff H., "*Room Acoustics*", Elsevier Applied Science third Edition, 1991.
- [3.3.1] George C. Izenour, "*Theater Design*", Yale University Press, 1977.
- [3.3.2] George C. Izenour, "*Architectural Acoustics*", Elsevier Academic Press, 2006.
- [3.6.1] Rossing T.(Editor.), "*Springer handbook on acoustics*", Springer science & Business media New York, 2007.
- [3.6.2] Psaras S. Kountouras M., "*Acoustic and environmental parameters measurements in Epidauros ancient Theatre*", The Acoustics of Ancient Theatres Conference, Patras, September 18-21, 2011.
- [3.6.3] Vassilantonopoulos S., Hatziantoniou P., Tatlas N. Zakynthinos T., Skarlatos D. και Mourjopoulos J., "*Measurements and analysis of the acoustics of the ancient theatre of Epidauros*", The Acoustics of Ancient Theatres Conference, Patras, September 18-21, 2011.

4ο Κεφάλαιο

Εξομοίωση διάτρητης επιφάνειας ως ψηφιακό φίλτρο

4.1.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει δημοσιευτεί ένας σημαντικός αριθμός εργασιών γύρω από την ακουστική συμπεριφορά υλικών, μέσω της ανάλυσης των ακουστικών σημάτων, με τη χρήση των πεπερασμένων και συνοριακών στοιχείων, ως γραμμικών φίλτρων, αλλά και χρησιμοποιώντας το μαθηματικό μετασχηματισμό Fourier χρόνου - συχνότητας. Μια τέτοια προσέγγιση περιγράφεται μέσω της κρουστικής απόκρισης (συνάρτηση Green) του συστήματος συναρτήσει του χρόνου t . Η εν λόγω απόκριση είναι συνάρτηση τόσο της θέσης του δέκτη C με καρτεσιανές συντεταγμένες (x_C, y_C, z_C) , όσο και της θέσης της πηγής που βρίσκεται στη θέση A με καρτεσιανές συντεταγμένες (x_A, y_A, z_A) . Η πηγή συνήθως εκπέμπει ένα κρουστικό παλμό που προσεγγίζει την συνάρτηση δέλτα του dirac. Η κρουστική απόκριση τυπικά συμβολίζεται ως $h(t, r_{AC})$, ή πιο απλά ως $h(t)$. Για τις περισσότερες ακουστικές εφαρμογές τέτοιου τύπου, χρησιμοποιείται μια χρονικά αμετάβλητη περιγραφή του συστήματος, λαμβάνοντας υπ' όψη την έξοδο $y(t)$ στη θέση του δέκτη, εξαιτίας της διέγερσης $x(t)$ από την θέση της πηγής, η οποία υπολογίζεται από την συνέλιξη του σήματος εισόδου (διέγερση) με την μονοσήμαντα προσδιορισμένη κρουστική απόκριση $h(t)$ [4.1.1].

Στην ακουστική χώρων, η πιο καθιερωμένη μέθοδος υπολογισμού της κρουστικής απόκρισης είναι η απλοποιημένη μέθοδος των Allen και Berkley [4.1.2], η οποία βασίζεται στη μέθοδο των ειδώλων και είναι κατάλληλη για την περιγραφή και τον προσδιορισμό της κρουστικής απόκρισης χώρων με απλή γεωμετρία. Εδώ προτείνεται να υιοθετηθεί ένα τέτοιο απλοποιημένο αλλά συγχρόνως υπολογιστικά ευέλικτο μοντέλο, για την ανάλυση και τον υπολογισμό της ηχοαπορροφητικής ικανότητας κοινών ακουστικών υλικών, όπως οι διάτρητες απορροφητικές επιφάνειες, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως για τη βελτίωση της ακουστικής των κλειστών χώρων, όταν απαιτείται απορρόφηση σε χαμηλές κυρίως συχνότητες. Η προτεινόμενη μέθοδος δεν αποσκοπεί σε μια ακριβή αναλυτική περιγραφή του ακουστικού πεδίου που διαμορφώνεται από την ακουστική συμπεριφορά τέτοιων υλικών, αλλά αντιθέτως εισαγάγει ένα ευέλικτο υπολογιστικό μοντέλο που μπορεί να υπολογίζει τις αποκρίσεις σε μια ή περισσότερες καθορισμένες θέσεις του δέκτη. Αυτό, με την σειρά του οδηγεί στον εύκολο υπολογισμό του συντελεστή απορρόφησης των επιφανειών αυτών.

Όπως είναι γνωστό τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για να βελτιώνουν την ακουστική χώρων, όταν χρειάζεται να απορροφηθεί η ενέργεια σε μια συγκεκριμένη στενή συχνοτική περιοχή, η οποία συνήθως βρίσκεται συχνοτικά χαμηλά, είναι στοιχεία που η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην αρχή λειτουργίας των συντονιστών Helmholtz [4.1.3]. Οι συντονιστές Helmholtz δεν είναι καταναμημένα (distributed) ακουστικά στοιχεία, γι' αυτό, ο συντελεστής απορρόφησης τους δεν μπορεί να υπολογιστεί απευθείας με αναλυτικούς τύπους. Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 1, η απορροφητική ικανότητα των συντονιστών χαρακτηρίζεται από την ενεργό διατομή απορρόφησης τους ή από την ισοδύναμη απορροφητική επιφάνεια, η οποία ορίζεται ως το ποσοστό της ενέργειας του ήχου, το οποίο απορροφάται ανά δευτερόλεπτο από τα προαναφερθέντα στοιχεία, και της έντασης που θα είχε το προσπίπτον ηχητικό κύμα στο σημείο του απορροφητικού στοιχείου, εάν αυτό δεν ήταν παρόν. Η κύρια λειτουργία των συντονιστών δεν είναι μόνο η απορρόφηση

του ήχου με μεγάλη ενεργό διατομή απορρόφησης στη συχνότητα συντονισμού, αλλά και η σκέδαση με επίσης αξιοσημείωτη ενεργό διατομή. Κάτω από ιδανικές συνθήκες, η ενεργός διατομή απορρόφησης παίρνει τη μέγιστη τιμή της ίση με $\lambda^2/4\pi$, ίση με την ενεργό διατομή σκέδασης [4.1.4, 4.1.5].

Μια διάτρητη επιφάνεια, λειτουργεί με βάση τις αρχές των συντονιστών Helmholtz και είναι ένα κοινό στοιχείο που χρησιμοποιείται για την ηχητική απορρόφηση, με μια ευρεία χρήση στην ακουστική χώρων [4.1.3]. Παρ' όλο που η συχνότητα συντονισμού ενός συντονιστή μπορεί να υπολογιστεί με απλούς ή πιο αναλυτικούς τύπους το βασικό πρόβλημα της ηχοαπορροφητικής επιφάνειας είναι ο υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης, καθώς μπορεί να υπολογιστεί μόνο προσεγγιστικά από τις υπάρχουσες μεθόδους. Ένας πιο ακριβής υπολογισμός των ακουστικών χαρακτηριστικών μιας διάτρητης επιφάνειας, μπορεί να προκύψει από τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων, όπως για παράδειγμα η μέθοδος που αναλυτικά παρατέθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 2) των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) [4.1.6-4.1.10] καθώς και η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (FTD). Μολονότι μια τέτοια προσέγγιση πραγματοποιείται μέσω εμπορικά διαθέσιμων πακέτων εξομοίωσης [4.1.11, 4.1.12] και έχει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά στην αναλυτική ακρίβεια, ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δύσκολη εξαιτίας των υπερβολικά περίπλοκων και χρονοβόρων υπολογιστικών διαδικασιών. Μειονέκτημα των μεθόδων αυτών αποτελεί η μεγάλη υπολογιστική ισχύς που απαιτείται και συνεπώς ο αντίστοιχος χρόνος για να ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί. Για παράδειγμα, επιλύοντας ένα τρισδιάστατο μοντέλο ενός συντονιστή με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο πεδίο της συχνότητας, ένας σύγχρονος υπολογιστής θα χρειαστεί περίπου μια μέρα.

Όπως είναι ήδη γνωστό, η παρουσία μίας διάτρητης απορροφητικής επιφάνειας επηρεάζει έντονα τους δείκτες ακουστικής ποιότητας του χώρου και κυρίως του χρόνου αντήχησης (T). Από την μεταβολή του χρόνου αντήχησης, ο οποίος εξαρτάται άμεσα από την απορρόφηση των επιφανειών ενός χώρου, μπορεί να υπολογισθεί ο στατιστικός συντελεστής απορρόφησης κατά Sabine, για τυχαία πρόσπτωση της επιφάνειας της οποίας επιθυμούμε να τον προσδιορίσουμε. Αυτή η μέθοδος συνιστάται και από τον κανονισμό ISO 354 [4.1.13].

Εδώ πρέπει να επισημανθεί πως δεν υπάρχει κάποιο σύγχρονο αναλυτικό ή υπολογιστικό μοντέλο που να μπορεί να προβλέψει τη συμπεριφορά απορρόφησης τέτοιων επιφανειών, όπως απαιτείται από το πρότυπο ISO 354. Αντιθέτως, η μέτρηση των ακουστικών τους ιδιοτήτων πρέπει να πραγματοποιηθεί, ακολουθώντας λεπτομερείς διαδικασίες μετρήσεων σε μεγάλους θαλάμους αντήχησης.

Γνωρίζοντας τους περιορισμούς των παραπάνω αναλυτικών ή υπολογιστικών μεθόδων στην εξομοίωση διάτρητων απορροφητικών επιφανειών, προτείνεται μια καινούργια μέθοδος, βασισμένη σε μια απλουστευμένη αλλά αποτελεσματική γραμμική με ψηφιακά φίλτρα προσέγγιση, η οποία περιγράφει σημείο προς σημείο την κρουστική απόκριση και την αντίστοιχη συνάρτηση μεταφοράς των διάτρητων επιφανειών. Η ακουστική συμπεριφορά των διάτρητων επιφανειών είναι ανάλογη με εκείνη των συντονιστών Helmholtz. Για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου έγιναν αρκετές απλουστεύσεις σε σχέση με τους φυσικούς μηχανισμούς της ακουστικής συμπεριφοράς από τέτοιες ηχοαπορροφητικές επιφάνειες.

Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί έναν ευέλικτο ορισμό των παραμέτρων των συντονιστών, που μπορεί να εφαρμοστούν στις διάτρητες επιφάνειες. Όπως θα φανεί και παρακάτω, η προσέγγιση αυτή μας επιτρέπει να προβούμε στην αποτελεσματική αξιολόγηση του συντελεστή απορρόφησης τέτοιων επιφανειών, ακολουθώντας την ισχύουσα διαδικασία του προτύπου ISO 354 [4.1.13]. Στο κεφάλαιο αυτό θα διαφανεί ότι η προτεινόμενη αποτελεσματική υπολογιστική μέθοδος μπορεί να υπολογίσει την απόκριση

στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας κάθε απορροφητικής διάτρητης επιφάνειας $N_x \times N_y$ στοιχείων (συντονιστών) σε οποιαδήποτε θέση δέκτη υπό ιδανικές ανηχοϊκές συνθήκες, καθώς επίσης και κάτω από ιδανικές συνθήκες διάχυτου πεδίου (όπως απαιτείται από το πρότυπο ISO 354).

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω συνθήκες, η μέθοδος μας επιτρέπει την διεξαγωγή της ακριβούς εκτίμησης των συχνотικά εξαρτημένων συντελεστών απορρόφησης των διάτρητων επιφανειών, όπως επαληθεύτηκε μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου με μετρήσεις από πιστοποιημένα κατά ISO εργαστήρια εμπορικών διαθέσιμων επιφανειών.

Έτσι, λοιπόν, στην 2^η υποενότητα της παραγράφου 4.2 παρουσιάζεται η προσέγγιση ενός μοντέλου βασισμένου σε ψηφιακά φίλτρα μιας διάτρητης επιφάνειας που αποτελείται από συντονιστές Helmholtz. Στη συνέχεια (§4.2.3) αναλύεται το προτεινόμενο μοντέλο συντονιστών Helmholtz, ως παραμετροποιημένο φίλτρο. Στην 4^η υποενότητα της παραγράφου 4.2 (§4.2.4) περιγράφεται η μέθοδος εξομοίωσης μίας διάτρητης επιφάνειας που αποτελείται από N στοιχεία σε ελεύθερο πεδίο και ακολουθεί (§4.2.5) η περιγραφή του προτεινόμενου μοντέλου διάτρητης επιφάνειας σε διάχυτο πεδίο. Στην 6^η υποενότητα της ίδιας παραγράφου (§4.2.6) περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού του συντελεστή απορρόφησης μιας διάτρητης επιφάνειας, χρησιμοποιώντας το μοντέλο που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Επιπλέον, στην παράγραφο 4.3 παρατίθενται τα αποτελέσματα βασισμένα στις εξομοιώσεις του προτεινόμενου μοντέλου, ενώ στην πρώτη υποενότητα (§4.3.1) συγκρίνονται οι συντελεστές απορρόφησης της συγκεκριμένης επιφάνειας, που προέκυψαν από την προτεινόμενη μέθοδο και των δεδομένων που βρέθηκαν από την τυποποιημένη μέτρηση. Στο επόμενο υποκεφάλαιο (§4.3.2) αξιολογείται η υπολογιστική πολυπλοκότητα του προτεινόμενου μοντέλου, συγκρινόμενο με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος, (§4.4) παραθέτονται τα αποτελέσματα και οι εκβάσεις όλου του 4^{ου} κεφαλαίου.

4.1.2 Συμβατικές μέθοδοι προσδιορισμού συντελεστή απορρόφησης

Ο προσδιορισμός του συντελεστή απορρόφησης μιας επιφάνειας συνήθως γίνεται πειραματικά, διότι οι υφιστάμενοι αναλυτικοί τύποι δίδουν τον συντελεστή απορρόφησης με σημαντικά σφάλματα. Οι πειραματικοί τρόποι μέτρησης του συντελεστή απορρόφησης εξαρτώνται από το είδος του συντελεστή απορρόφησης που επιθυμούμε να προσδιορίσουμε. Οι τρόποι αυτοί συνοψίζονται παρακάτω.

I. Μέτρηση του συντελεστή απορρόφησης για κάθετη πρόσπτωση

Για τον συντελεστή αυτόν χρησιμοποιείται η μέθοδος του σωλήνα στάσιμου κύματος, η οποία χρησιμοποιείται για την μέτρηση του συντελεστή απορρόφησης σε πορώδεις συνήθως απορροφητές [4.1.14]. Κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

- Απαιτούνται δείγματα πολύ μικρού μεγέθους
- Είναι ταχεία μέθοδος
- Δίνει σχετικά μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματα

Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι υπολογίζει τον συντελεστή απορρόφησης μόνο για κάθετη πρόσπτωση, που συνήθως είναι και μικρότερος από αυτόν της τυχαίας πρόσπτωσης.

Σχήμα 4.1.1 Μέθοδος σωλήνα στάσιμου κύματος.

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται σωλήνας κυλινδρικού συνήθως σχήματος, του οποίου η διάμετρος είναι μικρότερη από το μήκος κύματος του ήχου ($< 0.59\lambda$), το δε μήκος του μεγαλύτερο από $\frac{3}{4}\lambda$ (σχήμα 4.1.1). Το δείγμα τοποθετείται στην μία άκρη του σωλήνα και στην άλλη άκρη ηχητική πηγή εκπέμπει ήχο μιας συχνότητας. Εφόσον λόγω της απορρόφησης το πλάτος του ανακλώμενου (p_r) ηχητικού κύματος είναι μικρότερο από αυτό που προσπίπτει (p_i), στα σημεία που υπάρχουν δεσμοί το συνιστάμενο πλάτος δεν είναι μηδέν αλλά $p_i - p_r$, ενώ στα σημεία που αντιστοιχεί το μέγιστο $p_i + p_r$, δηλαδή:

$$\frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{|p_i + p_r|}{|p_i - p_r|} = n_s \quad (4.1.1)$$

Η ποσότητα n_s ονομάζεται λόγος στάσιμου κύματος (standing wave ratio). Μετακινώντας το μικρόφωνο του σχήματος (5.6.1) μπορούμε να βρούμε τις θέσεις όπου υπάρχουν τα μέγιστα και ελάχιστα της ακουστικής πίεσης και να υπολογίσουμε το n_s . Ο συντελεστής απορρόφησης (a) και ανάκλασης (a_r) σύμφωνα με τον ορισμό θα δίνεται από τις σχέσεις:

$$a = 1 - \left[\frac{n-1}{n+1} \right]^2 = \frac{4}{n + \frac{1}{n} + 2}, \quad a_r = \left[\frac{p_r^2}{p_i^2} \right] = \left[\frac{n-1}{n+1} \right]^2 \quad (4.1.2)$$

II. Μέτρηση του συντελεστή πρόσπτωσης για συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης

Με την μέθοδο αυτή γίνεται διαχωρισμός της προσπίπτουσας από την ανακλώμενη ηχητική ακτίνα και με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται ο συντελεστής ανάκλασης. Ο διαχωρισμός μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους:

- με την βοήθεια κατευθυντικού μικροφώνου
- με την βοήθεια των συναρτήσεων συσχέτισης
- με την χρήση τόνων μικρής διάρκειας (tone burst)

Ο διαχωρισμός με την βοήθεια ριπής τόνου γίνεται ως εξής: Η πηγή (βλέπε σχήμα 4.1.2α) εκπέμπει ριπές τόνων (tone burst) των οποίων η στάθμη μετριέται σε ανηχοϊκό θάλαμο. Στην συνέχεια μεταξύ πηγής και δέκτη παρεμβάλλεται φράγμα μεγάλης ηχομείωσης (βλέπε σχήμα 4.1.2β) και μετριέται η στάθμη που προέρχεται από ανάκλαση για δεδομένη γωνία πρόσπτωσης και για την ίδια απόσταση πηγής - δέκτη. Από την διαφορά της στάθμης υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης για την συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης.

Σχήμα 4.1.2 Μέθοδος ριπής τόνου **α.** χωρίς φράγμα **β.** με φράγμα.

III. Μέθοδος μέτρησης του συντελεστή απορρόφησης για τυχαία πρόσπτωση

Η μέθοδος αυτή είναι στατιστική και στηρίζεται στην μέτρηση του χρόνου αντήχησης. Ο συντελεστής απορρόφησης που δίδεται στους πίνακες συνήθως αναφέρεται σ' αυτόν τον τρόπο υπολογισμού. Αποτελεί δε την προτεινόμενη από τους κανονισμούς ISO μέθοδο μέτρησης.

Σχήμα 4.1.3 Κάτοψη χώρου και η καμπύλη του ρυθμού μείωσης της ακουστικής ενέργειας για τον κάθε χώρο **α.** χώρος χωρίς ηχοαπορροφητική επιφάνεια **β.** ο ίδιος χώρος με ηχοαπορροφητική επιφάνεια.

Ο χρόνος αντήχησης (που σχετίζεται με τον ρυθμό μείωσης της στάθμης του ήχου σε κλειστούς χώρους) ορίζεται στην παράγραφο 12 του 1^{ου} κεφαλαίου και συνδέεται άμεσα με τον μέσο συντελεστή απορρόφησης του χώρου. Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η εξής:

Σε δεδομένο χώρο όγκου V και εμβαδού επιφανειών s μετριέται ο χρόνος αντήχησης T . Από την μέτρηση αυτή υπολογίζουμε τον μέσο συντελεστή απορρόφησης με βάση την παρακάτω σχέση του Sabine:

$$\bar{a} = \frac{0.161V}{sT} \quad (4.1.3)$$

Στην συνέχεια καλύπτεται μία μεγάλη επιφάνεια εμβαδού x , που έχει συντελεστή απορρόφησης a_L , με το υλικό του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε τον συντελεστή απορρόφησης και μετράμε εκ νέου τον χρόνο αντήχησης (T'). Ο ζητούμενος συντελεστής απορρόφησης του υλικού δίνεται από την σχέση:

$$a_x = \frac{0.161V}{x} \left[\frac{1}{T'} - \frac{1}{T} \right] + a_1 \quad (4.1.4)$$

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται μια τροποποιημένη μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή απορρόφησης ενός απορροφητή, που αποτελείται από μια διάτρητη επιφάνεια. Η προτεινόμενη μέθοδος συνδυάζει τις αναλυτικές μεθόδους λύσης της κυματικής εξίσωσης τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας, με την χρήση της θεωρίας των ψηφιακών φίλτρων.

4.2 Μαθηματική Προσέγγιση

4.2.1 Εξομοίωση του ακουστικού πεδίου του συντονιστή βασισμένη σε φίλτρα

Ας υποθέτουμε ότι στο σημείο A (x_A, y_A, z_A) υπάρχει μία ιδανική σημειακή παντοκατευθυντική πηγή ήχου που εκπέμπει ήχο, του οποίου η ακουστική πίεση εκφράζεται - σε οποιαδήποτε θέση - ως $p_{source}(r, t)$, όπου r η απόσταση από την πηγή και t ο χρόνος. Αυτό το ακουστικό κύμα φτάνει και στον δέκτη (ο οποίος βρίσκεται στη θέση C, ακολουθώντας την απευθείας διαδρομή από το σημείο A έως το σημείο C) και στον απλό συντονιστή που βρίσκεται στην θέση B (από το σημείο A έως το B), έχοντας μειωμένη ενέργεια λόγω σφαιρικής διάδοσης και μια καθυστέρηση εξαιτίας των αποστάσεων AC και AB αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Στην παραπάνω θεώρηση όσο και στα παρακάτω, η απορρόφηση από το μέσο διάδοσης θεωρείται αμελητέα, λαμβάνεται όμως υπόψη η ηχομείωση λόγω σφαιρικής διάδοσης. Το ηχητικό κύμα φθάνει στο στόμιο του συντονιστή. Στην συνέχεια ο συντονιστής επανεκπέμπει το σήμα στο ηχητικό πεδίο, με μειωμένη όμως την ενέργειά του στη συχνότητα συντονισμού.

Να υπενθυμίσουμε εδώ, όπως είχε αναλυτικά παρατεθεί στο 1^ο κεφάλαιο, ότι στο κοντινό πεδίο, δηλαδή για αποστάσεις από την πηγή που ικανοποιούν την συνθήκη $r < \frac{c}{\omega_0}$,

κυριαρχεί η εκπομπή της ηχητικής ενέργειας από τον συντονιστή και η ακουστική πίεση στη συχνότητα συντονισμού θα αυξηθεί [4.2.1, 4.2.2]. Δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία επικεντρωθήκαμε στη συμπεριφορά του συντονιστή στο μακρινό πεδίο, η συμπεριφορά του στο κοντινό πεδίο δεν θα μελετηθεί. Επομένως, για τις περιπτώσεις που εξετάζονται

εδώ, ο δέκτης (σημείο C) υποτίθεται ότι βρίσκεται στην περιοχή $r > \frac{c}{\omega_0}$ (μακρινό πεδίο),

έτσι ώστε ο συντονιστής να δρα μόνο ως απορροφητής ηχητικής ενέργειας (σχήμα 4.2.1).

Σχήμα 4.2.1 Απεικόνιση του πεδίου ενίσχυσης και απορρόφησης που δημιουργεί ο συντονιστής.

Παρ' όλο που η παρούσα ανάλυση μπορεί να επεκταθεί για υψηλότερο συχνοτικό εύρος, εδώ έχουν μελετηθεί τυπικές περιπτώσεις, όπου η συχνότητα συντονισμού ενός συντονιστή Helmholtz είναι μικρότερη από 500Hz ($f_0 < 500\text{Hz}$), διότι στην περιοχή αυτή λειτουργίας βρίσκεται η συχνότητα συντονισμού τόσο των απλών συντονιστών, όσο και των διάτρητων επιφανειών.

Σύμφωνα με την θεωρία των συντονιστών, ο συντονιστής μπορεί να εξισωθεί προσεγγιστικά ως μια επίπεδη κυκλική επίπεδη πηγή τοποθετημένη επάνω σε μια πλήρως απορροφητική επιφάνεια [4.2.2]. Αν η πηγή αναλυθεί σε μια σειρά από γραμμικές πηγές μεταβλητού μήκους (σχήμα 4.2.2), τότε η υπέρθεση των ακτινοβολιών όλων αυτών των γραμμικών πηγών στο μακρινό πεδίο για την ακουστική πίεση δίνει την σχέση [4.2.3].

$$p(r, \theta, t) = \frac{j}{2} \rho c U \frac{r_{HR}}{r} k r_{HR} \left[\frac{2J_1(kr_{HR} \sin \theta)}{kr_{HR} \sin \theta} \right] e^{j(\omega t - kr)} \quad (4.2.1)$$

όπου:

j χαρακτηρίζει τις τιμές του J που μειώνουν αυτή τη συνάρτηση Bessel έως τη τιμή μηδέν $J(j)=0$, ρ η πυκνότητα, U η ταχύτητα όγκου.

Σχήμα 4.2.2 Ανάλυση της πηγής σε μια σειρά από γραμμικές πηγές πεπερασμένου μήκους.

Όσον αφορά το μακρινό πεδίο, για μήκη κύματος πολύ μικρότερα της ακτίνας της πηγής ($kr_{HR} \gg 1$) όπου k ο γωνιακός κυματάριθμος, $k = \frac{2\pi f_0}{c}$, το διάγραμμα ακτινοβολίας έχει

πολλούς πλευρικούς λοβούς, το δε γωνιακό εύρος του κυρίως λοβού είναι μικρό. Αν το μήκος κύματος είναι αρκετά μεγάλο $kr_{HR} < 3.83$, μόνο ο κύριος λοβός είναι παρών, εάν όμως $kr_{HR} \ll 1$ ο παράγων κατευθυντικότητας είναι κοντά στην μονάδα για όλες τις κατευθύνσεις, συνεπώς η συγκεκριμένη πηγή συμπεριφέρεται ως μια σημειακή ισότροπη πηγή.

Μια τυπική ακτίνα στομίου ενός συντονιστή, που στην πράξη αντιστοιχεί στην ακτίνα μιας κυκλικής οπής μιας διάτρητης επιφάνειας (βλέπε εξίσωση 1.8.17), είναι $r_{HR} < 0.005\text{m}$. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ποσότητα $kr_{HR} \ll 1$ [4.2.3], που σημαίνει ότι ο συντονιστής μπορεί να θεωρηθεί ως ισότροπη σημειακή πηγή.

Ο συντονιστής Helmholtz μπορεί, έτσι, να μοντελοποιηθεί ως ένα φίλτρο στο πεδίο του χρόνου, υποθέτοντας ότι $p_{HRin}(t)$ είναι η πίεση ήχου που φτάνει στο στόμιο και $p_{HRout}(t)$ η ακουστική πίεση του ηχητικού κύματος που εκπέμπεται από τον συντονιστή. Ο συντονιστής Helmholtz, σύμφωνα με τα ανωτέρω, προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ως μια παντοκατευθυντική σημειακή πηγή, τοποθετημένη σε μια πλήρως απορροφητική επιφάνεια. Το επανεκπεμπόμενο σήμα από τον συντονιστή φτάνει στον δέκτη (από το σημείο B στο σημείο C) με μειωμένη, λόγω της απόστασης, στάθμη και καθυστερημένο για τον ίδιο λόγο. Η συνολική ακουστική πίεση στη θέση του δέκτη, στην περίπτωση που αυτή βρίσκεται υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου, θα αποτελείται από τη συμβολή τόσο της πίεσης από το απ' ευθείας σήμα, όσο και της πίεσης που επανεκπέμπεται από τον συντονιστή Helmholtz (βλέπε σχήμα 4.2.3). Αυτό το φυσικό μοντέλο μπορεί να προσεγγισθεί από ένα γραμμικό φίλτρο που χαρακτηρίζεται από μια κρουστική απόκριση $h_p(t)$.

Αν υποθέσουμε ότι ο συντονιστής υλοποιείται από μια οπή σε μια επιφάνεια, η επανεκπομπή - από αυτή την οπή - θα συμβάλει επίσης στην συνολική πίεση στην θέση του δέκτη. Η συμβολή, στον τελικό υπολογισμό της πίεσης στην θέση του δέκτη, από την επιφάνεια (λόγω ανάκλασης) μπορεί να προσεγγιστεί επίσης ως ένα επιπρόσθετο γραμμικό φίλτρο που και αυτό χαρακτηρίζεται από μια κρουστική απόκριση $h_p(t)$. Η απόκριση της επιφάνειας μόνο από την ανάκλαση (δηλαδή η απόκριση χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η διάτρηση - ο συντονιστής -) μπορεί να υπολογισθεί από τα μετρημένα αποτελέσματα των κοινών εμπορικών ακουστικών υλικών, που χρησιμοποιούνται ευρέως.

Η ακουστική πίεση που προκύπτει από την συμβολή των ηχητικών κυμάτων από την πηγή και τον συντονιστή (οπή), λαμβάνοντας υπόψη και τις αντίστοιχες αποστάσεις, στη θέση του δέκτη (C), μπορεί να γραφεί από την υπέρθεση των πιέσεων κάθε πηγής, που προκύπτουν από την λύση της κυματικής εξίσωσης στον χώρο των τριών διαστάσεων για σφαιρική συμμετρία ως εξής:

$$p_C(r, t) = \frac{p_{source}(r, t)}{r_{AC}} e^{j(\omega t_{AC} - kr_{AC})} + \frac{p_{HRPout}(r, t)}{r_{BC}} e^{j(\omega t_{BC} - kr_{BC})} \quad (4.2.2)$$

όπου:

r_{AC} η απόσταση από το σημείο A μέχρι το σημείο C,

r_{BC} η απόσταση από το σημείο B μέχρι το σημείο C,

t_{AC} ο χρόνος για να φθάσει το σήμα από το σημείο A στο σημείο C και

t_{AB} ο χρόνος για να φθάσει το σήμα από το σημείο A στο σημείο B.

Σε πιο πρακτικές εξομοιώσεις, η αντίστοιχη καθυστέρηση από τη διαδρομή της ανάκλασης AB'C υπολογίζεται από την εικόνα A' της πηγής (διαδρομή A'C) (βλέπε σχήμα 4.2.3).

Σχήμα 4.2.3 Αναπαράσταση του μοντέλου του συντονιστή Helmholtz (HR) τοποθετημένο σε μια επιφάνεια, στο ελεύθερο πεδίο. Στο σχήμα φαίνονται οι διαδρομές των ακουστικών σημάτων.

Για να επεκτείνουμε την προσέγγιση του γραμμικού φίλτρου, και για λόγους απλότητας είναι θεμιτό να μελετήσουμε το σύστημα όταν η πηγή (στο σημείο A) εκπέμπει μια ιδανική συνάρτηση δέλτα του dirac: $p_{source}(r,t) \equiv \delta(r,t)$. Σε διακριτό χρόνο θα έχουμε την έκφραση της πίεσης: $p_{source}(n) \equiv \delta(n)$. Να σημειωθεί ότι n είναι το δείγμα του διακριτού χρόνου και για διευκόλυνση έχει αγνοηθεί η περίοδος δειγματοληψίας. Έτσι, η κρουστική απόκριση του συστήματος στη θέση του δέκτη C, θα προκύπτει από την υπέρθεση των κρουστικών αποκρίσεων, του απευθείας σήματος από την πηγή ($h_{AC}(n)$) και του σήματος από το σύστημα συντονιστή - επιφάνειας. Η κρουστική απόκριση του συστήματος στο ελεύθερο πεδίο σε διακριτό χρόνο συμβολίζεται ως $h_{HRC}(n)$ και εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$h_{HRC}(n) = h_{AC}(n) + h_{HRPC}(n) \quad (4.2.3)$$

Τυπικά αποτελέσματα που εξάγονται από το μοντέλο αυτό για την κρουστική απόκριση του συστήματος (η αξιολόγηση θα συζητηθεί λεπτομερώς στην παράγραφο 4.2.3) και της αντίστοιχης συνάρτησης μεταφοράς $|H(\omega_k)|$, φαίνονται στο σχήμα 4.2.4. Να σημειωθεί ότι η απόκριση συχνότητας σε οποιοδήποτε συγκεκριμένο σημείο (πχ. στο σημείο C) έχει εκτιμηθεί μέσω του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) ως εξής:

$$H_{HRC}(\omega_k) = \sum_{n=0}^{L_s-1} h_{HRC}(n) e^{-j\omega_k n} \quad (4.2.4)$$

όπου ω_k (rad/s) η γωνιακή συχνότητα σε διακριτό χρόνο και L_s το μήκος της ακολουθίας της απόκρισης του σήματος. Οι αποκρίσεις των διαδικασιών που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στο λογαριθμικό μέτρο του φάσματος της απόκρισης $20\log|H_{HRC}(\omega_k)|$. Παρόμοιες μετατροπές θα εφαρμόζονται σε όλα τα σχετικά σήματα που θα αναφέρονται στη συνέχεια της εργασίας.

Σχήμα 4.2.4 Τυπική απόκριση στο σημείο του δέκτη $C(0, 1, 2)$ ενός συντονιστή Helmholtz (με συχνότητα συντονισμού $f_0=120\text{Hz}$) ο οποίος βρίσκεται στο σημείο $B(0, 0, 0)$. Το σύστημα διεγείρεται από μία παντοκατευθυντική πηγή, η οποία βρίσκεται στο σημείο $A(0, 0, 1)$ και εκπέμπει τη στιγμή $t=0$ κρουστικό παλμό δ , χωρίς να ληφθεί υπόψη η ανάκλαση από την επιφάνεια **α**. Κρουστική απόκριση στο πεδίο του χρόνου **β**. Κρουστική απόκριση στο πεδίο της συχνότητας.

4.2.2 Μοντέλο παραμετρικού φίλτρου συντονιστή Helmholtz

Ένας ιδανικός συντονιστής Helmholtz αντιστοιχεί με ένα δευτέρας τάξης σύστημα, του οποίου η κρουστική απόκριση σε διακριτό χρόνο $h_{HR}(n)$ μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα IIR φίλτρο [4.2.4], όπως για παράδειγμα ένα φίλτρο που είναι και εμπρόσθιας τροφοδότησης και ανατροφοδοτούμενο. Ένα τέτοιο ψηφιακό φίλτρο, για ένα ιδανικό σήμα εισόδου $\delta(n)$ θα έχει ως έξοδο την κρουστική απόκριση του συστήματος $h_{HR}(n)$, και για κάθε σήμα εισόδου $x(n)$ το σήμα εξόδου θα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση διαφοράς:

$$y(n) = A_0x(n) + A_1x(n-1) + A_2x(n-2) - B_1y(n-1) - B_2y(n-2) \quad (4.2.5)$$

Έτσι σε αυτή την εξίσωση, αν η είσοδος $x(n)$ περιγράφει το προσπίπτον κύμα $p_{HRin}(n)$ (όπως έχει περιγραφεί στην προηγούμενη παράγραφο, 4.2.1) και οι μεταβλητές A_0, A_1, A_2, B_1 και B_2 εκφράζουν τις παραμέτρους της γεωμετρίας του συντονιστή, τότε η έξοδος $y(n)$ θα είναι η έξοδος της ακουστικής πίεσης του συντονιστή $p_{HRout}(n)$. Εάν τώρα υποθεθεί πως το σήμα εισόδου στο συντονιστή είναι μια ιδανική συνάρτηση $\delta(n)$, τότε η κρουστική απόκριση του συντονιστή $h_{HR}(n)$, σύμφωνα με την σχέση 4.2.5, μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$h_{HR}(n) = A_0\delta(n) + A_1\delta(n-1) + A_2\delta(n-2) - B_1\delta(n-1) - B_2\delta(n-2) \quad (4.2.6)$$

Για ένα τέτοιο φίλτρο οι μεταβλητές A_0, A_1, A_2, B_1 και B_2 , μπορούν να συσχετιστούν [4.2.5, 4.2.6] με τις παραμέτρους του φίλτρου (συχνότητα συντονισμού, ζώνη διέλευσης και εύρος ζώνης), μέσω των εκφράσεων:

$$A_0 = \frac{1 + a_p + k_{gain} - k_{gain}a_p}{2} \quad (4.2.7)$$

$$A_1 = b_p(1 + a_p) \quad (4.2.8)$$

$$A_2 = \frac{1 - k_{gain} + a_p + k_{gain}a_p}{2} \quad (4.2.9)$$

$$B_1 = A_1 \quad (4.2.10)$$

$$B_2 = a_p \quad (4.2.11)$$

$$a_p = \frac{1 - \tan\left(\frac{\pi B}{F_s}\right)}{1 + \tan\left(\frac{\pi B}{F_s}\right)} \quad (4.2.12)$$

$$b_p = -\cos\left(\frac{f_0}{F_s}\right) \quad (4.2.13)$$

όπου F_s (samples/sec) είναι ο ρυθμός δειγματοληψίας

όπου B (Hz) είναι το ζωνικό εύρος στη συχνότητα συντονισμού και μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση [4.2.7]:

$$B = \frac{f_0}{Q} \quad (4.2.14)$$

ο παράγοντας ποιότητας Q μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης [4.2.7]:

$$Q = \frac{2\pi f_0 M_A}{R_A} \quad (4.2.15)$$

Οι μεταβλητές M_A και R_A υπολογίζονται από τις εξισώσεις [4.2.7]:

$$M_A = \frac{\rho_0 L_{HR}}{\pi r_{HR}^2} \text{ σε } \frac{kg}{m^4} \quad (4.2.16)$$

ρ_0 είναι η πυκνότητα του μέσου διάδοσης (για τον αέρα $\rho_0 \approx 1,2 \frac{kg}{m^3}$)

$$R_A = \frac{\sqrt{4\pi f_0 \rho_0 \mu}}{\pi r_{HR}^2} \frac{L_{HR}}{r_{HR}} \frac{16}{3\pi} \text{ σε } \frac{g}{m^2 \text{ sec}}, \quad (4.2.17)$$

το μ εκφράζει ιξώδες. Για τον αέρα υπό κανονικές συνθήκες, $\mu \approx 1,8 \cdot 10^{-5} \frac{Ns}{m^2}$.

Θεωρώντας ότι ο συντονιστής συμπεριφέρεται τόσο ως απορροφητής, όσο και ως σκεδαστής ακουστικής ενέργειας στη συχνότητα συντονισμού, στο κοντινό πεδίο όπου κυριαρχεί η εκπομπή, το κέρδος του φίλτρου θα είναι θετικό, ενώ στο μακρινό πεδίο όπου κυριαρχεί η απορρόφηση, το κέρδος θα έχει αρνητικό πρόσημο κι έτσι αυτή η μείωση της ακουστικής ενέργειας -στο μακρινό πεδίο- σε dB μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$k_{gain} = Q \quad (4.2.18)$$

4.2.3 Βασισμένο σε φίλτρα μοντέλο διάτρητης επιφάνειας σε ελεύθερο πεδίο

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, όπως το μοντέλο στο πεδίο του χρόνου ενός συντονιστή που είναι τοποθετημένος σε μια ανακλαστική επιφάνεια που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, εξομοιώθηκε μία συστοιχία από συντονιστές Helmholtz (HR).

Οποιοσδήποτε συνδυασμός συντονιστών με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες κι έτσι διαφορετικές παραμέτρους φίλτρου μπορούν τυχαίως να τοποθετηθούν σε μια επιφάνεια δύο διαστάσεων και να αξιολογηθούν ακολουθώντας αυτή την προσέγγιση. Εδώ για μεγαλύτερη ευκολία, οι ιδανικοί συντονιστές Helmholtz τοποθετήθηκαν σε κανονική διάταξη, δηλαδή σε συμμετρικά ίσες αποστάσεις (d_{HR}) η μία από την άλλη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.5, δημιουργώντας μια συστοιχία από $N_x \times N_y$ στοιχεία (συντονιστών), όπου N_x και N_y είναι ο αριθμός των συντονιστών Helmholtz σε κάθε (x , y) διάσταση. Για ευκολία, αναλύουμε μια τετράγωνη επιφάνεια, έτσι για $N_x=N_y$ και το άθροισμα όλων των συντονιστών είναι $N=N_x N_y=N_x^2=N_y^2$. Σε μια τέτοια περίπτωση, η επιφάνεια που θα καταλαμβάνουν οι συντονιστές Helmholtz S_p ισούται με:

$$S_p = (N_x - 1)d_{HR}(N_y - 1)d_{HR} \xrightarrow{N_x=N_y=\sqrt{N}} S_p = (\sqrt{N} - 1)^2 d_{HR}^2 \quad (4.2.19)$$

Σχήμα 4.2.5 Μία διάτρητη επιφάνεια με 4x4 στοιχεία (συντονιστές Helmholtz): **α.** κάτοψη, **β.** τομή.

Όπως εύκολα μπορεί να επισημάνει κανείς, πρέπει να επιβληθεί ο ακόλουθος περιορισμός ώστε το μοντέλο να είναι υλοποιήσιμο:

$$2r_{HR} < d_{HR} \Rightarrow 2\sqrt{\frac{S_{HR}}{\pi}} < d_{HR} \Rightarrow S_{HR} < \frac{d_{HR}^2 \pi}{4} \quad (4.2.20)$$

Σχήμα 4.2.6 Αναπαράσταση της απόκρισης μιας διάτρητης επιφάνειας με 4x4 στοιχεία (συντονιστές Helmholtz) και των διαδρομών των σημάτων.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, για μοντέλα τέτοιου τύπου, μια παντοκατευθυντική πηγή και ένας δέκτης έχουν τοποθετηθεί στις Καρτεσιανές συντεταγμένες A (x_A , y_A , z_A) και C (x_C , y_C , z_C) αντίστοιχα. Υποθέτουμε ότι την χρονική στιγμή $t=0$ η πηγή εκπέμπει ένα ηχητικό σήμα με πλάτος ηχητικής πίεσης p_A . Η παντοκατευθυντική

πηγή εκπέμπει ένα ηχητικό σήμα κι έτσι το πρώτο σήμα που φτάνει στον δέκτη (συνεχής μπλε γραμμή, σχήμα 4.2.6) είναι ο απευθείας ήχος από την πηγή. Ο χρόνος καθυστέρησης σε δείγματα, για το μοντέλο σε διακριτό χρόνο, και η εξασθενημένη πίεση, εξαιτίας της σφαιρικής διάδοσης στον αέρα σε κάποια απόσταση, π.χ. από το σημείο A στο σημείο C, υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$n_{AC} = \frac{\sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 + (z_C - z_A)^2}}{c} F_s \quad (4.2.21)$$

$$p_C = \frac{p_A}{\sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 + (z_C - z_A)^2}} \quad (4.2.22)$$

όπου p_A η ακουστική πίεση στο σημείο A.

Ο ήχος που επανεκπέμπεται από κάθε συντονιστή αν υποθέσουμε ότι απέχει απόσταση r_{ABi} από την πηγή, εκπέμπεται με καθυστέρηση n_{ABi} όπου ο δείκτης i είναι ο αριθμός που αντιστοιχεί στον κάθε συντονιστή Helmholtz. Το πλάτος πίεσης φθάνει εξασθενημένο σε κάθε συντονιστή κατά $\frac{p_A}{r_{ABi}}$ λόγω της σφαιρικής διάδοσης. Στο επόμενο βήμα, το σήμα, που

ουσιαστικά είναι η εισερχόμενη ακουστική πίεση, φιλτράρεται από το ισοδύναμο φίλτρο του συντονιστή Helmholtz $h_{HR}(n)$ (εξίσωση 4.2.6) και δίδει το εξερχόμενο σήμα (εξερχόμενη ηχητική πίεση) από τον κάθε συντονιστή. Αυτό το σήμα ουσιαστικά από άποψη φυσικής, όπως αναλύθηκε ανωτέρω, είναι ένα παντοκατευθυντικό κύμα, το οποίο φθάνει στον δέκτη με την ανάλογη μείωση ενέργειας και καθυστέρηση λόγω της κάθε απόστασης (διακεκομμένες πράσινες γραμμές, σχήμα 4.2.6). Έτσι ο συνδυασμός των αποκρίσεων όλων των συντονιστών στο σημείο του δέκτη (σημείο C) υπολογίζεται ως εξής:

$$h_{THRC}(n) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{r_{ABi} + r_{BCi}} h_{HRC}(n - (n_{ABi} + n_{BCi})) \quad (4.2.23)$$

Στην προηγούμενη ανάλυση, μπορεί επίσης να υποτεθεί ότι η πίεση που ανακλάται από την υπόλοιπη επιφάνεια, μπορεί να θεωρηθεί ότι εκπέμπεται από το είδωλο της πηγής που είναι το συμμετρικό σημείο της πηγής με επίπεδο συμμετρίας την επιφάνεια. Ανάλογα δε με το υλικό της φιλτράρεται και με ένα ισοδύναμο φίλτρο, ώστε να εξομοιωθεί η απορρόφηση στις αντίστοιχες συχνотικές περιοχές (ροζ γραμμή με τελείες, σχήμα 4.2.6). Για να μελετήσουμε τη συμβολή της επιφάνειας στη θέση του δέκτη (σημείο C), η οποία εκφράζεται από την κρουστική απόκριση $h_{PC}(n)$, το σύστημα συστοιχία συντονιστών - επιφάνειας θα χαρακτηρίζεται από τον συνδυασμό των δύο γραμμικών συστημάτων, δηλαδή από την συνέλιξη των κρουστικών αποκρίσεων $h_{THRPC}(n)$ της συστοιχίας συντονιστών Helmholtz και συστήματος της επιφάνειας:

$$h_{THRPC}(n) = h_{THRC}(n) * h_{PC}(n) \quad (4.2.24)$$

Η ολοκληρωμένη απόκριση του συστήματος αν λάβουμε υπόψη μας και την απευθείας διαδρομή (απευθείας σήμα) στο δέκτη θα είναι:

$$h'_{THRPC}(n) = \frac{1}{r_{AC}} \delta(n - n_{AC}) + c_f [h_{THRC}(n) * h_{PC}(n)] \quad (4.2.25)$$

όπου c_f ένας παράγοντας βαθμονόμησης που εξαρτάται από τον παράγοντα N (αριθμός των συντονιστών) ώστε να υπολογιστεί η συνδυασμένη επίδραση των N σημάτων από τους συντονιστές Helmholtz που φτάνουν στον δέκτη. Ακριβώς επειδή τα σήματα που φθάνουν στην πηγή από τους συντονιστές αυξάνονται, όσο αυξάνεται ο αριθμός τους, ο όρος

$h_{THRC}(n) * h_{PC}(n)$ της εξίσωσης 4.2.25 μεγαλώνει ανάλογα. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι σχετικές στάθμες πίεσης που φθάνουν στον δέκτη από: την πηγή (απ' ευθείας σήμα), τους συντονιστές και από την ανάκλαση της επιφάνειας, για έναν (σχήμα 4.2.7α) και τέσσερις συντονιστές (σχήμα 4.2.7β) αντίστοιχα. Είναι ευδιάκριτη η αύξηση της στάθμης του σήματος από τους συντονιστές (μπλε διακεκομμένη με τελείες γραμμή) όταν αυξάνεται ο αριθμός των συντονιστών (N).

Σχήμα 4.2.7 Σχετικές στάθμες πίεσης που φθάνουν στον δέκτη από: την πηγή (απευθείας σήμα), τους συντονιστές και από την ανάκλαση της επιφάνειας χωρίς να ισοσταθμίζονται τα σήματα από τους συντονιστές **α.** για έναν συντονιστή **β.** τέσσερις συντονιστές.

Πολλαπλασιάζοντας με τον παράγοντα βαθμονόμησης c_f τον όρο $h_{THRC}(n) * h_{PC}(n)$ της εξίσωσης 4.2.25, η σχετική στάθμη πίεσης από τους συντονιστές στον δέκτη ισοσταθμίζεται βάση της μέγιστης σχετικής στάθμης πίεσης του σήματος από την ανάκλαση της επιφάνειας (σχήμα 4.2.8). Έτσι ο αριθμός των συντονιστών (N) δεν επηρεάζει την στάθμη πίεσης του σήματος των συντονιστών στον δέκτη.

Σχήμα 4.2.8 Σχετικές στάθμες πίεσης που φθάνουν στον δέκτη από: την πηγή (απευθείας σήμα), τους συντονιστές και από την ανάκλαση της επιφάνειας με ισοσταθμισμένα σήματα από τους συντονιστές **α.** για έναν συντονιστή **β.** τέσσερις συντονιστές.

Το ολοκληρωμένο διάγραμμα τμημάτων των βημάτων της διαδικασίας φαίνεται στο σχήμα 4.2.9.

Σχήμα 4.2.9 Διάγραμμα για το προτεινόμενο μοντέλο φίλτρου μιας απορροφητικής διάτρητης επιφάνειας που περιέχει μια συστοιχία από N συντονιστές Helmholtz. Αυτό το διάγραμμα αφορά το ιδανικό μοντέλο σε ελεύθερο πεδίο. Για την περίπτωση του διάχυτου πεδίου, η είσοδος θα είναι η κρουστική απόκριση ενός ιδανικού διάχυτου πεδίου, ενώ η απευθείας διαδρομή αγνοείται (βλέπε παράγραφο 4.2.4).

Εάν το απευθείας σήμα από την πηγή ληφθεί υπόψη, τότε, λόγω της αρκετά μικρής χρονικής περιόδου που μεσολαβεί ανάμεσα από το πρώτο (πηγή - δέκτης) και το δεύτερο σήμα (πηγή - ανάκλαση στην επιφάνεια - δέκτης) που φθάνουν στο δέκτη, παρατηρείται η επίδραση του comb filtering όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2.10β (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), που απεικονίζεται ενδεικτικά η απορρόφηση σε σχέση με τη συχνότητα. Στο σχήμα 4.2.10α απεικονίζεται η κρουστική απόκριση μιας διάτρητης επιφάνειας με $N=16$, $r_{HR}=0.005$ m, $V_{HR}=0.0003024$ m³, $L_{HR}=0.05$ m ($f_0 \approx 115$ Hz) και $d_{HR}=0.08$ m. Ακόμη διακρίνονται: το απευθείας σήμα, το σήμα λόγω της ανάκλασης στην επιφάνεια και τα σήματα από τις οπές της επιφάνειας, δηλαδή τους συντονιστές Helmholtz. Στο σχήμα 4.2.10β φαίνεται η απόκριση στο πεδίο της συχνότητας (η οποία προκύπτει από τον FFT της κρουστικής απόκρισης) του προαναφερθέντος συστήματος χωρίς να ληφθεί υπόψη το απευθείας σήμα (μπλε διακεκομμένη γραμμή) και λαμβάνοντας υπόψη το απευθείας σήμα (κόκκινη συνεχής γραμμή).

Σχήμα 4.2.10 Συνολική σχετική στάθμη σημάτων που φθάνουν στον δέκτη από: την πηγή (απευθείας σήμα), από την ανάκλαση στην επιφάνεια και τους συντονιστές **α.** στο πεδίο του χρόνου **β.** στο πεδίο της συχνότητας.

Οι αποκρίσεις στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο συχνότητας, για μια 4x4 διάτρητη ηχοαπορροφητική επιφάνεια, απεικονίζονται στο σχήμα 4.2.11. Γι' αυτό το παράδειγμα, οι παράμετροι φίλτρου του συντονιστή Helmholtz ήταν: $r_{HR}=0.005$ m, $V_{HR}=0.0003024$ m³, $L_{HR}=0.05$ m έτσι $f_0 \approx 115$ Hz και $d_{HR}=0.08$ m, ενώ το υλικό της επιφάνειας θεωρήθηκε να είναι ένα υλικό με τυπικό συντελεστή απορρόφησης (ανά τριτοκτάβα) που απεικονίζεται στον παρακάτω πίνακα.

Κεντρική συχνότητα τριτοοκτάβας (Hz)	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500
Συντελεστής απορρόφησης	0	0.01	0.02	0.04	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.20

Πίνακας 4.2.1 Τιμές του συντελεστή απορρόφησης ανά ζώνη τριτοκτάβας (μέχρι 500 Hz) για την εξομοιωμένη επιφάνεια.

Σχήμα 4.2.11 Απόκριση στη θέση C (0, 1, 2) του δέκτη για μια συστοιχία συντονιστών Helmholtz (με $f_0=120$ Hz) 4x4 στοιχείων, διάτρητης επιφάνειας στο σημείο B (0, 0, 0) και πηγή ευρισκόμενη στη θέση A (0, 0, 1) η οποία εκπέμπει την $t=0$ συνάρτηση δ. **α.** κρουστική απόκριση **β.** απόκριση στο πεδίο της συχνότητας.

4.2.4 Μοντέλο φίλτρων για διάτρητη επιφάνεια σε διάχυτο πεδίο

Στο προηγούμενο κεφάλαιο ασχοληθήκαμε με την περιγραφή του μοντέλου της διάτρητης επιφάνειας, βασισμένο σε φίλτρα, και του υπολογισμού της αντίστοιχης απόκρισής του σε ελεύθερο πεδίο. Παρ' όλ' αυτά, όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή του 4^{ου} κεφαλαίου, οι απορροφητικές ιδιότητες τέτοιων επιφανειών πρέπει να μετρηθούν μέσω της μείωσης της ηχητικής ενέργειας που επιτυγχάνεται κάτω από ιδανικές συνθήκες διάχυτου πεδίου. Όπως είναι γνωστό, οι συνθήκες αυτές υπαγορεύουν τυχαίους χρόνους άφιξης και γωνίες πρόσπτωσης για τα ανακλώμενα στοιχεία. Ακολουθώντας, λοιπόν, το προτεινόμενο μοντέλο, μια τέτοια συνθήκη θα πραγματοποιούνταν, υποθέτοντας ότι η είσοδος - στο εξομοιωμένο σύστημα - δεν είναι μια ιδανική συνάρτηση δέλτα (δ) (εξίσωση 4.2.25), αλλά μια συνεχής διέγερση λευκού θορύβου για χρόνο ικανό να δημιουργήσει διάχυτο πεδίο σε κατάσταση steady state. Η πηγή λειτουργεί μέχρι την χρονική στιγμή $t=0$ και έπειτα ακαριαία σταματά να εκπέμπει. Την χρονική στιγμή μηδενισμού της πηγής το ηχητικό πεδίο είναι 100% διάχυτο και ομοιόμορφα κατανεμημένο στον χώρο. Μετά τη παύση της πηγής, η στάθμη του διάχυτου ηχητικού πεδίου φθίνει εκθετικά με τον χρόνο, η δε κρουστική απόκριση μπορεί να υπολογισθεί από την αποσυνέλιξη της διέγερσης και την έκφραση της πίεσης στο σημείο λήψης, η οποία μπορεί να γραφεί σύμφωνα με την εξίσωση [4.2.8]:

$$h_r(t) = w(t)e^{-\xi_r t} \quad (4.2.26)$$

όπου $w(t)$ η πυκνότητα ενέργειας του λευκού θορύβου, σε συνεχή χρόνο, ξ_r σταθερά ανάλογη με την σταθερά απόσβεσης: $\xi_r = 2 \frac{3 \ln 10}{T_r}$ και T_r ο χρόνος αντήχησης του δωματίου.

Σε διακριτό χρόνο η εξίσωση 4.2.26 μπορεί να γραφεί:

$$h_r(n) = w(n)e^{-\xi_r n} \quad (4.2.27)$$

Για λόγους απλοποίησης και δεδομένου ότι σε ένα τέτοιο ιδανικό διάχυτο πεδίο η πίεση στη θέση του δέκτη δεν επηρεάζεται από το σήμα της απευθείας διαδρομής, δεν έχει ληφθεί υπόψη το εν λόγω σήμα. Έτσι, η απόλυτη απόκριση του συστήματος της διάτρητης επιφάνειας, σε ένα χώρο ιδανικού διάχυτου πεδίου (εξίσωση 4.2.25) σε κάποιο σημείο του δωματίου, μπορεί να εκφραστεί από τη συνέλιξη των δύο κρουστικών αποκρίσεων (της καλιμπραρισμένης κρουστικής του συστήματος συντονιστών - επιφάνειας και της κρουστικής του δωματίου χωρίς την απορροφητική επιφάνεια):

$$h''_{THRPC}(n) = [c_f h_{THRPC}(n)] * h_r(n) \quad (4.2.28)$$

Σ' αυτή την περίπτωση, η διαδικασία μοντελοποίησης θα ακολουθήσει επίσης το διάγραμμα τμημάτων όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.9. Όταν το σύστημα διεγερθεί από έναν ιδανικό παλμό (συνάρτηση δ), όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 4.2.3, και ληφθούν υπόψη μόνο το απευθείας σήμα, το σήμα από την ανάκλαση στην επιφάνεια και τα σήματα από τις διατρήσεις - αγνοώντας τις ανακλάσεις του δωματίου - εξομοιώνεται ουσιαστικά μια διάτρητη επιφάνεια σε ελεύθερο πεδίο. Με αυτή τη λογική, όταν η είσοδος είναι η κρουστική απόκριση του ιδανικού διάχυτου πεδίου του δωματίου $h_r(n)$ (βλέπε εξίσωση 4.2.27), τότε η έξοδος θα είναι η κρουστική απόκριση $h''_{THRPC}(n)$ (βλέπε εξίσωση 4.2.28), που περιγράφει την εξομοίωση της διάτρητης επιφάνειας στο διάχυτο πεδίο.

4.2.5 Ο συντελεστής απορρόφησης της ηχοαπορροφητικής διάτρητης επιφάνειας

Για να υπολογισθούν οι απορροφητικές ιδιότητες των μοντελοποιημένων διάτρητων επιφανειών, σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο, εξομοιώθηκε ένας θάλαμος, με χρόνο αντήχησης T_r , στον οποίο υπήρχε ένα απόλυτα διάχυτο ηχητικό πεδίο. Η απόκριση του χώρου αυτού συμβολίζεται με h_r και υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση 4.2.27. Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, η τοποθέτηση μιας διάτρητης επιφάνειας στο χώρο αυτό, τροποποιεί τον χρόνο αντήχησης σε T_p εξαιτίας της αύξησης της απορρόφησης. Ο τροποποιημένος χρόνος αντήχησης μπορεί να υπολογιστεί μέσω της κρουστικής απόκρισης του χώρου, όπως περιγράφεται παραπάνω, και είναι σύμφωνη με τους κανονισμούς ISO 354. Η νέα κρουστική απόκριση του χώρου με τη διάτρητη επιφάνεια συμβολίζεται ως: $h''_{THRPC}(n)$. Τα εξομοιωμένα μοντέλα έχουν ως στόχο την πρόβλεψη του συντελεστή απορρόφησης του συστήματος συντονιστών - επιφάνειας υπό τέτοιες ιδανικές συνθήκες διάχυτου πεδίου, όπως υπαγορεύει ο κανονισμός ISO 354.

Για τις αναλύσεις και τα πειράματα, σύμφωνα με την τυποποίηση που προτείνει ο κανονισμός ISO 354 [4.1.13], χρησιμοποιήθηκαν ζώνες τριτοκτάβας. Έτσι η κρουστική απόκριση $h''_{THRPC}(n)$ αναλύθηκε σε ζώνες τριτοκτάβας ώστε να αξιολογηθεί ο χρόνος αντήχησης T_p στις αντίστοιχες συχνотικές ζώνες. Όπως, επίσης, απαιτείται από το πρότυπο ISO 354, για τον περιορισμό της τυχαιότητας που εισαγάγει ο λευκός θόρυβος, χρησιμοποιήθηκε μια επαναλαμβανόμενη ακολουθία από ιδανικές αποκρίσεις ως είσοδο, οι οποίες οδηγούνται στο εξομοιωμένο σύστημα. Τέλος, παίρνοντας μέσους όρους από τα κλασματικά, ανά τριτοκτάβα, σήματα εξόδου υπολογίζεται η απόκριση του συστήματος ανά συχνотική περιοχή.

Γι' αυτές τις εξομοιώσεις, υπολογίστηκε η απόκριση διάτρητης επιφάνειας με $N=2500$ (συντονιστές Helmholtz), $S_p=2\text{ m}^2$ και συχνότητα συντονισμού $f_0=120\text{Hz}$, τοποθετώντας την σε έναν εξομοιωμένο θάλαμο αντήχησης με χρόνο αντήχησης $T_r=3\text{sec}$ και όγκο $V_r=150\text{m}^3$. Τα τυπικά αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 4.2.12. Ο μέσος όρος της εξόδου σε ζώνες 1/3 της οκτάβας, εξαιτίας της τροποποιημένης απόκρισης δωματίου $h''_{THRPC}(n)$, που επικεντρώνεται - για καλύτερη απεικόνιση γύρω από την ενεργή περιοχή του συντονιστή - παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.12α. Να σημειωθεί ακόμη ότι γι' αυτά τα πειράματα, το υλικό της επιφάνειας (χωρίς τους συντονιστές) θεωρήθηκε ανεξάρτητο της συχνότητας, έχοντας για όλο το φάσμα συντελεστή απορρόφησης $\overline{a_p}=0.1$.

Από κάθε κρουστική απόκριση κάθε συχνотικής ζώνης, ο χρόνος αντήχησης T_p υπολογίζεται βάση της μεθόδου ολοκλήρωσης του Schroeder [4.2.9], όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.2.12β.

α.

β.

γ.

Σχήμα 4.2.12 Τυπικά αποτελέσματα για εξομοίωση σε διάχυτο πεδίο για μια ηχοαπορροφητική διάτρητη επιφάνεια 50x50 στοιχείων (συντονιστές Helmholtz). Η συχνότητα συντονισμού κάθε συντονιστή είναι $f_0=120\text{Hz}$ και ο χρόνος αντήχησης δωματίου $T_r=3\text{sec}$. Ο ανεξάρτητος συχνότητας συντελεστής απορρόφησης για την επιφάνεια ορίστηκε $a_p=0.1$.

- α.** Μέσος όρος εξομοιωμένων πιέσεων εξόδου από φίλτρο ζώνης 1/3 οκτάβας (εδώ απεικονίζονται μόνο οι σχετικές πιέσεις σε dB γύρω από τη συχνότητα συντονισμού, f_0)
β. Ρυθμός μείωσης της ενέργειας στην τριτοκτάβα της συχνότητας συντονισμού (f_0) σε dB
γ. Ο υπολογισμένος εξαρτημένος από τη συχνότητα συντελεστής απορρόφησης του συστήματος συστοιχία συντονιστών Helmholtz - επιφάνεια (βλέπε παράγραφο 4.2.5).

Έστω δωμάτιο όγκου V_r , με συνολική επιφάνεια S_r , για απλούστευση υποθέτουμε ότι όλες οι επιφάνειες έχουν συντελεστή απορρόφησης a . Έτσι ο χρόνος αντήχησης σύμφωνα με τον τύπο του Sabine υπολογίζεται από τη σχέση [4.2.10]:

$$T_r = \frac{0.161V_r}{\sum_i S_{r_i} a} \quad (4.2.29)$$

Εάν η διάτρητη επιφάνεια μοντελοποιηθεί, όπως μοντελοποιήθηκε η επιφάνεια S_p προηγουμένως, και τοποθετηθεί σε έναν τοίχο ενός δωματίου, τότε ο χρόνος αντήχησης θα αλλάξει σε T_p , αφού ο μέσος όρος του συντελεστή απορρόφησης θα επηρεαστεί από την επιπρόσθετη απορρόφηση, λόγω του νέου απορροφητικού στοιχείου που προστέθηκε. Σύμφωνα με το ISO 354, ο συντελεστής απορρόφησης της επιπρόσθετης επιφάνειας μπορεί να υπολογιστεί από την ισοδύναμη επιφάνεια απορρόφησης ήχου:

$$A = 55.3 \frac{V_r}{c} \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_r} \right), \quad a_p = \frac{A}{S_p} \quad (4.2.30)$$

όπου a_p ο νέος συντελεστής απορρόφησης.

Να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την τυποποίηση ISO, αυτή η ανάλυση αναφέρεται στα σήματα που έχουν φιλτραριστεί σε ζώνες 1/3 οκτάβας. Όπως, επίσης, έχει ήδη περιγραφεί στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, αυτή ήταν η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το παράδειγμα του σχήματος 4.2.12, παίρνοντας μια τυπική απλή διάτρητη επιφάνεια από γύψο (με συντελεστή απορρόφησης σε όλο το συχνοτικό φάσμα $\overline{a_p} = 0.1$) και συνδυάζοντάς την με μια συστοιχία συντονιστών $N=50 \times 50$. Ο υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης για το συνδυασμένο σύστημα συντονιστής - επιφάνεια φαίνεται στο σχήμα 4.2.12γ.

Η πλήρης διαδικασία για την προτεινόμενη εκτίμηση του συντελεστή απορρόφησης από το μοντέλο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 4.2.13 Διάγραμμα τμημάτων που απεικονίζει τα βήματα για την προσομοίωση του διάχυτου πεδίου μέσω της απόκρισης στο θάλαμο βάσης της αντήχησης του (εξίσωση 4.2.26), την επίδραση της διάτρητης επιφάνειας μέσα στο θάλαμο (εξίσωση 4.2.28), η ανάλυση 1/3 οκτάβας των αντίστοιχων λύσεων και με την εκτίμηση του χρόνου αντήχησης ο υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης της διάτρητης επιφάνειας (εξίσωση 4.2.30).

4.3 Αποτελέσματα

4.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με μετρημένα συστήματα

Όπως σχολιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η προτεινόμενη προσέγγιση μας επιτρέπει τον αποτελεσματικό υπολογισμό της απόκρισης της απορροφητικής διάτρητης επιφάνειας σε ελεύθερο αλλά και σε διάχυτο πεδίο. Εδώ τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου, ακολουθώντας την τυποποιημένη διαδικασία του ISO 354 (όπως συζητήθηκε στις παραγράφους 4.2.4 και 4.2.5) θα συγκριθούν με δημοσιευμένα δεδομένα για τον συντελεστή απορρόφησης μίας μετρημένης εμπορικής διάτρητης επιφάνειας [4.3.1], όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.1.

Γι' αυτήν την σύγκριση, (στην περίπτωση της εξομοίωσης έγινε χρήση των απορροφητικών ιδιοτήτων της επιφάνειας) τα στοιχεία ελήφθησαν από μετρήσεις σε συγκεκριμένο προϊόν, όπως έχουν δημοσιευθεί από τον κατασκευαστή και έχουν πιστοποιηθεί από κατάλληλο εργαστήριο [4.3.1]. Το εμπορικό προϊόν που χρησιμοποιήθηκε για την σύγκριση των αποτελεσμάτων ήταν το *Quadra 5-40* της *Rekton Akustik*. Από τα δημοσιευμένα, λοιπόν, δεδομένα, η ολική επιφάνεια του υπό εξέταση προϊόντος είναι $S_p = 12\text{m}^2$, με ποσοστό διάτρησης 1.56%, το οποίο μας οδηγεί στον υπολογισμό της ολικής επιφάνειας των στομών των συντονιστών (επιφάνεια των οπών) $S_{HR} = 2.5 \times 10^{-5} \text{m}^2$. Το πάχος της επιφάνειας είναι $L'_{HR} = 1.6 \times 10^{-2}\text{m}$, που αντιστοιχεί στο μήκος του λαιμού του κάθε συντονιστή. Το υλικό σύμφωνα με τον κατασκευαστή και τις πιστοποιημένες μετρήσεις έχει τοποθετηθεί σε απόσταση 50mm από τον τοίχο. Από τον διαθέσιμο χώρο μεταξύ του υλικού και της επιφάνειας που αυτό τοποθετήθηκε υπολογίστηκε ο διαθέσιμος όγκος για κάθε συντονιστή, ο οποίος αποτελεί τον όγκο της κοιλότητας συντονισμού (ο αριθμός των συντονιστών Helmholtz $N = 7596$). Από την σχέση που δίνει την συχνότητα συντονισμού προέκυψε ότι αυτή είναι $f_0 = 242\text{Hz}$. Το υλικό της διάτρητης επιφάνειας είναι το κόντρα πλακέ με συντελεστές απορρόφησης, που σύμφωνα με την υφισταμένη βιβλιογραφία, δίνονται στον πίνακα 4.3.1. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εταιρία περιγράφει μόνο το υλικό του προϊόντος και δίνει τον συνιστάμενο συντελεστή απορρόφησης της επιφάνειας με την διάτρηση, χωρίς να δίνει στοιχεία για την απορρόφηση της άνευ διάτρησης επιφάνειας.

Η εξομοίωση υλοποιήθηκε για διάχυτο πεδίο (βλέπε παραγράφους 4.2.4 και 4.2.5), υποθέτοντας ότι έχουμε ένα θάλαμο αντήχησης με $V_r = 185\text{m}^3$ και $S_r = 194\text{m}^2$. Όσον αφορά στο μέσο όρο των αποκρίσεων, ο αλγόριθμος της εξομοιωμένης διαδικασίας με φίλτρα έτρεξε 800 φορές, όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Τα συγκριτικά αποτελέσματα σε ζώνες 1/3 οκτάβας για τον μετρημένο και εκτιμηθέντα -με την προτεινόμενη μέθοδο- συντελεστή απορρόφησης, φαίνονται στο σχήμα 4.3.2, υποδεικνύοντας ένα μικρό σφάλμα ανάμεσα στα μετρημένα και εξομοιωμένα δεδομένα, ειδικά γύρω από την περιοχή της συχνότητας συντονισμού της ηχοαπορροφητικής διάτρητης επιφάνειας. Παρατηρείται μια διαφορά στις υψηλότερες συχνότητες λόγω της ανακριβούς εκτίμησης της απορρόφησης της συγκεκριμένης επιφάνειας (πίνακας 4.3.1). Τέτοιες διαφορές, λόγω του υλικού της επιφάνειας, μπορεί να μειωθούν εάν είναι γνωστά τα ακριβή ακουστικά χαρακτηριστικά του υλικού πριν από την εισαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου.

Σχήμα 4.3.1 Χαρακτηριστικά της διάτρητης επιφάνειας Quadra 5-40 της Rekton Akustik.

κεντρική συχνότητα τριτοκτάβας (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
συντελεστής απορρόφησης	0.28	0.2	0.1	0.1	0.08	0.08

Πίνακας 4.3.1 Τιμές του συντελεστή απορρόφησης σε ζώνες 1/3 οκτάβας του κοντραπλακέ για την εξομοίωση της επιφάνειας (χωρίς οπές).

Σχήμα 4.3.2 Σύγκριση τυπικών αποτελεσμάτων των τιμών του συντελεστή απορρόφησης μιας εμπορικής διάτρητης ηχοαπορροφητικής επιφάνειας που υπολογίστηκαν από το προτεινόμενο εξομοιωμένο μοντέλο και των δημοσιευμένων μετρήσεων από την εταιρία που προέκυψαν μέσω μετρήσεων από πιστοποιημένο εργαστήριο.

4.3.2 Μοντέλο διάτρητης επιφάνειας με μεικτή διάτρηση

Εάν υποθέσουμε μια επιφάνεια με δύο διαφορετικού τύπου διατρήσεις, η τελευταία θα είχε και δύο διαφορετικές συχνότητες συντονισμού (f_{01} , f_{02}) (σχήμα 4.3.3). Εάν αυτές οι

συχνότητες βρίσκονται σε κοντινή περιοχή, τότε το συχνοτικό εύρος της απορρόφησης που θα επιφέρει στο ακουστικό πεδίο η παραπάνω επιφάνεια, θα πρέπει να μεγαλώσει [4.3.2]. Έτσι, για να μελετηθεί η επίδραση δύο τύπων συντονιστών, όσον αφορά στο συχνοτικό εύρος απορρόφησης, πραγματοποιήθηκαν τέσσερις εξομοιώσεις. Στην πρώτη όλοι οι συντονιστές είχαν την ίδια επιφάνεια στομίου $S_{HR_1} = 0,00283\text{m}^2$ (μαύρη συνεχής γραμμή, σχήμα 4.3.4). Στην δεύτερη εξομοίωση η επιφάνεια των μισών συντονιστών παρέμεινε $S_{HR_1} = 0,00283\text{m}^2$, των υπόλοιπων, όμως, μεταβλήθηκε σε $S_{HR_2} = 0,00264\text{m}^2$. Έτσι η συστοιχία έχει δύο συχνότητες συντονισμού $f_{01}=165\text{Hz}$ και $f_{02}=161\text{Hz}$ και η συχνοτική της απόκριση φαίνεται στο σχήμα 4.3.4 (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή). Ομοίως, οι επόμενες εξομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με σταθερή επιφάνεια του στομίου των μισών συντονιστών S_{HR_1} , ενώ οι υπόλοιποι είχαν επιφάνεια $S_{HR_3}=0,00269\text{m}^2$, άρα $f_{03}=162\text{Hz}$, στην τρίτη (μπλε γραμμή με τελείες, σχήμα 4.3.4) και με $S_{HR_4}=0,00273\text{m}^2$, άρα $f_{04}=163\text{Hz}$, στην τέταρτη (γαλαζοπράσινη γραμμή με τελείες και παύλες, σχήμα 4.3.4).

Σχήμα 4.3.3 Κάτοψη συστοιχίας δύο διαφορετικών τύπων συντονιστών Helmholtz 4x4.

Σχήμα 4.3.4 Συχνοτική απόκριση τεσσάρων μοντέλων διάτρητων επιφανειών (10x10) με δύο διαφορετικούς τύπους συντονιστών.

Όπως, λοιπόν, φαίνεται στην γραφική 3.2.2. εάν η διαφορά των δύο συχνοτήτων συντονισμού της συστοιχίας είναι μεγάλη (4Hz στη 2^η εξομοίωση, κόκκινη γραμμή γραφικής 3.2.2.), στις ενδιάμεσες τιμές η απορρόφηση μηδενίζεται. Έτσι ουσιαστικά σε αυτή την περίπτωση δεν επιτυγχάνεται ο σκοπός (μεγάλωμα συχνοτικού εύρους απορρόφησης) και ουσιαστικά η συστοιχία συμπεριφέρεται ως συσκευή ηχοαπορρόφησης δύο ξεχωριστών

συχνοτήτων ($f_{01}=165\text{Hz}$ και $f_{02}=161\text{Hz}$), με μικρότερη ανά συχνότητα απορρόφηση από εκείνη των όμοιων συντονιστών. Στις άλλες δύο εξομοιώσεις, παρ' όλο που η απορρόφηση παραμένει, όπως ήταν αναμενόμενο, στις ίδιες περίπου τιμές, το συχνοτικό εύρος απορρόφησης αυξάνει 4Hz περίπου σε σχέση με την πρώτη εξομοίωση (μαύρη γραμμή σχήματος 4.3.4). Εδώ παρ' όλο που μειώνεται η απορρόφηση ανάμεσα στις δύο συχνότητες συντονισμού f_{01} και f_{02} , δε φθάνει σε μηδενικές τιμές. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί πως οι δύο τελευταίες συστοιχίες μπορούν να λειτουργήσουν ως συστοιχίες συντονιστών Helmholtz με μεγαλύτερο συχνοτικό εύρος απορρόφησης.

4.3.3 Η συμβολή των σημάτων των συντονιστών σε σχέση με τη γωνία του δέκτη

Στο σχήμα 4.3.5 απεικονίζεται μια συστοιχία συντονιστών ($N=10 \times 10$). Για να μελετηθεί η επίδραση των συντονιστών σε σχέση με τη γωνία που βρίσκεται ο δέκτης, αγνοήθηκε το απευθείας σήμα καθώς και το σήμα από την ανάκλαση στην επιφάνεια. Ο δέκτης μετατοπίζεται κατά μήκος ενός τόξου 180° με βήμα 1° . Το τόξο έχει κέντρο το κέντρο της συστοιχίας των συντονιστών και ακτίνα 1m. Η πηγή βρίσκεται πάνω από το κέντρο της συστοιχίας σε ύψος 0.2m και εκπέμπει ιδανικό κρουστικό παλμό (συνάρτηση δ).

Η συχνότητα συντονισμού των συντονιστών (f_0) είναι 105Hz (σχήμα 4.3.6), 115Hz (σχήμα 4.3.7), 125Hz (σχήμα 4.3.8) και 135Hz (σχήμα 4.3.9). Η κόκκινη συνεχής γραμμή, στα σχήματα 4.3.7 - 4.3.9, απεικονίζει την περίπτωση ενός συντονιστή και παρατίθεται εδώ διότι η κατευθυντικότητα του είναι ανεξάρτητη της γωνιακής μετατόπισης του δέκτη όπως προβλέπεται και θεωρητικά. Έτσι μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων, δηλαδή επίδρασης της γωνίας του δέκτη, μιας συστοιχίας (10×10) συντονιστών σε σχέση με μια ισότροπη πηγή. Η διακεκομμένη με ανοιχτό πράσινο γραμμή στα παρακάτω σχήματα αντιστοιχεί σε απόσταση συντονιστών $d_{HR}=0.02\text{m}$, η μπλε γραμμή με τελείες σε απόσταση συντονιστών $d_{HR}=0.04\text{m}$ και η πράσινη γραμμή με τελείες και παύλες σε απόσταση συντονιστών $d_{HR}=0.08\text{m}$. Συγκρίνοντας τα σχήματα (4.3.7 - 4.3.9) εύκολα παρατηρείται ότι στην συχνότητα συντονισμού η ενέργεια του ακουστικού πεδίου είναι αισθητά μειωμένη σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης φαίνεται καθαρά η επίδραση του βαθμού διάτρησης της επιφάνειας στην κατευθυντικότητα των στοιχείων.

Σχήμα 4.3.5 Όψη συστοιχίας συντονιστών 10×10 με τον δέκτη να μετατοπίζεται κατά 1° σε κάθε μέτρηση.

Σχήμα 4.3.6 Πολικό διάγραμμα για διαφορετικές αποστάσεις των συντονιστών, σε διαφορετικές συχνότητες με συχνότητα συντονισμού των συντονιστών $f_0=105\text{Hz}$.

Σχήμα 4.3.7 Πολικό διάγραμμα για διαφορετικές αποστάσεις των συντονιστών, σε διαφορετικές συχνότητες με συχνότητα συντονισμού των συντονιστών $f_0=115\text{Hz}$.

Σχήμα 4.3.8 Πολικό διάγραμμα για διαφορετικές αποστάσεις των συντονιστών, σε διαφορετικές συχνότητες με συχνότητα συντονισμού των συντονιστών $f_0=125\text{Hz}$.

Σχήμα 4.3.9 Πολικό διάγραμμα για διαφορετικές αποστάσεις των συντονιστών, σε διαφορετικές συχνότητες με συχνότητα συντονισμού των συντονιστών $f_0=135\text{Hz}$.

4.3.4 Πολυπλοκότητα υπολογισμών

Όπως έχει συζητηθεί στην εισαγωγή, η προτεινόμενη προσέγγιση μέσω φίλτρων, μας προσφέρει μια αποτελεσματική εναλλακτική για την εξομοίωση ηχοαπορροφητικών συστημάτων διάτρητων επιφανειών. Μια τυπική σύγκριση του χρόνου που χρειάζεται ένας σύγχρονος υπολογιστής για την αριθμητική επίλυση συγκρίνοντας την μέθοδο FEM [4.1.11] με την προτεινόμενη μέθοδο της οποίας η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab [4.3.3], για διαφορετικό αριθμό στοιχείων συντονιστή (N), φαίνεται στον πίνακα 4.3.2. Να σημειωθεί ότι όταν ακολουθείται η προτεινόμενη μέθοδος, αξιολογείται μια κρουστική απόκριση του εξομοιωμένου συστήματος, που οδηγεί σε περαιτέρω απλούστευση των ιδιοτήτων στην αλυσίδα του αλγορίθμου του συστήματος. Ακόμη, το προτεινόμενο μοντέλο δε θα χρειαζόταν περισσότερη υπολογιστική ισχύ για να υπολογίσει το συντελεστή απορρόφησης σε υψηλές συχνότητες, σε αντίθεση με το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων, κατά το οποίο όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου 2 (2.1), όσο αυξάνει η συχνότητα της πηγής που διεγείρει το σύστημα, τόσο το πλέγμα του μοντέλου πρέπει να γίνει πιο πυκνό κι αυτό ακριβώς αυξάνει την απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ.

	$N=1$	$N=16$	$N=64$	$N=2500$
μοντέλο εξομοίωσης μέσω μεθόδου FEM	4 ώρες	17 ώρες	2 ημέρες	αδύνατη η επίλυση
μοντέλο εξομοίωσης μέσω μεθόδου φίλτρων	50 δευτερόλεπτα	4 λεπτά	15 λεπτά	20 ώρες

Πίνακας 4.3.2 Μια τυπική σύγκριση του χρόνου που χρειάζεται ένας σύγχρονος υπολογιστής για την αριθμητική αξιολόγηση N στοιχείων (συντονιστών Helmholtz) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και τη προτεινόμενη μέθοδο εξομοίωσης μέσω φίλτρων. Και στις δύο περιπτώσεις οι υπολογισμοί αντιστοιχούν στην περιοχή συχνοτήτων από 0 έως 500Hz.

4.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία καινοτόμος και αποτελεσματική μέθοδος αξιολόγησης της κρουστικής απόκρισης μιας διάτρητης απορροφητικής επιφάνειας με δεδομένο αριθμό στοιχείων συντονιστών Helmholtz. Η μέθοδος είναι βασισμένη σε ένα απλουστευμένο, με δομή φίλτρου, παραμετροποιημένο μοντέλο. Το μοντέλο αποτελείται από 2^{ης} τάξης παραμετρικά IIR ψηφιακά φίλτρα, που εξομοιώνουν τη γραμμική απόκριση του κάθε συντονιστή. Για να υπολογιστεί η κρουστική απόκριση σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου, αξιολογούνται οι αντίστοιχες ακουστικές διαδρομές των σημάτων και βάση αυτών λαμβάνονται υπόψη οι αντίστοιχες καθυστερήσεις και το αντίστοιχο κέρδος στα σήματα. Η συνδυασμένη απόκριση του συστήματος των συντονιστών και της επιφάνειας (που έχει

ανακλαστικές ιδιότητες, τις οποίες ο χρήστης μπορεί να εισαγάγει για κάθε υλικό) μπορούν να προβλεφθούν, οδηγώντας στην αποτελεσματική αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος. Ως αποτέλεσμα, μια τέτοια προσέγγιση οδηγεί σε μια απλή αλλά ακριβή και γρήγορη αξιολόγηση της απόκρισης των διάτρητων επιφανειών απορρόφησης οποιασδήποτε γεωμετρίας, οποιουδήποτε ποσοστού διάτρησης και ιδιοτήτων επιφάνειας, σε οποιαδήποτε θέση δέκτη υπό ιδανικές συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Μια προέκταση της μεθόδου, μας επιτρέπει και την αξιολόγηση της απόκρισης ενός τέτοιου συστήματος υπό ένα ιδανικό διάχυτο πεδίο. Η μείωση του αρχικού χρόνου αντήχησης του διάχυτου πεδίου, εξαιτίας της απορρόφησης της διάτρητης επιφάνειας, μπορεί να αξιολογηθεί και να οδηγήσει στην εκτίμηση του συχνотικά εξαρτημένου συντελεστή απορρόφησης της προσομοιωμένης διάτρητης επιφάνειας, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 354. Αυτό επαληθεύτηκε από την σύγκριση των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων της μεθόδου με δημοσιευμένα αποτελέσματα μετρήσεων που έγιναν από κατάλληλο πιστοποιημένο εργαστήριο.

Οι αναλυτικές λύσεις που χρησιμοποιούνται για την επίλυση τέτοιων πολύπλοκων συστημάτων είναι πέρα από τις δυνατότητες των σύγχρονων προσωπικών υπολογιστών. Για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας έγιναν μερικές απλουστεύσεις, όπως για παράδειγμα: αγνοήθηκε η διαφοροποίηση της απορρόφησης που ενδεχομένως δημιουργεί η γωνιακή πρόσπτωση του κύματος στην επιφάνεια και στους συντονιστές, οι αλληλοεπιδράσεις των συντονιστών, οι αναλυτικές ιδιότητες της εκπομπής του ήχου από τις οπές κτλ. Η προτεινόμενη μέθοδος εισάγει μια ευέλικτη και πρακτική εναλλακτική λύση, έχοντας μικρότερες και διαχειρίσιμες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα βασιζόμενη στις σύγχρονες μεθόδους ακουστικής προσομοίωσης και της γεωμετρικής ακουστικής. Με τη μέθοδο αυτή λοιπόν, οποιαδήποτε διάτρητη επιφάνεια και συντονιστής Helmholtz μπορεί να επισυναφθεί σε ένα εικονικό δωμάτιο και έπειτα να αξιολογηθούν οι τροποποιημένες κρουστικές αποκρίσεις, εξαιτίας της πρόσθετης απορρόφησης. Ομοίως, η επίδραση της πρόσθετης απορρόφησης που εισαγάγει η διάτρητη επιφάνεια στους ακουστικούς δείκτες, μπορεί εύκολα να εισαχθεί στο μοντέλο χρησιμοποιώντας τους συνήθεις πίνακες συντελεστών απορρόφησης. Η ακουστική επίδραση της προσθήκης των διάτρητων επιφανειών σε χώρους μπορεί να αξιολογηθεί μέσω πειραμάτων ακρόασης. Ακόμη, το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται με αμφιωτικά φίλτρα τις κρουστικές αποκρίσεις στην επιθυμητή θέση ακρόασης.

Μια εξέλιξη της προτεινόμενης μεθόδου, μολονότι δεν έχει υλοποιηθεί σε αυτή την εργασία, είναι ο υπολογισμός της κρουστικής απόκρισης σε συνάρτηση με την γωνία οποιασδήποτε μη συμμετρικής διάταξης στοιχείων. Ακόμη, τα στοιχεία της επιφάνειας μπορεί να έχουν διαφορετική γεωμετρία, που ενδεχομένως οδηγεί σε καινοτόμες και βελτιστοποιημένες λύσεις για την απορρόφηση του ήχου. Αυτές οι απόψεις θα εξεταστούν σε μελλοντικές μελέτες.

Βιβλιογραφία:

- [4.1.1] Lawrence Ziomek, *"Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space - Time Signal Processing"*, CRC Press Inc., 1994.
- [4.1.2] Jont B. Allen και David A. Berkley, *"Image method for efficiently simulating small-room acoustics"*, Journal of American Acoustic Society, vol. 65, no. 4, 1978.
- [4.1.3] Trevor J. Cox και Peter D'Antonio, *"Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application"*, second Edition, Taylor & Francis, 2009.
- [4.1.4] K.U. Ingard, *"On the theory and design of acoustic resonators"*, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 25, 1953.
- [4.1.5] Crighton D. G., Dowling A. P., Fowcs Williams J. E. Heckl M. και Leppington F G. *"Modern Methods in Analytical Acoustics"*, Lecture notes Springer Verlag London 1996.
- [4.1.6] Daniel O. Ludqigsen, Cayla Jewett και Matthew Jusczyk, *"Better Understanding of Resonance through Modeling and Visualization"*, Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference, Boston, 2006.
- [4.1.7] S. Mekid και M. Farooqui, *"Design of Helmholtz resonators in one and two degrees of freedom for noise attenuation in pipelines"*, Acoustics Australia, vol. 40, no. 3, 2012.
- [4.1.8] Laurent Georges, Grégoire Winckelmans, Stéphane Caro και Philippe Geuzaine, *"Aeroacoustic simulation of the flow in a Helmholtz resonator"*, Computational Fluid Dynamics, 2006.
- [4.1.9] Vasile, O. και Gillich G., *"Finite Element Analysis Of Acoustic Pressure Levels And Transmission Loss Of A Muffler"*, 6th Wseas European Computing Conference, Prague, 2012.
- [4.1.10] Andrea Panteghini, Francesco Genna και Edoardo Piana, *"Analysis of a perforated panel for the correction of low frequency resonances in medium size rooms"*, Applied Acoustics, 68, 2007.
- [4.1.11] Comsol Multiphysics, www.comsol.com, Acoustic module v3.4.
- [4.1.12] Ansys Systems and Multiphysics, www.ansys.com.
- [4.1.13] ISO 354: *"Acoustic – Measurement of sound absorption in a reverberation room"*.
- [4.1.14] Everest F. A. και Polhmann K, *"The master handbook of Acoustics"*, 5th Edition Mc Graw Hill, 2009.
- [4.2.1] S. Polychronopoulos, D. Skarlatos και J. Mourjopoulos, *"Measuring resonator panels' frequency absorption and Q factor, using Finite Elements Method"*, ICSV17 congress, Cairo, 2010.
- [4.2.2] Heinrich Kuttruff, *"Room Acoustics"*, fifth Edition, Taylor & Francis, 2009.
- [4.2.3] E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens και James V. Sanders, *"Fundamentals Of Acoustics, Fourth Edition"*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [4.2.4] Ken Steiglitz, *"A Digital Signal Processing Primer: With Applications to Digital Audio and Computer Music"*, Prentice Hall, 1996.

-
- [4.2.5] J. N. Mourjopoulos, E. D. Kyriakis-Bitzaros και C.E. Goutis, "*Theory and Real-Time Implementation of Time Varying Digital Audio Filters*", Journal of Audio Engineering Society, vol. 38, no 718, 1990.
- [4.2.6] Daniel R. Raichel, "*The science and applications of acoustics*", second Edition, Springer New York, 2006.
- [4.2.7] D. Bies and C. Hansen, "*Engineering noise control Theory and practice*", third Edition, CRC Press Inc., 2003.
- [4.2.8] Jean-Marc Jot, Laurent Cerveau και Olivier Warusfel, "*Analysis and Synthesis of Room Reverberation Based on a Statistical Time-Frequency Model*", 103rd Audio Engineering Society Conv., New York, 1997.
- [4.2.9] Manfred R. Schroeder, "*New Method of Measuring Reverberation Time*", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 37, Issue 3, 1965.
- [4.2.10] Wallace Clement Sabine, "*Collected Papers on Acoustics*", Dover, 1964, first published in 1922.
- [4.3.1] <http://www.project-inrichting.nl/pdf/Akoestiek/Rekton-AkoestischePanelen-Witteveen.pdf>
- [4.3.2] S. Polychronopoulos, D. Skarlatos και J. Mourjopoulos, "*The bandwidth attenuation on series of resonators*", Helina convention paper Corfu, 2012.
- [4.3.3] MATLAB and Statistics Toolbox Release 2012b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.

5ο Κεφάλαιο

Συμπεράσματα και προοπτικές περαιτέρω έρευνας

Συμπεράσματα και προοπτικές περαιτέρω έρευνας

Στο 2ο κεφάλαιο, όπου περιγράφεται η εξομοίωση διάτρητων επιφανειών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, θα μπορούσαν να δοκιμαστούν σε μεγαλύτερο βάθος τα όρια (από άποψη υπολογιστικής ισχύος) των προγραμμάτων στην εισαγωγή ακουστικών παραμέτρων και στοιχείων. Ακόμη να συγκριθούν πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα απλών μοντέλων αυτής της μεθόδου με τα αποτελέσματα της μεθόδου που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων δεν μπορούν να επιλυθούν πολύπλοκα συστήματα. Ωστόσο, τα αποτελέσματα για απλά μοντέλα είναι πολύ ακριβή. Έτσι μπορούμε να βασιζόμαστε σε αυτή τη μέθοδο τουλάχιστον σε επίπεδο σύγκρισης.

Στο 3ο κεφάλαιο εξετάζεται με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού η συμπεριφορά των αρχαίων θεάτρων (στη συγκεκριμένη εργασία το θέατρο της Λυττούς) με υπολογιστικά μοντέλα και η επίδραση των ακουστικών βάζων στην ακουστική ποιότητα αυτών, τα οποία κατά τον Βιτρούβιο ήταν τοποθετημένα στα θέατρα την περίοδο εκείνη. Αρκετά από τα θέατρα της αρχαιότητας σήμερα είτε αγνοούνται, είτε είναι σε μεγάλο βαθμό κατεστραμμένα. Βάση σχεδίων, όμως, που έχουν διασωθεί, σήμερα μπορούμε να έχουμε μια ικανοποιητική γνώση γι αυτά, ώστε να μπορέσουμε να μελετήσουμε μέσω ψηφιακών μοντέλων τις ακουστικές τους ιδιότητες. Σε αρκετά από αυτά τα θέατρα αλλά και σε χώρους λατρείας αναφέρεται πως υπήρχαν και ακουστικά βάζα, δηλαδή εντοιχισμένα αγγεία. Με βάση την προτεινόμενη σ' αυτό το κεφάλαιο μέθοδο μπορεί να μελετηθεί η επίδραση αυτών των αγγείων στην ακουστική οποιουδήποτε χώρου. Θα ήταν αρκετά ενδιαφέρον να εξομοιωθούν αρκετά αρχαία κτίσματα και να μελετηθεί αναλυτικότερα η χρήση των αγγείων σ' αυτά.

Η μέθοδος εξομοίωσης μίας διάτρητης επιφάνειας που περιγράφηκε στο 4ο κεφάλαιο ανοίγει ένα δρόμο για την εξομοίωση πολύπλοκων ακουστικών συστημάτων μέσω της επεξεργασίας σημάτων. Είναι εφικτό με σχετικά μικρή υπολογιστική ισχύ και τη συγκεκριμένη μέθοδο να εξομοιωθούν ακόμη πιο σύνθετα συστήματα που με άλλες μεθόδους θα ήταν αδύνατο. Η καλή προσέγγιση στο επίπεδο των αποτελεσμάτων που έχει η μέθοδος στη συγκεκριμένη εργασία, μας δίνει τη δυνατότητα να συνεχίσουμε και να εξελίξουμε το υπάρχον μοντέλο.

Πιο συγκεκριμένα, σε μελλοντική δουλειά με τη βοήθεια του μοντέλου που προτάθηκε θα μπορούσε:

- Να μελετηθεί η απορρόφηση σύνθετων απορροφητών που προκύπτουν από το συνδυασμό των τριών τύπων απορροφητών.
- Να γίνει σχεδιασμός νέων απορροφητών με μεγιστοποίηση της απορροφητικής τους ικανότητας.

Ακόμη, για τη βελτιστοποίησή του, να ληφθούν υπόψη και τα παρακάτω:

- Η σύζευξη των συντονιστών (ανάλογα με την μεταξύ τους απόσταση).
- Η παραμετροποίηση του σήματος ώστε τα σήματα που εκπέμπουν οι συντονιστές να εκφράζουν και την εκπομπή τους στο κοντινό πεδίο.
- Η γωνία πρόσπτωσης του ακουστικού κύματος στο στόμιο του συντονιστή.

- Το damping του υλικού.
- Να υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής περισσότερων επιφανειών στο χώρο.
- Η τοποθέτηση της / των επιφανειών σε συγκεκριμένες θέσεις στο χώρο.

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Σπύρος Πολυχρονόπουλος

Ιαουάριος 2014

1. ΑΤΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Όνοματεπώνυμο	Σπύρος Πολυχρονόπουλος
Ημερομηνία και τόπος γέννησης	07 Δεκεμβρίου 1980, Μαρούσι – Αττικής
E-mail	info@spyweirdos.com
Web site	www.spyweirdos.com

2. (2.1) ΣΠΟΥΔΕΣ, (2.2)ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΚΑΙ (2.3)ΜΟΥΣΙΚΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΑ

2.1 ΣΠΟΥΔΕΣ

2006 - Σήμερα	Εκπόνηση Διδακτορικής Διατριβής Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών Μηχανικού Πατρως (ΑΕΙ) με θέμα «Έλεγχος ακουστικής κλειστών χώρων με προσαρμοσμένα ακουστικά στοιχεία»
1999 - 2006	Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Φυσικής
1992 – 1998	Δημόσιο Γυμνάσιο – Λύκειο Αγίας Παρασκευής, Αθήνα
1986 – 1991	Δημόσιο Δημοτικό Πατήσια, Αθήνα

2.2 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΑ

- Ανάλυση, επεξεργασία και μετατροπή ψηφιακών ηχητικών σημάτων
- Μετρήσεις και ανάλυση περιβαλλοντικού θορύβου
- Αναλογικά και ψηφιακά φίλτρα για επεξεργασία ήχου
- Ηχητικές συσκευές για καταναλωτικές και επαγγελματικές εφαρμογές
- Μετρήσεις ακουστικής ποιότητας ηχητικών σημάτων
- Προγραμματισμός σε περιβάλλον πεπερασμένων στοιχείων
- Ψηφιακή επεξεργασία σήματος, DSP (digital signal processing)
- Ηχογράφηση ηχοτοπίων
- Προγραμματισμός και Δίκτυα

2.2.1. Δημοσιεύσεις σε περιοδικά - Συνέδρια

- [1] Spyros Polychronopoulos, Dimitris Skarlatos, John Mourjopoulos «*Efficient filter - based model for Helmholtz resonator panel absorbers.*» «Journal of Audio Engineering Society» (Volume 62,p. 14-24, 2014)
- [2] Spyros Polychronopoulos, Dimitris Kougias, Polykarpos Polykarpou, Dimitris Skarlatos «*The use of resonators in ancient Greek Theaters.*» «Acta Acustica united with Acustica» (Volume 99, p.64-69, 2013)
- [3] Σπύρος Πολυχρονόπουλος, Δημήτρης Σκαρλάτος, Γιάννης Μουρτζόπουλος «*Μελέτη του συχνοτικού εύρους απορρόφησης σε συστοιχία συντονιστών.*» «Ακουστική 2012» (Κέρκυρα 2012)
- [4] P.Karampatzakis, V.Zafranas, S. Polychronopoulos «*A study on Aristaxenus acousic urns (The Vitruvian secret).*» «European Acoustics Association Hellenic Institute Of Acoustics Conference 2011»
- [5] Spyros Polychronopoulos, Dimitris Skarlatos, Dimitris Kougias «*The use of resonators in ancient Greek Theaters.*» «European Acoustics Association Hellenic Institute Of Acoustics Conference 2011»
- [6] Σπύρος Πολυχρονόπουλος, Δημήτρης Σκαρλάτος, Γιάννης Μουρτζόπουλος «*Επίδραση της θέσης της πηγής στην απόκριση συχνότητας των διάτρητων επιφανειών*» «Ακουστική 2010» (Αθήνα 2011)
- [7] Σπύρος Πολυχρονόπουλος, Αντρέας Κόκκινος, Δημήτρης Σκαρλάτος «*Μοντέλο FEM για την μελέτη της επίδραση της απορρόφησης του θορύβου σε τούνελ ταχείας κυκλοφορίας*» «Ακουστική 2010» (Αθήνα 2011)
- [8] Spyros Polychronopoulos, John Mourjopoulos, Dimitris Skarlatos «*Measuring resonator panels' frequency absorption and Q factor, using Finite Elements Method*» «ICSV 17» (Cairo 2010)
- [9] Σπύρος Πολυχρονόπουλος, Αναστάσιος Σκαρλάτος, Δημήτρης Σκαρλάτος «*Βελτιστοποίηση της απόδοσης των φραγμάτων θορύβου με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων*» «Ακουστική 2008» (Ξάνθη 2008)
- [10] Ζακυνθινός Τηλέμαχος, Δημήτρης Σκαρλάτος, Πολυχρονόπουλος Σπύρος «*Παραγοντικό μοντέλο πρόβλεψης κυκλοφοριακού φορτίου*» «Ακουστική 2006» (Ηράκλειο Κρήτης 2006)
- [11] Σουγλέρης Χάρης, Πολυχρονόπουλος Σπύρος, Σκαρλάτος Δημήτρης «*Παραγοντική ανάλυση της επίδρασης των συνθηκών οδήγησης και της κατάστασης του δρόμου στο συντελεστή άνεσης του αυτοκινήτου*» Πρακτικά Α' Εθνικού Συνεδρίου «Ακουστική 2004» (Θεσσαλονίκη 2004)

2.3 ΜΟΥΣΙΚΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΑ

- Μουσική σύνθεση
- Νέες τεχνολογίες για μουσική σύνθεση
- Σύγχρονη ηλεκτρονική και ορχηστρική μουσική
- Συναυλίες ηλεκτρονικής μουσικής
- Διαδραστικά μουσικά δρώμενα
- Παραγωγή (mastering) για κυκλοφορία cd και δίσκου βινυλίου
- Προγραμματισμός ψηφιακών μουσικών οργάνων
- Φιλοσοφία και αισθητική της μουσικής

2.3.1 Δισκογραφία:

2.3.1.1 Άλμπουμ (lp):

2014 Spyros Polychronopoulos - electronic music <Experemedia (Οχάιο, Αμερική)>
2013 Spyros Polychronopoulos (feat Antonis Anissegos) – piano acts <Room40 (Αυστραλία)>
2011 Spyweirdos – feeling of movement <Creative Space (Ελλάδα)>
2011 Spyweirdos – two ants were called <Senufo editions (Ιταλία)>
2009 Spyweirdos & Floros Floridis – the sound between us <Creative Space (Ελλάδα)>
2009 Spyweirdos - ten letters <Creative Space (Ελλάδα)>
2008 Spyweirdos, John Mourjopoulos & Floros Floridis- epistrophy at Utopia <Ad Noiseam (Γερμανία)>
2008 Spyweirdos - ten numbers <Creative Space (Ελλάδα)>
2006 Spyweirdos - wetsound orchestra <Poetanegra (Ελλάδα)>
2005 Spyweirdos – for children to play <Z.M.A. (Ελλάδα)>
2003 Spyweirdos – fairytale <Devic Craft Cordings (Ελλάδα)>
2000 Weird Alchemy – wired alchemy <Demon Tea records (Αυστραλία)>
1999 Weird Alchemy – turtle rocket <Online Label (Φιλανδία)>

2.3.1.2 Άλμπουμ (ep):

2006 Spyweirdos - loftcase συλλεκτικό limited βινίλιο <Creative Space (Greece)> mastering από τον Bola (Skam records)
2007 Spyweirdos & Larvae δύο 3inch cds στην <Creative Space (Greece)> & mastering από τον Murcof (Leaf records)

2.3.1.3 Κομμάτια σε συλλογές:

2010 Pleq-Raindrop (Spyweirdos Remix) <Impulsive Art (Ελλάδα)>

2010 Spyweirdos-e (edit version) <Wire magazine (Αγγλία)>
 2009 Hecq - steeltongued (Spyweirdos remix) <Hymen / Ant Zen(Γερμανία)>
 2008 Funckarma - Vell Vagranz / Spyweirdos & Floros Floridis –
 the sound between us (Funckarma rmx) <n5MD (Αμερική)>
 2007 Spyweirdos-the key(Funckarma rmx)<n5MD (Αμερική)>
 2006 Snog-king of hate <PsyHarmonics Records (Αυστραλία)>
 (Spyweirdos remix)
 2003 Weird Alchemy–f system <Giwa Records (Αυστραλία)>
 2003 Spyweirdos-lost in the woods <LoopSnoo Records (Αυστραλία)>
 2003 Spyweirdos-everything <Freese magazine (Ελλάδα)>
 2002 Weird Alchemy-aftertouch <Devic Craft Cordings (Ελλάδα)>
 2002 Spyweirdos-soryps <Devic Craft Cordings (Ελλάδα)>
 2001 Weird Alchemy-digital love with fine automation <Tempest
 (Αυστραλία)>
 2000 Weird Alchemy–red is like green <Demon Tea records
 (Αυστραλία)>

2.3.2 Καλλιτεχνικές Συνεργασίες :

Διεθνείς συνεργασίες	Ελληνικές συνεργασίες
Alva Noto (Γερμανία/ Raster Noton)	Αντώνης Ανισέγκος (Konnex Records)
Murcof (Μεξικό/ the Leaf records)	Φλώρος Φλωρίδης (Ano Kato Records, Lyra)
Lionel Marchetti (Γαλλία / Entr'acte)	Μπάμπης Παπαδόπουλος (Puzzle music, Lyra)
Panacea (Γερμανία/ Ad Noiseam)	Νίκος Βελιώτης (Antifrost)
Ollie Olsen (Αυστραλία/ PsyHarmonics, Creative Space)	Σωτήρης Ντούβας (Lyra)
B. Fleischmann (Γερμανία/ Morr music)	Γιώργος Παλαμιώτης (Lyra)
Hecq (Γερμανία/Hymen Records, Metropolis)	Σταμάτης Ντελαπόρτας (Triplebath)
Horchata (Αμερική/ Ad Noiseam)	Γιάννης Μουρζόπουλος (Ano Kato Records)
Traject (Ιρλανδία/ Special Material)	Γιάννης Νοταράς (Triplebath)
Mad EP (Αμερική/ Ad Noiseam)	Βασίλης Τζαβάρας (Triplebath)
Snog (Αυστραλία/ Metropolis Records)	Ζωρζ Πιλαλί (Αριστοκράτες)
Funckarma (Ολλανδία/ Delicatessen records, On records)	Ανδρέας Πολυζωγόπουλος (Lyra)
Larvae (Αμερική/Ad Noiseam)	Γιάννης Σπυριδάκης (Demon Tea)
Nam Shub Of Enki (Αυστραλία/Weird Music Society, Creative Space)	Τάνια Γιαννούλη (Triplebath)
Metropol (Ισπανία/Hymen,Creative Space)	
Pleq (Πολωνία/U cover).	
Timo (Φινλανδία/ PsyHarmonics)	

3. ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ / ΠΡΟΫΠΗΡΕΣΙΑ

- 2011 – 2013 Ωρομίσθιος εκπαιδευτής στο Aegean College για τα μαθήματα: «μουσική παραγωγή και managing μπάντας», «παραγωγή ηλεκτρονικού ήχου και engineering ήχου», «η φυσική του ήχου».
- 2011 – 2013 Ωρομίσθιος εκπαιδευτής στο (Ινστιτούτο Επαγγελματικής Κατάρτισης) ΙΕΚ ΟΜΗΡΟΣ για τα μαθήματα: «ηλεκτρονική μουσική παραγωγή», «ηλεκτρονική μουσική σύνθεση».
- 2010 – σήμερα Διαλέξεις και συγγραφή κειμένων για την «αισθητική της μουσικής».
- 2010 – 2013 Εντατικά σεμινάρια στους προγραμματιστές του ομίλου Λαμπράκη για σχεδιασμό σύγχρονων ιστοσελίδων.
- 2010 – σήμερα Καθηγητής και δημιουργός του τμήματος «μουσική τεχνολογία και παραγωγή» στο μουσικό χωριό (www.music-village.gr).
- 2009 – σήμερα Μέλος του AES (Audio Engineering Society)
- 2008 Βοήθησε σε τεχνικές και τεχνολογικές γνώσεις σε θέματα ήχου για την ελληνική συμμετοχή στην biennale της Βενετίας του 2008.
- 2007 – 2011 Ωρομίσθιος εκπαιδευτής στο (Ινστιτούτο Επαγγελματικής Κατάρτισης) ΙΕΚ ΑΚΜΗ Πάτρας για τα μαθήματα: «γραφιστική για πολυμέσα» σε Γραφίστες, «ηλεκτρονική μουσική σύνθεση» σε Ηχολήπτες, «ηχοληψία» σε Ηχολήπτες και «προγραμματισμός ιστοσελίδων» σε Προγραμματιστές.
- 2007 – 2010 Δημιουργία ηχοτοπίων και μουσικής για χορευτικές και θεατρικές παραστάσεις.
- 2005 – σήμερα Μέλος του ΚΣΥΜΕ «Κέντρο Σύγχρονης Μουσικής έρευνας».
- 2005 – 2013 Συνεργάτης εργαστηρίων φυσικής στο Παιδαγωγικό τμήμα Πανεπιστημίου Πατρών Δημοτικής Εκπαίδευσης.
- 2005 – 2013 Συνεργάτης εργαστηρίων ηλεκτροακουστικής στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών.
- 2004 – σήμερα Μέλος του ΕΣΣΗΜ «Ελληνικός Σύνδεσμος Συνθετών Ηλεκτροακουστικής Μουσικής».
- 2001 – σήμερα Παραγωγή (mastering) και ηχογράφηση μουσικής σε studio για κυκλοφορία δίσκου.
- 2000 – σήμερα Διαλέξεις και workshop σε : νέους τρόπους καλλιτεχνικής έκφρασης, μουσικά προγράμματα, ηλεκτρακουστικές αλυσίδες, νέες τεχνολογίες σύνθεσης μουσικής και ψηφιακού ήχου.

4. ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΜΕΝΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ Η/Υ

- Λογισμικό Επεξεργασίας ήχου και μουσικής σύνθεσης: CoolEdit Pro, Sony Sound-Forge, Ableton live , Tracker, Cubase, Logic, Steinberg Wavelab, και άλλα.
- Γλώσσες Προγραμματισμού: C/C++, Visual Basic, Fortran, Pascal, Turbo Pascal, Java.
- Ειδικά πακέτα εφαρμογών / εξομοίωσης: Matlab, Simulink
- Web page development: HTML, Java, Javascript, PHP, Flash.
- Λογισμικό Εξομοίωσης Ακουστικής Χώρων: Comsol Multiphysics ,CATT- Acoustic, CadnaA, Odeon.

5. ΓΛΩΣΣΕΣ

Ελληνικά: μητρική γλώσσα
Αγγλικά: άριστη γνώση

6. ΓΕΝΙΚΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΑ

- Διαδικτυακή εκπαίδευση
- Διάδραση Ανθρώπου Μηχανής
- Μελέτη φιλοσοφικών δοκιμίων
- Μελέτη κβαντικής φυσικής
- Συγγραφή δοκιμίων
- Φυσική και Φιλοσοφία
- Μουσική και Φιλοσοφία
- Ακρόαση μουσικής
- Σκάκι