

ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ



**Κατασκευή και ακουστικός έλεγχος μελωδικού
κρουστού οργάνου (μαρίμπας)**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΟΝΤΑΚΟΣ

ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΓΟΥΛΙΩΤΗΣ

Επιβλέπων: Δρ. Σπύρος Κουζούπης

Ρέθυμνο 2019



ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

Κατασκευή και ακουστικός έλεγχος μελωδικού κρουστού οργάνου (μαρίμπας)

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΩΝ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΟΝΤΑΚΟΣ

ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΓΟΥΛΙΩΤΗΣ

Επιβλέπων: Δρ. Σπύρος Κουζούπης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27η Μαρτίου 2019.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Δρ. Σπύρος Κουζούπης

Ηλίας Ποταμίτης

Κώστας Κεχράκος

Επίκουρος Καθηγητής

Επίκουρος Καθηγητής

Επίκουρος Καθηγητής

Ρέθυμνο 2019

Περίληψη

Η παρούσα εργασία, καταπιάνεται με τη θεωρητική μελέτη, τον ακουστικό έλεγχο και την κατασκευή του μουσικού κρουστού μελωδικού οργάνου (ξυλόφωνου ή μαρίμπας). Βασικός σκοπός, είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μουσικού οργάνου, μέσω θεωρητικής μελέτης το οποίο θα προσεγγίζει ένα πλήρως αποδεκτό αποτέλεσμα συγκρίσιμο από άποψη ηχητικής αισθητικής με αυτό ενός αντίστοιχου επαγγελματικού οργάνου. Για την κατασκευή των κλειδιών, χρησιμοποιήθηκαν ξύλα τα οποία κόπηκαν σε ράβδους συγκεκριμένων διαστάσεων και στη συνέχεια κουρδίστηκαν στην σωστή τονικότητα μέσω ειδικού λογισμικού το οποίο αναπτύχθηκε για αυτό το σκοπό. Κατασκευάστηκε επίσης και ειδική σπαστή βάση και σύστημα στήριξης για την τοποθέτηση των κλειδιών και των σωλήνων-αντηχείων, οι οποίοι κόπηκαν σε συγκεκριμένες διαστάσεις για κάθε ράβδο. Για την επιλογή του κατάλληλου υλικού και της κατάλληλης διαμέτρου για τους σωλήνες-αντηχεία πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε τρεις συγκεκριμένες συχνότητες χρησιμοποιώντας ράβδους από την χαμηλή, μεσαία και υψηλή συχνотική περιοχή, δοκιμάζοντας σωλήνες από τέσσερα διαφορετικά υλικά, εξετάζοντας τις αλλαγές στην ένταση και την ποιότητα του ήχου, και ρυθμίζοντας το μήκος κάθε αέρινης στήλης.

Λέξεις Κλειδιά

Abstract

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	iii
Κατάλογος Πινάκων	viii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ορισμός διαμηκών κυμάτων	1
1.2 Ηχητικά κύματα	2
2 Εισαγωγή στην φυσική των κυμάτων σε σωλήνες .	5
2.1 Μονοδιάστατη κυματική εξίσωση	5
2.2 Διαμήκη κύματα σε σταθερό μέσο	6
2.3 Τρισδιάστατα κύματα σε ένα σταθερό μέσο	10
2.4 Τετράγωνοι σωλήνες	10
2.5 Κυκλικοί σωλήνες	13
2.6 Κλειστός - Ανοικτός σωλήνας	15
2.7 Ανοικτός - Ανοικτός σωλήνας	15
3 Το αντηχείο της μαρίμπας.	19
3.1 Εισαγωγή στα πυκνώματα και αραιώματα μέσα στο σωλήνα	19
3.2 Στάσιμα κύματα στο αντηχείο	20
3.3 Υπολογίζοντας το μήκος του σωλήνα.	23
3.4 Πραγματικά μήκη σωλήνα που απαιτούνται για την αντήχηση της μαρίμπας	24
4 Κατασκευή	26
4.1 Επιλέγοντας τους σωλήνες που θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή.	26
4.2 Υπολογίζοντας την συχνότητα κάθε νότας.	27
5 Πειράματα	30
5.1 Πειραματική διάταξη	30
5.1.1 Χρησιμοποιούμενες συσκευές.	30
5.1.2 Φασματικός αναλυτής.	31
5.1.3 Δημιουργία πώματος για τον σωλήνα.	31
5.1.4 Διαδικασία ηχογράφησης.	31
5.2 Συντονίζοντας σωλήνες διαφορετικών υλικών	38
6 Η μπάρα της Μαρίμπας	41
6.1 Εισαγωγή στη θεωρία της ράβδου	41
6.2 Είδη ταλαντώσεων της ράβδου	41
6.2.1 Πρώτος εγκάρσιος τρόπος δόνησης (Θεμέλιος)	41
6.2.2 Πρώτος στροφικός τρόπος δόνησης	42
6.2.3 Δεύτερος εγκάρσιος τρόπος δόνησης	43
6.2.4 Δεύτερος στροφικός τρόπος δόνησης	44
6.2.5 Τρίτος εγκάρσιος τρόπος δόνησης	44
6.2.6 Πρώτος πλευρικός τρόπος δόνησης	45

6.2.7 Τρίτος στροφικός τρόπος δόνησης.....	46
6.2.8 Τέταρτος εγκάρσιος τρόπος δόνησης.....	47
6.2.9 Τέταρτος στροφικός τρόπος δόνησης.....	47
6.2.10 Δεύτερος πλευρικός τρόπος δόνησης	48
6.2.11 Πέμπτος στροφικός τρόπος δόνησης	49
6.2.12 Πέμπτος εγκάρσιος τρόπος δόνησης.....	49
7 Συντονισμός της μαρίμπας	52
7.1 Ο συντονισμός της ράβδου.....	52
7.2 Διαδικασία συντονισμού	53
7.3 Δημιουργώντας την καμάρα.....	54
7.4 Διορθώνοντας το κούρδισμα μιας ράβδου	55
7.5 Δυσκολίες κουρδίσματος πλευρικών και στροφικών ρυθμών	56
7.6 Χρησιμοποιώντας κουρδιστήρι για να μετρήσουμε τις συχνότητες και τους ρυθμούς.....	56
7.6.1 Η θεμέλιος (Πρώτος εγκάρσιος τρόπος)	56
7.6.2 Δεύτερος εγκάρσιος τρόπος	57
7.6.3 Τρίτος εγκάρσιος τρόπος.....	58
7.7 Δημιουργώντας τις τρύπες στην ράβδο- Βρίσκοντας τους κόμβους του θεμελιώδους τρόπου.....	59
7.8 Η ανθρώπινη ακοή σε διαφορετικές συχνότητες και η διαβάθμιση του πλάτους της μπάρας.....	61
7.9 Διαφορές μαρίμπας – ξυλοφώνου και η ιστορία του συντονισμού	64
7.10 Μερικές πληροφορίες σχετικά με το κούρδισμα και τις μουσικές κλίμακες.....	66

Κατάλογος Σχημάτων

2.1.1	Απεικόνιση κλειστού ανοιχτού σωλήνα και ανοιχτού ανοιχτού σωλήνα.....	6
2.4.2	Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) σε τετράγωνο σωλήνα.....	11
2.5.3	Κυλινδρικό πολικό σύστημα συντεταγμένων (r, φ, z) σε κυκλικό σωλήνα.	14
2.7.4	Γραμμές κατανομής εγκάρσιας πίεσης σε ορθογώνιο σωλήνα έως m=2, n=2	16
2.7.5	Γραμμές κατανομής εγκάρσιας πίεσης σε κυκλικό σωλήνα έως m=2, n=2.....	16
3.1.1	Πυκνώματα και αραιώματα του αέρα στον σωλήνα.....	19
3.1.2	Πυκνώματα και αραιώματα σωματιδίων του αέρα	19
3.1.3	Σύγκριση αλλαγή πίεσης αέρα και μετατόπισης στον αέρα.	20
4.1.1	Μαρίμπα με σωλήνες από ξύλο.	26
5.1.1.1	Ηλεκτρονικός υπολογιστής συνδεδεμένος με ενισχυτή και ηχείο για αναπαραγωγή συχνοτήτων.	30

Κατάλογος Πινάκων

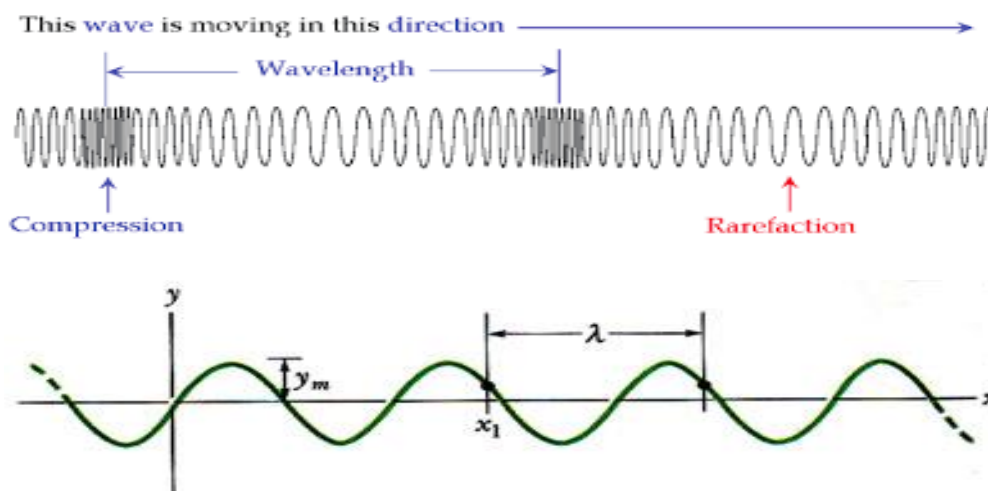
<i>Πίνακας 7.10.1 Σύγκριση συχνότητων οκτάβας για απλό τονισμό και ίσης ιδιοσυγκρασίας</i>	<i>67</i>
<i>Πίνακας 7.10.2 Κουρδίσματα για απλό τονισμό της χαμηλής οκτάβας.....</i>	<i>68</i>

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ορισμός διαμηκών κυμάτων

Θεωρούμε μερικά σωματίδια συνδεδεμένα από μία σειρά από ελατήρια, τα ελατήρια θεωρούμε ότι είναι πλήρως ελαστικά, και υπακούουν στο νόμο του Hooke. Εάν ένα σωματίδιο κινηθεί προς τα δεξιά, το ελατήριο, που είναι συνδεδεμένο από δεξιά, θα συσπειρωθεί, ενώ, το ελατήριο που είναι συνδεδεμένο από τα αριστερά, θα επιμηκυνθεί. Τόσο η συσπείρωση όσο και η επιμήκυνση θα επηρεάσουν τα σωματίδια που γειτονεύουν με το αρχικό, και ούτω καθεξής.



Εικόνα: 1.1

Εάν το πρώτο σωματίδιο κινηθεί με απλή αρμονική κίνηση, όλα τα άλλα θα κινηθούν, επίσης, με απλή αρμονική κίνηση. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η φάση στην οποία κινούνται τα διάφορα σωματίδια είναι διαφορετική από τη φάση του αρχικού. Αν παρατηρήσουμε στην εικόνα 1.1, θα δούμε ότι μια διαταραχή (πύκνωση ή αραιώμα) ταξιδεύει και αυτό προς την ίδια κατεύθυνση προς την οποία κινούνται τα σωματίδια. Άρα, σε αντίθεση με τα εγκάρσια κύματα, σε αυτήν την περίπτωση, τα κύματα ταξιδεύουν στην ίδια διεύθυνση με τη σωματιδιακή κίνηση. Τέτοια κύματα ονομάζονται διαμήκη κύματα. Για ευκολία, θα παραστήσουμε οποιοδήποτε σωματίδιου από τη θέση ισορροπίας, που βρίσκεται στο x , με το γράμμα y . Τότε η εξίσωση ενός διαμήκους κύματος που κινείται προς τα δεξιά μπορεί να γραφτεί ως

$$y = A_0 \sin(\omega t - kx) \quad (1.1)$$

1.2 Ηχητικά κύματα

Τα ηχητικά κύματα είναι διαμήκη μηχανικά κύματα που μπορούν να διαδοθούν σε υγρά, στερεά και αέρια. Τα σωματίδια, διαμέσου των οποίων διαδίδονται τα ηχητικά κύματα. Ταλαντώνονται στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Ανάλογα με τη συχνότητα τους, τα διακρίνουμε στα ακουστά, στα υποηχητικά και στα υπερηχητικά. Ακουστά λέγονται τα ηχητικά κύματα που διεγείρουν το ανθρώπινο αυτί και τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Η περιοχή αυτή εκτείνεται περίπου από 20Hz έως 2kHz. Υποηχητικά λέγονται τα ηχητικά κύματα που έχουν συχνότητα χαμηλότερα από την ακουστή περιοχή. Παραδείγματα τέτοιων κυμάτων είναι τα σεισμικά κύματα. Υπερηχητικά λέγονται τα ηχητικά κύματα που έχουν συχνότητα υψηλότερα από την ακουστή περιοχή. Παραδείγματα τέτοιων κυμάτων είναι τα κύματα που εκπέμπονται από τους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους. Η εξίσωση (1.1), που περιγράφει τα διαμήκη κύματα, περιγράφει και τα εγκάρσια κύματα, με y να είναι η απομάκρυνση από την θέση ισορροπίας του σωματίου που βρίσκεται, όταν ισορροπεί στη θέση x . Στα διαμήκη κύματα το y και το x είναι αποστάσεις πάνω στον ίδιο άξονα. Τα διαμήκη κύματα είναι διαδοχικές περιοχές μεγάλης (πύκνωμα) και μικρής (αραίωμα) συγκέντρωσης σωματιδίων, όπως φαίνεται στο εικόνα (1.2). Ειδικά για τα κύματα ήχου στον αέρα το πύκνωμα αντιστοιχεί σε περιοχή υψηλής και το αραιώμα σε περιοχή χαμηλής πίεσης. Αλλαγές πίεσης προκαλούν σχετικές αλλαγές στον όγκο του αερίου. Ο λόγος της μεταβολής της πίεσεως ενός σώματος προς τη σχετική μεταβολή όγκου που προκύπτει, είναι το μέτρο ελαστικότητας όγκου, το γνωστό από την ταχύτητα φάσης, B_v :

$$B_v = -\frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V_0}} \quad (1.2)$$

Το B_v είναι θετική ποσότητα, καθώς μια αύξηση της πίεσεως προκαλεί μείωση του όγκου. Από την εξίσωση (1.2), έχουμε:

$$\Delta p = -B_v \frac{\Delta V}{V_0} \Rightarrow \Delta p = -B_v \frac{\Delta y}{\Delta x} = -B_v \frac{\partial y}{\partial x} \quad (1.3)$$

Η εξίσωση (1.3) ισχύει μόνο για τα διαμήκη κύματα, διότι εκεί οι αλλαγές όγκου λαμβάνουν χώρα στη διεύθυνση της μετατόπισης από τη θέση ισορροπίας και η σχετική αλλαγή όγκου είναι ανάλογη με τη σχετική μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας ($\frac{\Delta y}{\Delta x}$). Με βάση την εξίσωση (1.1) έχουμε:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = kA_0 \cos(\omega t - kx) \tag{1.4}$$

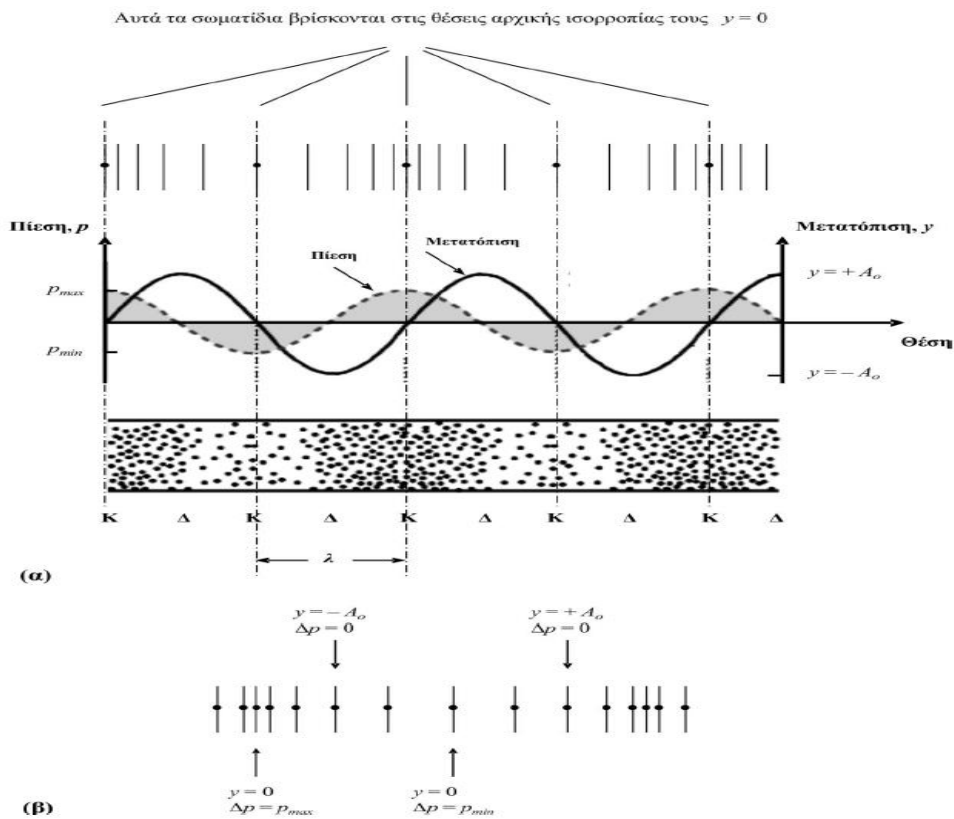
Γνωρίζοντας ότι

$$B_v = u_{ph}^2 \rho \tag{1.5}$$

Και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1.3) έχουμε ότι τελικά:

$$\Delta p = u_{ph}^2 \rho k A_0 \cos(\omega t - kx) \tag{1.6}$$

Σημειώνεται ότι η μετατόπιση, y από τη θέση ισορροπίας εξαρτάται από το $\sin(\omega t - kx)$, ενώ οι αλλαγές πίεσης, Δp , εξαρτώνται από το $\cos(\omega t - kx)$, οπότε έχουν μια διαφορά φάσης $\pi/2$ (εικόνα 1.2). Έτσι, η πίεση μεγιστοποιείται, όταν η μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας είναι μηδέν. [1]



Εικόνα 1.1: (α) μεταβολές πίεσης και θέσης σωματιδίων, (β) μετατόπιση σωματιδίων και αλλαγές πίεσης

Κεφάλαιο 2

Εισαγωγή στην φυσική των κυμάτων σε σωλήνες

2.1 Μονοδιάστατη κυματική εξίσωση

Γνωρίζουμε ότι κύμα ονομάζεται μία διαταραχή από την ισορροπία, η οποία ταξιδεύει μέσα στον χώρο. Κυματική κίνηση εμφανίζεται σχεδόν παντού στη φύση: οι κυματισμοί του νερού, τα ηχητικά κύματα, τα κύματα σε μία χορδή ή σε σωλήνα είναι μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα κυματικής κίνησης. Οι σωλήνες είναι σώματα που περιορίζουν μία αέρια στήλη στο εσωτερικό τους. Στην περίπτωση που η διάμετρος του σωλήνα είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος του ήχου, τα ηχητικά κύματα διαδίδονται κατά μήκος του άξονα του σωλήνα. Η εξίσωση που περιγράφει τα ηχητικά κύματα αυτά είναι η μονοδιάστατη κυματική εξίσωση.

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

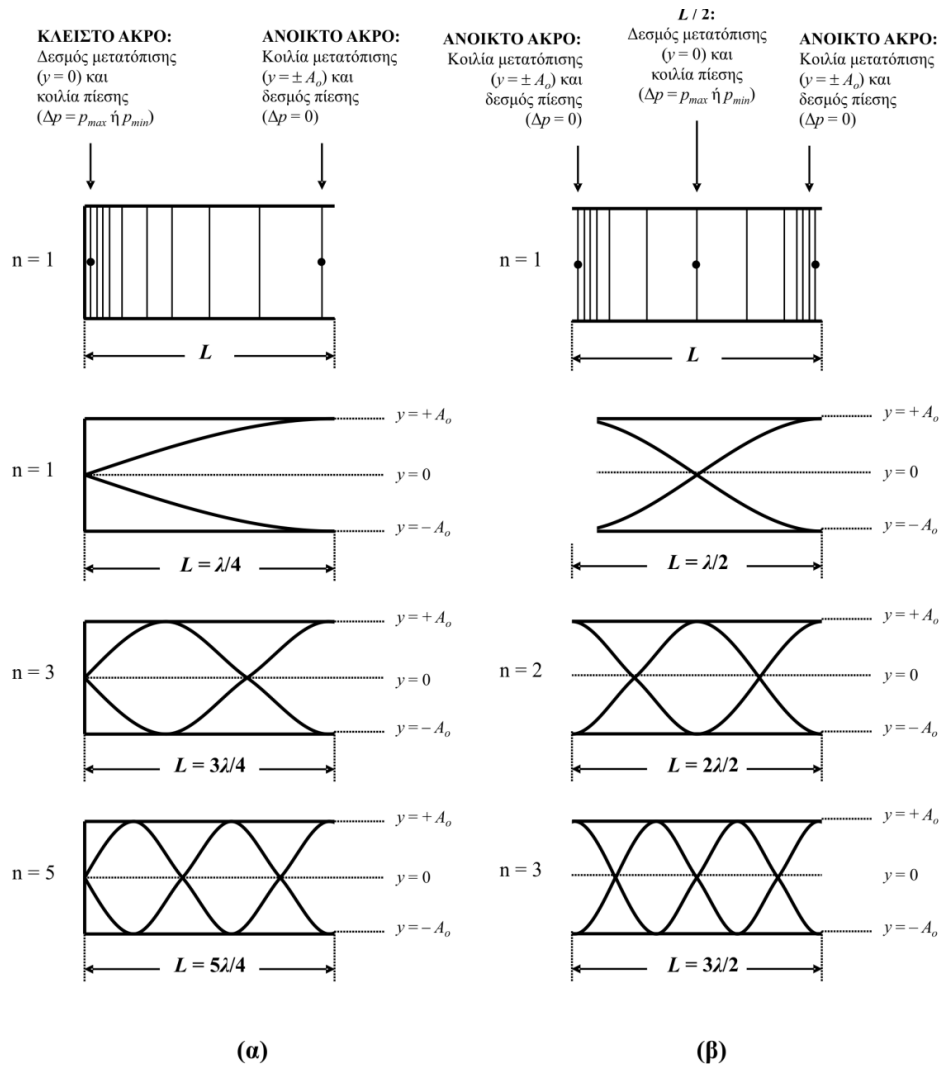
$$c^2 = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2.2)$$

Οι σωλήνες συντονίζονται σε συγκεκριμένες συχνότητες και κατά μήκος τους σχηματίζονται στάσιμα κύματα. Η κυματική εξίσωση καταλήγει στην μονοδιάστατη εξίσωση του Helmholtz.

$$\frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} + k^2 p(x) = 0 \quad (2.3)$$

Κατά τον συντονισμό στα ανοικτά άκρα των σωλήνων δημιουργούνται κοιλίες μετατόπισης ενώ στα κλειστά δεσμοί. Σωλήνας ανοικτός ή κλειστός στα δύο άκρα του συντονίζεται όταν το μήκος του είναι πολλαπλάσιο του $\lambda/2$.

$$L = n \frac{\lambda}{2} \Rightarrow f = \frac{nc}{2L} \quad n = 1,2,3 \quad (2.4)$$



Εικόνα 2.1.1: Απεικόνιση κλειστού ανοιχτού σωλήνα και ανοιχτού ανοιχτού σωλήνα

2.2 Διαμήκη κύματα σε σταθερό μέσο

Στην ιδανική περίπτωση ενός σωλήνα με άκαμπτο τοίχωμα γεμισμένο με ένα ακίνητο υγρό, μικρού πλάτους κύματα ταξιδεύουν σαν διαμήκες κύματα. Η διαταραχή της ακουστικής πίεσης (στη στατική πίεση του περιβάλλοντος) p και η ταχύτητα σωματιδίων u σε όλα τα σημεία της διατομής είναι η ίδια. Η επιφάνεια κύματος ή επιφάνεια φάσης, ορίζεται ως η επιφάνεια όλων των σημείων των οποίων η p και η u έχουν το ίδιο πλάτος και φάση. Καθώς είναι ένα επίπεδο φυσιολογικό στην κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος, στην οποία περίπτωση είναι ο διαμήκης άξονας του σωλήνα. Οι βασικές γραμμικές εξισώσεις για την περίπτωση

Αρχή Διατήρησης της μάζας (mass continuity)

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.5)$$

Δυναμική ισορροπία (dynamical equilibrium)

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

Εξίσωση ενέργειας (ισοεντροπικότητα) energy equation (isentropicity)

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_x = \frac{\gamma(p_0 + p)}{\rho_0 + \rho} \simeq \frac{\gamma p_0}{\rho_0} = \alpha_0^2 \quad (2.7)$$

Όπου z είναι η αξονική συντεταγμένη, p_0 η πίεση του περιβάλλοντος $\frac{p}{p_0} \ll 1$ και ρ_0 η πυκνότητα του μέσου $\frac{\rho}{\rho_0} \ll 1$. Ως s ορίζεται η εντροπία.

$$\rho = \frac{p}{\alpha_0^2}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{\alpha_0^2} \frac{\partial p}{\partial t}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial z} = \frac{1}{\alpha_0^2} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.8)$$

Η εξίσωση της δυναμικής ισορροπίας αναφέρεται επίσης και ως εξίσωση ορμής. Παρόμοια η εξίσωση για την Αρχή Διατήρησης της μάζας συνήθως αποκαλείται εξίσωση συνέχειας. Αντικαθιστώντας την προηγούμενη εξίσωση (2.8), στην εξίσωση συνέχειας (2.5) και απαλοφώνοντας το u από την εξίσωση συνέχειας (2.5) και από της δυναμικής ισορροπίας (2.6), διαφοροποιώντας την πρώτη εξίσωση σε σχέση με το t , και την δεύτερη σε σχέση με το z , ύστερα αφαιρώντας, έχουμε σαν αποτέλεσμα.

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \alpha_0^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] p = 0 \quad (2.9)$$

Αυτή η γραμμική, μονοδιάστατη ομοιογενής μερική διαφορική εξίσωση με σταθερούς συντελεστές έχει γενική λύση.

$$p(z, t) = C_1 f(z - a_0 t) + C_2 g(z + a_0 t) \quad (2.10)$$

Εάν η εξάρτηση του χρόνου θεωρείται ότι είναι της εκθετικής μορφής $e^{j\omega t}$, τότε η εξίσωση (2.10) παίρνει την μορφή.

$$p(z, t) = C_1 e^{j\omega(t - \frac{z}{a_0})} + C_2 e^{j\omega(t + \frac{z}{a_0})} \quad (2.11)$$

Το πρώτο κομμάτι αυτής της εξίσωσης ισούται με C_1 για $z = t = 0$ και επίσης για $z = a_0 t$. Ως εκ τούτου, αντιπροσωπεύει ένα διαμήκες κύμα προχωράει προς τα εμπρός χωρίς να εξασθενεί. Η ταχύτητα a_0 είναι η ταχύτητα της διάδοσης του κύματος. Η εξίσωση (2.9) είναι η εξίσωση κύματος και η λύση της (2.11), αντιπροσωπεύει την υπέρθεση δύο αρμονικών κυμάτων με πλάτη C_1 και C_2 τα οποία κύματα κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Η εξίσωση (2.9) ονομάζεται μονοδιάστατη εξίσωση κύματος και η ταχύτητα της διάδοσης του κύματος a_0 , επίσης ονομάζεται φασική ταχύτητα ή ταχύτητα του ήχου. Η ακουστική πίεση p έχει γραμμική σχέση με την ταχύτητα σωματιδίων u ή, για την συγκεκριμένη περίπτωση, ταχύτητα δυναμικής φ όπου ορίζεται από τις σχέσεις.

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad p = -\rho_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2.12)$$

Η εξαρτημένη μεταβλητή στην εξίσωση (2.9) θα μπορούσε επίσης να είναι το u ή το φ . Ενόψει αυτής της γενικότητας, τα χαρακτηριστικά του κύματος στην εξίσωση (2.9) βρίσκονται στον διαφορικό τελεστή που ονομάζεται μονοδιάστατος τελεστής κυμάτων.

$$L = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - a_0^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.13)$$

Κατά την παραγοντοποίηση αυτού του τελεστή κυμάτων,

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} - a_0^2 \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + a_0 \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial}{\partial t} - a_0 \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (2.14)$$

γίνεται αντιληπτό ότι το προς τα εμπρός κινούμενο κύμα, δηλαδή το πρώτο μέρος της εξίσωσης (2.10) ή (2.11), είναι η λύση της εξίσωσης.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + a_0 \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2.15)$$

Ενώ το προς τα πίσω κινούμενο κύμα, το δεύτερο μέρος της εξίσωσης (2.10) ή (2.11) είναι η λύση για την εξίσωση.

$$\frac{\partial p}{\partial t} - a_0 \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

Η εξίσωση (2.11) μπορεί να αναδιαταχθεί ως

$$p(z, t) = [C_1 e^{-jkz} + C_2 e^{+jkz}] e^{j\omega t} \quad (2.17)$$

Όπου το $k = \frac{\omega}{a_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$. Το k ονομάζεται αριθμός κύματος ή σταθερά διάδοσης και λ είναι το μήκος κύματος. Η ταχύτητα σωματιδίων u επίσης ικανοποιεί την ίδια εξίσωση κύματος, η οποία μπορεί να γραφτεί

$$u(z, t) = [C_3 e^{-jkz} + C_4 e^{+jkz}] e^{j\omega t} \quad (2.18)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (2.17) και (2.18) στην εξίσωση δυναμικής ισορροπίας (2.6), έχουμε ως αποτέλεσμα.

$$C_3 = \frac{C_1}{\rho_0 \alpha_0}, \quad C_4 = -\frac{C_2}{\rho_0 \alpha_0}$$

Και ως εκ τούτου,

$$u(z, t) = \frac{1}{Z_0} (C_1 e^{-jkz} - C_2 e^{+jkz}) e^{j\omega t} \quad (2.19)$$

Όπου $Z_0 = \rho_0 \alpha_0$ είναι η χαρακτηριστή σύνθετη αντίσταση του μέσου, που ορίζεται ως ο λόγος της ακουστικής πίεσης και της ταχύτητας σωματιδίου ενός διαμήκης προοδευτικού κύματος. Για ένα διαμήκης κύμα που κινείται κατά μήκος ενός σωλήνα, θα μπορούσε να οριστεί ως η ταχύτητα όγκου ($=Su$) και η ταχύτητα της μάζας.

$$u = \rho_0 S u \quad (2.20)$$

Όπου S είναι το εμβαδόν της διατομής του σωλήνα. Οι αντίστοιχες τιμές της χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης που ορίζονται ως ο λόγος της ακουστικής πίεσης προς την ταχύτητα ενός απλού προοδευτικού κύματος θα είναι τότε:

$$\text{Ταχύτητα σωματιδίων, } u: \rho_0 \alpha_0$$

$$\text{Ταχύτητα όγκου: } \frac{\rho_0 \alpha_0}{S} \quad (2.21a)$$

$$\text{Ταχύτητα μάζας, } v: \frac{\alpha_0}{S}$$

Για τις δύο τελευταίες περιπτώσεις, η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση περιλαμβάνει την περιοχή S του σωλήνα. Καθώς δεν αποτελεί ιδιότητα μόνο του μέσου, θα ήταν πιο ενδεδειγμένο να το ονομάσουμε χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση του σωλήνα. Η αντίστοιχη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση υποδηλώνεται με το σύμβολο Y .

$$Y_0 = \frac{\alpha_0}{S} \quad (2.21b)$$

Οι εξισώσεις (2.19) και (2.21) δίνουν την ακόλουθη έκφραση για την ταχύτητα.

$$u(z, t) = \frac{1}{Y_0} (C_1 e^{-jkz} - C_2 e^{+jkz}) \quad (2.22)$$

Οι σταθερές C_1 και C_2 στις εξισώσεις (2.17) και (2.22) καθορίζονται από τις συνοριακές συνθήκες.

2.3 Τρισδιάστατα κύματα σε ένα σταθερό μέσο

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι περιορισμοί της θεωρίας των διαμηκών κυμάτων, είναι απαραίτητο να εξεταστεί η γενική διάδοση των κυμάτων τριών διαστάσεων σε σωλήνες. Οι βασικές γραμμικές εξισώσεις που αντιστοιχούν στις εξισώσεις (2.5) και (2.7) για τα κύματα σταθερό μέσο είναι.

$$\text{Μαζική συνέχεια: } \rho_0 \nabla \cdot u + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.23)$$

$$\text{Δυναμική ισορροπία: } \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla p = 0 \quad (2.24)$$

Η εξίσωση είναι η ίδια με την εξίσωση (2.7) ή την εξίσωση (2.8). Χρησιμοποιώντας αυτή την εξίσωση στην εξίσωση (2.23), διαφοροποιώντας την εξίσωση (2.23) σε σχέση με το t , λαμβάνοντας την απόκλιση της εξίσωσης (2.24) και αφαιρώντας, παίρνουμε την απαιτούμενη τρισδιάστατη εξίσωση κύματος.

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} - a_0^2 \nabla^2 \right] p = 0 \quad (2.25)$$

Όπου ο τελεστής Laplace ∇^2 δίνεται ως εξής.

Στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (π.χ για τετράγωνους σωλήνες).

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.26)$$

Στο κυλινδρικό σύστημα πολικών συντεταγμένων (π.χ για κυλινδρικούς σωλήνες).

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.27)$$

2.4 Τετράγωνοι σωλήνες

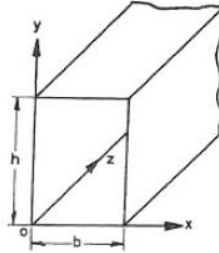
Χρησιμοποιώντας τον διαχωρισμό των μεταβλητών, η γενική λύση της τρισδιάστατης κυματικής εξίσωσης (2.25) μαζί με τον μετασχηματισμό Laplace δίνεται από την εξίσωση (2.26) μπορεί να γίνει ως.

$$p(x, y, z, t) = (C_1 e^{-jk_z z} + C_2 e^{+jk_z z}) (e^{-jk_x x} + C_3 e^{+jk_x x}) (e^{-jk_y y} + C_4 e^{+jk_y y}) e^{j\omega t} \quad (2.28)$$

Με την κατάσταση συμβατότητας

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k_0^2 \quad (2.29)$$

Για ένα σωλήνα με άκαμπτο τοίχωμα πλάτους b και ύψους h , οι οριακές συνθήκες είναι



Εικόνα 2.4.2 : Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) σε τετράγωνο σωλήνα

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \text{για } x = 0 \text{ και } x = b$$

Και

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \text{για } y = 0 \text{ και } y = h$$

Αντικαθιστώντας αυτές τις οριακές συνθήκες στην εξίσωση (2.29), αντίστοιχα

$$C_3 = 1, \quad k_x = \frac{m\pi}{b}, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Και

(2.31)

$$C_4 = 1, \quad k_y = \frac{n\pi}{h}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Η εξίσωση (2.29) γίνεται

$$p(x, y, z, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \cos \frac{m\pi x}{b} \cos \frac{n\pi y}{h} (C_{1,m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} + C_{2,m,n} e^{+jk_{z,m,n}z}) e^{j\omega t} \quad (2.32)$$

Όπου ο κυματάρηθος για τον τρόπο δόνησης (m,n) , $k_{z,m,n}$ δίνεται από την σχέση

$$k_{z,m,n} = \left[k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{b} \right)^2 - \left(\frac{n\pi}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

Προκειμένου να υπολογισθεί η αξονική ταχύτητα σωματιδίων που αντιστοιχεί στον τρόπο δόνησης (m,n), κάνουμε χρήση της εξίσωσης της ορμής.

$$k_{z,m,n} \frac{\partial u_{z,m,n}}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

Ως αποτέλεσμα

$$u_{z,m,n} = \frac{-\partial p / \partial z}{j\omega\rho_0} = \frac{k_{z,m,n}}{k_0\rho_0\alpha_0} \left\{ C_1 e^{-jk_{z,m,n}z} - C_2 e^{+jk_{z,m,n}z} \right\} \cos \frac{m\pi x}{b} \cos \frac{n\pi y}{h} e^{j\omega t} \quad (2.34)$$

Έπειτα με την βοήθεια ολοκληρωμάτων μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα των σωματιδίων.

$$\begin{aligned} u_{z,m,n} &= \rho_0 \int_0^h \int_0^b u_{z,m,n} dx dy \\ &= \int_0^b \cos \frac{m\pi x}{b} dx \int_0^h \cos \frac{n\pi y}{h} dy \frac{k_{z,m,n}}{\omega} \left\{ C_1 e^{-jk_{z,m,n}z} - C_2 e^{+jk_{z,m,n}z} \right\} e^{j\omega t} \end{aligned}$$

Έπειτα

$$\begin{aligned} v_{z,m,n} &= 0 \quad \text{για} \quad m \neq 0, \quad n \neq 0 \\ &= \frac{bh}{a_0} \left\{ C_1 e^{-jk_0 z} - C_2 e^{+jk_0 z} \right\} \quad \text{για} \quad m = n = 0 \end{aligned}$$

Συνεπώς, η ακουστική ταχύτητα μάζας είναι μηδενική μόνο για το διαμήκες κύμα ή αξονικό τρόπο δόνησης (0,0) για τον οποίο χρησιμοποιούμε την εξίσωση (2.22). Παρεμπιπτόντως δείχνει ότι η έννοια της ακουστικής ταχύτητας όγκου ή της ταχύτητας των σωματιδίων του αέρα, δεν έχει καμία σημασία για υψηλής τάξης τρόπους δονήσεων. Η εξίσωση (2.34) δείχνει ότι για την ίδια ακουστική πίεση, η ένταση της ταχύτητας σωματιδίων για αξονικό τρόπο δόνησης (m, n) είναι μικρότερη από $\left(\frac{k_{z,m,n}}{k_0} \varphi_{ορές} \right)$ το διαμήκες κύμα. Μπορεί να σημειωθεί ότι για τον αξονικό τρόπο δόνησης (0,0), ισχύει $k_{z,m,n} = k_0$ και η εξίσωση (2.32) ανάγεται στην εξίσωση (2.17). Έτσι, διαμήκη κύματα αντιστοιχούν στον αξονικό τρόπο δόνησης (0,0) στην λύση της εξίσωσης (2.32). Οποιοσδήποτε αξονικός τρόπος δόνησης (m, n) θα διαδοθεί μη εξασθενημένος αν

$$k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 > 0$$

ή

$$\frac{4}{\lambda^2} - \left(\frac{m}{b}\right)^2 - \left(\frac{n}{h}\right)^2 > 0$$

ή

$$\lambda < \frac{2}{\left\{\left(\frac{m}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (2.35\alpha)$$

Προφανώς, ένα διαμήκες κύμα οποιουδήποτε μήκους κύματος μπορεί να μεταδοθεί χωρίς εξασθένηση, ενώ ένας υψηλότερος τρόπος μπορεί να μεταδοθεί μόνο καθώς ικανοποιείται η ανισότητα (2.35α). Έτσι, ο πρώτος τρόπος δόνησης (0, 1) θα διαδοθεί αν:

$$\lambda < 2h \quad \text{ή} \quad f > \frac{a_0}{2h} \quad (2.35b)$$

Μόνο ένα διαμήκες κύμα θα μπορούσε να μεταδοθεί, καθώς όλοι οι υψηλότεροι τρόποι δόνησης, εάν υπάρχουν θα αποκόπτονται, δηλαδή θα εξασθενούν εκθετικά αν η συχνότητα είναι αρκετά μικρή.

$$\lambda > 2h \quad \text{ή} \quad f < \frac{a_0}{2h} \quad (2.36)$$

Έτσι ώστε όπου το h είναι η μεγαλύτερη από τις δύο εγκάρσιες διαστάσεις του ορθογωνίου σωλήνα.

2.5 Κυκλικοί σωλήνες

Η εξίσωση κύματος (2.27), με τον τελεστή Laplace, ρυθμίζει την διάδοση του κύματος στους κυκλικούς σωλήνες. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο χωρισμού μεταβλητών και γράφοντας την συνάρτηση του χρόνου ως $e^{j\omega t}$ και την συνάρτηση θ ως $e^{jm\theta}$, έχουμε

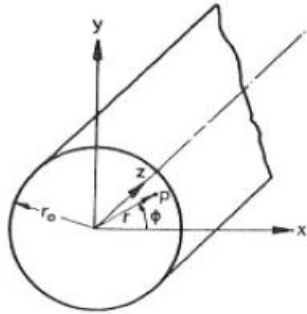
$$p(r, \theta, z, t) = \sum_m R_m(r) e^{jm\theta} Z(z) e^{j\omega t} \quad (2.37)$$

Με την συνάρτηση z να εξαρτάται από την εξίσωση (1.28) με

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} = -k_z^2 Z \quad (2.38)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (2.37) και (2.38) στην εξίσωση κύματος, παίρνουμε μία εξίσωση Bessel για $R(r)$:

$$\frac{d^2 R_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR_m}{dr} + \left(k_0^2 - k_z^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) R_m = 0 \quad (2.39)$$



Εικόνα 2.5.3: Κυλινδρικό πολικό σύστημα συντεταγμένων (r, φ, z) σε κυκλικό σωλήνα.

Γενική λύση

$$R_m(k, r) = C_3 J_m(k, r) + C_4 N_m(k, r) \quad (2.40)$$

Όπου

$$k_r^2 = k_0^2 - k_z^2 \quad (2.41)$$

$N_m(k, r)$ τείνει στο άπειρο για $r = 0$ πάνω στον άξονα. Αλλά παντού η ακουστική πίεση πρέπει να είναι πεπερασμένη. Συνεπώς η σταθερά C_4 πρέπει να είναι μηδέν. Επίσης, η ακτινική ταχύτητας στους τοίχους $r = r_0$ πρέπει να είναι μηδέν. Συνεπώς

$$\frac{dJ_m(k, r)}{dr} = 0 \quad \text{για } r = r_0 \quad (2.42)$$

Ωστόσο η σταθερά k , παίρνει μόνο τέτοιες διακριτές τιμές που ικανοποιούν την εξίσωση

$$J'_m(k, r_0) = 0 \quad (2.43)$$

Με την ένδειξη της τιμής του k , που αντιστοιχεί στην νιοστή ρίζα αυτής της εξίσωσης όπως $k_{r,m,n}$, παίρνει

$$p(r, \theta, z, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} J_m(k_{r,m,n}) e^{jm\theta} e^{j\omega t} (C_{1,m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} + C_{2,m,n} e^{+jk_{z,m,n}z}) \quad (2.44)$$

Όπου

$$k_{z,m,n} = (k_0^2 - k_{r,m,n}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.45)$$

2.6 Κλειστός - Ανοικτός σωλήνας

Στο κλειστό άκρο, η μετατόπιση των σωματιδίων του αέρα μέσα στο σωλήνα πρέπει να είναι μηδέν, γιατί το κλείσιμο δεν επιτρέπει οποιαδήποτε μετατόπιση στο σημείο αυτό. Οι συχνότητες για στάσιμα κύματα υπολογίζονται από το μήκος του σωλήνα.

$$L = n \frac{\lambda}{4}, \quad n = 1, 3, 5, \dots (n = \text{περιττό}) \quad (2.46)$$

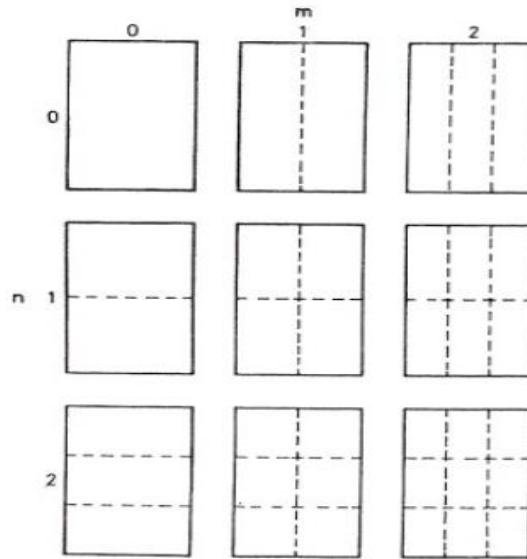
Η βασική συχνότητα υπολογίζεται όταν για $n=1$ και οι παραπάνω συχνότητες ονομάζονται αρμονικές ($n=3, 5, 7, \dots$).

2.7 Ανοικτός - Ανοικτός σωλήνας

Θεωρούμε την περίπτωση του ανοιχτού σωλήνα και από τις δύο πλευρές. Στα δύο άκρα του σωλήνα είναι φυσικό να έχουμε $\Delta p = 0$, ώστε να έχουμε δεσμούς πίεσης και συνεπώς κοιλίες μετατόπισης ($y = \pm A_0$). Οι συχνότητες για στάσιμα κύματα δίνονται ως συνάρτηση του μήκους του σωλήνα.

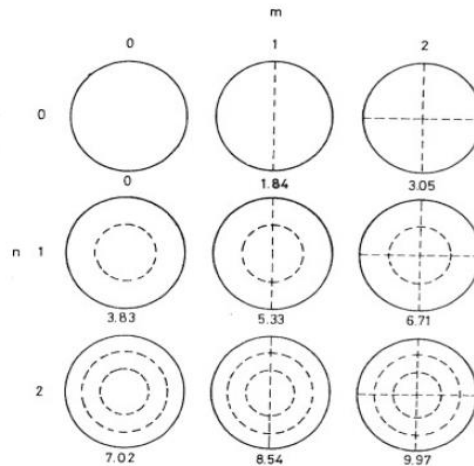
$$L = n \frac{\lambda}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.47)$$

Υπάρχουν όλες οι αρμονικές της βασικής, περιπτές και άρτιες. Σημαντικός παράγοντας αποτελεί και η διάμετρος του σωλήνα. Η διάμετρος έχει να κάνει με το πλάτος των στάσιμων κυμάτων που είναι η έντασή τους. Καθώς το πρώτο μηδέν του J'_0 ή του J_1 είναι μηδέν, $k_{r,0,1} = 0$ και $k_{z,0,1} = k_0$. Έτσι για τον τρόπο δόνησης (0,1) της εξίσωσης (2.44) μειώνεται στην εξίσωση (2.17), την εξίσωση για την διάδοση διαμηκών κυμάτων. Επομένως το διαμήκες κύμα αντιστοιχεί στον τρόπο δόνησης (0, 1) της εξίσωσης (2.44) και μεταδίδεται χωρίς εξασθένηση. Το n αντιπροσωπεύει τον αριθμό του μηδενός του παραγώγου $J'_m(k_r r_0)$ με την εξίσωση (2.43). Αυτό εισάγει μια ανομοιότητα μεταξύ του συμβόλου για τους ορθογώνιους και τους κυκλικούς σωλήνες. Στους τετράγωνους σωλήνες, το m και το n αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των τρόπων δόνησης στην κατανομή της εγκάρσιας πίεσης όπως φαίνεται στην εικόνα 1.4.



Εικόνα 2.7.4: Γραμμές κατανομής εγκάρσιας πίεσης σε ορθογώνιο σωλήνα έως $m=2$, $n=2$

Μία παρόμοια εικόνα θα μπορούσε να προκύψει για τους κυκλικούς σωλήνες εάν το n ήταν να υποδηλώσει τον αριθμό των κυκλικών τρόπων δόνησης στην κατανομή της εγκάρσιας πίεσης. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 1.4. Ο διαμήκης τρόπος δόνησης θα έχει την τιμή $(0,0)$ σε κυκλικούς και τετράγωνους σωλήνες. Τα m και n , θα έχουν την ίδια σημασία, δηλαδή τον αριθμό των τρόπων δόνησης στις αντίστοιχες διευθύνσεις στην κατανομή της εγκάρσιας πίεσης.



Εικόνα 2.7.5: Γραμμές κατανομής εγκάρσιας πίεσης σε κυκλικό σωλήνα έως $m=2$, $n=2$

Το $n = 0$ θα αντιπροσωπεύει την πρώτη ρίζα της εξίσωσης (2.43) και το n θα αντιπροσωπεύει την $(n + 1)$ ρίζα αυτής. Στην εξίσωση (2.44), η άθροιση $n = 1$ προς το ∞ (άπειρο), θα διαβαστεί όπως στην εξίσωση (2.32) για τετράγωνους σωλήνες. Οι πρώτοι δύο υψηλοί τρόποι δόνησης $(1, 0)$ και $(0, 1)$ θα κοπούν εάν $k_{z,1,0}$ και $k_{z,0,1}$ είναι

πραγματικοί, δηλαδή αν $k_0 > k_{r,1.0}$ και $k_{r,0.1}$. Το πρώτο μηδέν του J'_1 συμβαίνει στο 1.84 και το δεύτερο μηδέν του J'_0 στο 3.83. Έτσι η περικοπή των αριθμών κύματος θα ήταν $1.84/r_0$ και $3.83/r_0$, αντίστοιχα. Δηλαδή ο πρώτος διαμετρικός τρόπος αρχίζει να διαδίδεται στο $k_0 r_0 = 1.84$ κι ο πρώτος τρόπος δόνησης συμμετρίας στον άξονα στο $k_0 r_0 = 3.83$. Αν η συχνότητα είναι αρκετά μικρή ή το μήκος κύματος αρκετά μεγάλο έτσι ώστε όπου D είναι η διάμετρος του $2r_0$, τότε μόνο τα διαμήκη κύματα θα μπορέσουν να διαδοθούν.

$$k_0 r_0 < 1.84, \quad \text{ή} \quad \lambda > \frac{\pi}{1.84} D, \quad \text{ή} \quad f < \frac{1.84}{\pi D} a_0, \quad (2.48)$$

Υποκαθιστώντας τα (m, n) του τρόπου δόνησης της συνιστώσας της εξίσωσης (2.44) στην εξίσωση της δυναμικής ισορροπίας για την αξονική κατεύθυνση, που είναι,

$$\rho_0 \frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

$$u_{z,m,n} = \frac{\frac{\partial p}{\partial z}}{j\omega\rho_0}$$

$$= J_m(k_{r,m,n} r) e^{j\pi\theta} e^{j\omega t} \frac{k_{z,m,n}}{k_0 \rho_0 a_0} \{C_{1,m,n} e^{-Jk_{z,m,n} z} - C_{2,m,n} e^{+Jk_{z,m,n} z}\} \quad (2.49)$$

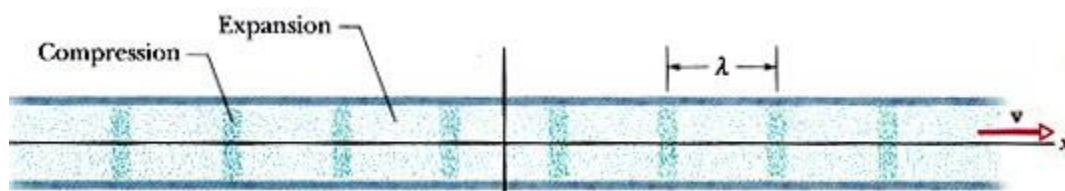
Έτσι σε σύγκριση με το διαμήκες κύμα, η ακουστική ταχύτητα σωματιδίων για τον (m, n) τρόπο δόνησης είναι $k_{z,m,n}/k_0$ φορές, για την ίδια ακουστική πίεση. Βέβαια όπως φαίνεται για τους τετράγωνους σωλήνες, ο όγκος ή η ταχύτητα της μάζας δεν έχει νόημα για υψηλότερους τρόπους δόνησης.

Κεφάλαιο 3

Το αντηχείο της μαρίμπας

3.1 Εισαγωγή στα πυκνώματα και αραιώματα μέσα στο σωλήνα

Το κύμα που δημιουργείται στην επιφάνεια του νερού, είναι εγκάρσιος τύπος κύματος επειδή η μετατόπιση του νερού είναι κάθετη στην κατεύθυνση του ταξιδιού. Το ηχητικό κύμα, είναι ένας διαμήκης τύπος κύματος επειδή η μετατόπιση του νερού είναι παράλληλη στην κατεύθυνση του ταξιδιού. Τα μόρια του αέρα δονούνται μπρος-πίσω στην κατεύθυνση που το κύμα ταξιδεύει, δημιουργώντας τις ζώνες του συμπιεσμένου αέρος, όπως απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα.



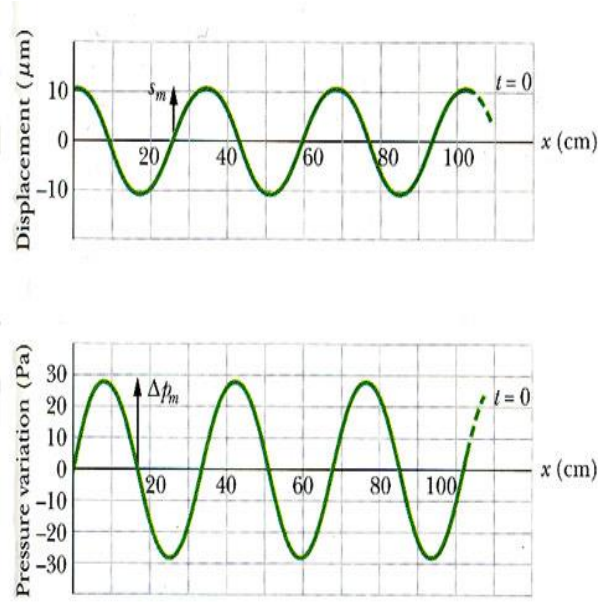
Εικόνα 3.1.1: Πυκνώματα και αραιώματα του αέρα στον σωλήνα

Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει τα ηχητικά κύματα, τα μαύρα σημεία να απεικονίζουν τα σωματίδια του αέρα.



Εικόνα 3.1.2: Πυκνώματα και αραιώματα σωματιδίων του αέρα

Τα ηχητικά κύματα μπορούν να απεικονισθούν γραφικά με δύο μεθόδους. Η πρώτη είναι η αλλαγή στην πίεση του αέρα και η δεύτερη η μετατόπιση στον αέρα. Και οι δύο μέθοδοι, συγκρίνονται στην παρακάτω απεικόνιση.

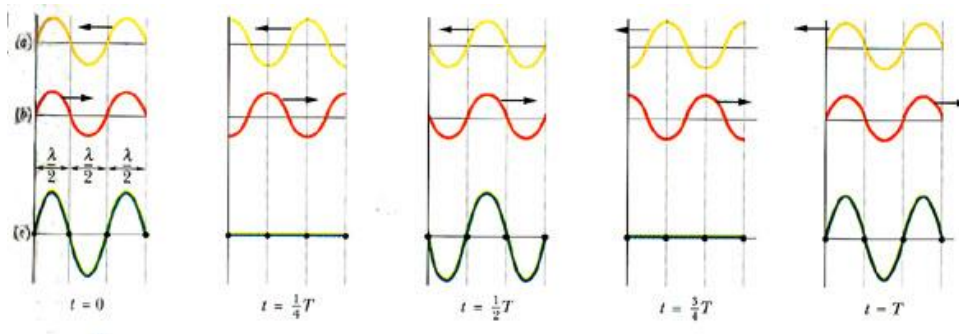


Εικόνα 3.1.3: Σύγκριση αλλαγή πίεσης αέρα και μετατόπισης στον αέρα.

Ένας κόμβος της μετατόπισης είναι η ίδια θέση με μια κοιλία της πίεσης. Η ζώνη μεταξύ μιας περιοχής συμπιεσμένου αέρα και μια ζώνη εκτεταμένου αέρα, είναι η ζώνη μέγιστης μετατόπισης. Η ζώνη της μέγιστης μετατόπισης είναι η ζώνη όπου τα μόρια του αέρα κινούνται στο μέγιστο βαθμό. Η διάκριση των κυμάτων μετατοπίσεως και πίεσης είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επεξήγηση του φαινομένου αντήχησης στη μαρίμπα.

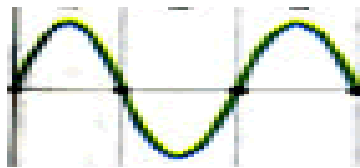
3.2 Στάσιμα κύματα στο αντηχείο

Το ηχείο της μαρίμπας είναι ένας σωλήνας που είναι ανοιχτός από την μία πλευρά και κλειστός στην άλλη. Ένα ηχητικό κύμα, ταξιδεύει από τον σωλήνα και πίσω από το κλειστό μέρος της μαρίμπας. Εάν ο σωλήνας έχει το κατάλληλο μήκος (περίπου το $1/4$ του μήκους κύματος) ένα στάσιμο κύμα θα είναι δυνατόν να αναπτυχθεί. Το στάσιμο κύμα διαμορφώνεται από τον συνδυασμό ηχητικών κυμάτων που ταξιδεύουν αντίθετα σε κατεύθυνση. Η παρακάτω εικόνα μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση ενός στάσιμου κύματος.



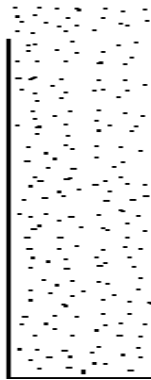
Εικόνα 3.2.1: Δημιουργία στάσιμου κύματος μέσα στον σωλήνα.

Το κίτρινο κύμα αντιπροσωπεύει το κύμα που ταξιδεύει στο σωλήνα και το κόκκινο το κύμα που ταξιδεύει από τον σωλήνα. Όταν τα κύματα συνδυαστούν, τότε δημιουργείται το στάσιμο κύμα με το πράσινο χρώμα. Σε χρόνο 0 δευτερόλεπτα, τα εισερχόμενα και τα εξερχόμενα είναι σε φάση. Σε χρόνο $1/4 \cdot T$, τα εισερχόμενα και εξερχόμενα έχουν διαφορά φάσης 180 μοίρες και όταν προστίθονται το σχέδιο των κυμάτων αποτελεί μία επίπεδη γραμμή. Καθώς προχωράμε, μέσω ενός κύκλου βλέπουμε ένα σχέδιο όπου τα κύματα κινούνται πάνω-κάτω, αλλά σε ισχύ. Κατά τρόπο ενδιαφέροντα, δεν υπάρχει καμία μετακίνηση στους κόμβους. Αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



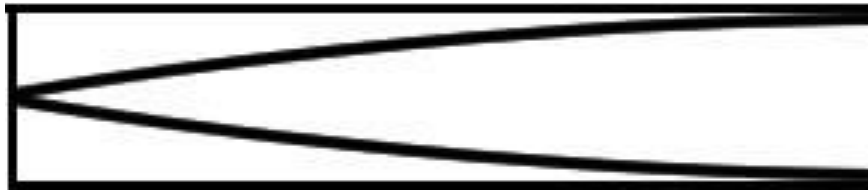
Εικόνα 3.2.3: Πρόσθεση κυμάτων χωρίς διαφορά φάσης.

Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται για $1/4$ στάσιμο κύμα στο σωλήνα. Τα μαύρα αντιπροσωπεύουν τα μόρια του αέρα. Στο κλειστό μέρος, εμφανίζεται μία κοιλιά πίεσης ενώ στο ανοικτό ένας κόμβος πίεσης.

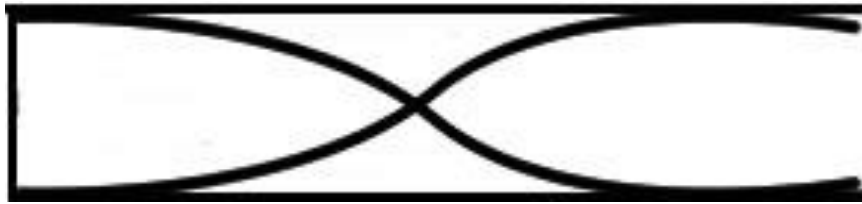


Εικόνα 3.2.4: Πυκνώματα και αραιώματα μορίων αέρα στον σωλήνα για $1/4$ στάσιμο κύμα.

Η αντήχηση εμφανίζεται επειδή μέρος της ηχητικής ενέργειας απεικονίζεται στο πίσω μέρος του σωλήνα καθώς βγαίνει. Κοντά στο άνοιγμα του σωλήνα η σύνθετη αντίσταση μειώνεται. Η αλλαγή στη σύνθετη αντίσταση εμφανίζεται λόγω της αντανάκλασης των κυμάτων πίσω στο σωλήνα. Το απεικονισμένο κύμα υποβάλλεται σε μια αλλαγή φάσης 180 μοιρών, η οποία απαιτείται για την συντήρηση του στάσιμου κύματος. Ο Helmholtz περιέγραψε την αντανάκλαση αυτή ως εξής: “Στη διέγερση μας, ένα συμπυκνωμένο κύμα πηγαίνει από τη μία πλευρά στην άλλη, ώσπου γίνεται αλλαγή στην φάση και με τον ίδιο τρόπο αυτό επαναλαμβάνεται και δεύτερη φορά”. Η απεικόνιση παρακάτω παρουσιάζει ένα στάσιμο κύμα για $1/4$ με τον κόμβο μετατοπίσεων στο κλειστό τέλος.



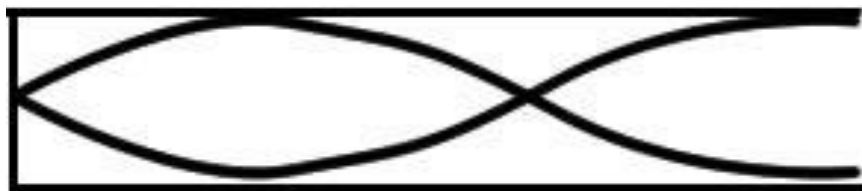
Εικόνα 3.2.5: 1ος αρμονικός τρόπος ταλάντωσης.



Εικόνα 3.2.6: 2ος αρμονικός τρόπος ταλάντωσης.



Εικόνα 3.2.7: Νότα στο κλειστό άκρο.



Εικόνα 3.2.8: $3/4$ (Στάσιμο κύμα).

Η μορφή 1/4 κύμα αντιπροσωπεύει τη συνθήκη συντονισμού για τη θεμελιώδη. Στη συνέχεια, η μορφή κύματος 3/4 αντιπροσωπεύει τη συνθήκη συντονισμού για την τρίτη αρμονική ($3 * 1/4 = 3/4$), η οποία είναι η πρώτη διαθέσιμη αντήχηση για ένα αρμονικό

3.3 Υπολογίζοντας το μήκος του σωλήνα.

Ωστόσο, ο υπολογισμός για το μήκος του σωλήνα για το ηχείο δίνεται από τον παρακάτω τύπο. Όπου το L αντιπροσωπεύει το μήκος του σωλήνα (κλειστό – ανοιχτό σωλήνα) σε cm, το V την ταχύτητα του ήχου (στους 20 °C είναι 343 m/sec), το f την επιθυμητή συχνότητα σε Hz και το 4 είναι ο παράγοντας τετάρτου του μήκους κύματος.

$$L = \frac{v}{4f} \quad (3.1)$$

Αυτή η φόρμουλα είναι στην πραγματικότητα ο τύπος να υπολογιστεί το μήκος του 1/4 ενός ηχητικού κύματος σε μία δεδομένη συχνότητα. Δεδομένου ότι η ταχύτητα του ήχου ποικίλει με τη θερμοκρασία του αέρα, το μήκος κύματος σε δεδομένη συχνότητα θα ποικίλει με την θερμοκρασία του αέρα. Πολλές μαρίμπες έχουν πώματα στο σωλήνα που δεν είναι ρυθμιζόμενα (τουλάχιστον όχι εύκολα). Ηχεία αυτού του σχεδιασμού μπορούν να συντονιστούν σωστά μόνο σε μία θερμοκρασία του αέρα, αφού το μήκος κύματος μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα κρίσιμο για μπάσα ηχεία, όπου οι αλλαγές στο μήκος κύματος είναι μεγάλες. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο υψηλής ποιότητας μαρίμπες έχουν ρυθμιζόμενες στάσεις ηχείου στο τέλος του μπάσου. Ορισμένες έχουν επίσης ρυθμιζόμενες στάσεις σε όλα τα ηχεία, οι οποίες επιτρέπουν μικρορυθμίσεις. Θα πρέπει να ενταχθεί κι ένας συντελεστή διόρθωσης στον υπολογισμό. Αλλά, όπως αποδεικνύεται το κύμα δεν ανακλάται πίσω στον σωλήνα όπως στην εισαγωγή αλλά λίγο πριν την εισαγωγή. Μπορεί να υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που μπορούν να προστεθούν στη διόρθωση, καθώς, όπως είναι η παρουσία της ράβδου. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαίο να αφαιρέσουμε ένα τέλος διόρθωσης από το μήκος του σωλήνα. Η θεωρητική διόρθωση για ένα ηχείο κλειστό στο ένα άκρο είναι $0,61 * r$, όπου r είναι η εσωτερική ακτίνα του σωλήνα. Αλλά έχουμε κατά νου ότι αυτή η θεωρητική διόρθωση είναι για ένα ηχείο χωρίς εμπόδια κοντά στο ανοιχτό άκρο του. Στην περίπτωση της μαρίμπας, η πραγματική διόρθωση είναι μεγαλύτερη από $0,61 * r$. Λαμβάνουμε υπόψη ότι το υπολογιζόμενο μήκος του σωλήνα είναι από την επιφάνεια του πώματος, έτσι θα πρέπει να προστεθεί επιπλέον μήκος για να φιλοξενήσει το πάχος του πώματος. Και αν θέλουμε να κατασκευάσουμε ένα ρυθμιζόμενο πώμα, έτσι ώστε το ηχείο μπορεί να συντονίζεται με τη ράβδο και σε διαφορετικές θερμοκρασίες του αέρα, τότε θα πρέπει να περιλάβουμε την υψηλότερη θερμοκρασία του αέρα ώστε να μπορούμε να την κουρδίσουμε.

3.4 Πραγματικά μήκη σωλήνα που απαιτούνται για την αντήχηση της μαρίμπας

Μετά την ολοκλήρωση της μαρίμπας, ακολουθεί το κούρδισμα των αντηχείων. Το κούρδισμα έγινε με το αυτί, ακούγοντας για μέγιστη αντήχηση, καθώς η μπάρα χτυπήθηκε με σφυρί, προσαρμόζοντας το πώμα στο αντηχείο, όπως απαιτείται. Μετά την τοποθέτηση όλων των πωμάτων, η απόσταση από κάθε πώμα στο ανοικτό άκρο του σωλήνα μετρήθηκε (με εξαίρεση τα αντηχεία που ήταν γωνία, όπου η ακριβής μέτρηση δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί). Βρέθηκε ότι τα μήκη των σωλήνων ήταν μικρότερα από τα μήκη που υπολογίστηκαν με τη διόρθωση $0,61 \cdot r$. Η διόρθωση που απαιτείται για την μαρίμπας θα πρέπει να βρίσκεται στο εύρος των $0.78 - 0.85 r$.

Κεφάλαιο 4

Κατασκευή

4.1 Επιλέγοντας τους σωλήνες που θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή.

Οι συντονιστές ή οι σωλήνες που αναρτώνται κάτω από τις ράβδους ενισχύουν τον ήχο του οργάνου και οι οποίες σωλήνες είναι συνήθως από ξύλο, χαλκό ή αλουμίνιο. Για την κατασκευή επιλέχθηκαν λόγω κόστους σωλήνες από πλαστικό pvc.



Εικόνα 4.1.1: Μαρίμπα με σωλήνες από ξύλο.



Εικόνα 4.1.2: Μαρίμπα με σωλήνες από χαλκό.



Εικόνα 4.1.3: Μαρίμπα με σωλήνες από αλουμίνιο.



Εικόνα 4.1.4: Μαρίμπα με σωλήνες από πλαστικό PVC.

4.2 Υπολογίζοντας την συχνότητα κάθε νότας.

Ο υπολογισμός κάθε νότας γίνεται με την βοήθεια του τύπου

$$f_n = \frac{nC}{4L} \quad (4.2.1)$$

Όπου f_n είναι η συχνότητα που θα υπολογίσουμε, n ο αρμονικός που θέλουμε να εξετάσουμε, C η ταχύτητα του αέρα $C = 343 \text{ m/s}$ και L το μήκος του σωλήνα. Ως σημείο αναφοράς επιλέχθηκε η νότα G4 που βρίσκεται στα 393.77 Hz και λύνοντας ως

προς L για να βρούμε το μήκος που θα πρέπει να έχει ο σωλήνας ώστε να συντονίζει σε αυτή τη συχνότητα.

$$f_n = \frac{nC}{4L} \Rightarrow G4 = 393.77 \text{ Hz} = \frac{nC}{4L}$$
$$\Rightarrow 4 \cdot L \cdot 393.77 = 1 \cdot 343 \Rightarrow L = \frac{343}{4 \cdot 393.77}$$
$$\Rightarrow L = \frac{343}{1578.08} = 0.217 \text{ m} \Rightarrow L = 21.7 \text{ cm}$$

Βρέθηκε ότι για την νότα G4, θα πρέπει ο σωλήνας να έχει μήκος 21.7 cm ώστε να συντονισθεί.

Κεφάλαιο 5

Πειράματα

5.1 Πειραματική διάταξη

5.1.1 Χρησιμοποιούμενες συσκευές.

Η πειραματική διαδικασία αποτελούνταν από δύο συσκευές ηλεκτρονικών υπολογιστών, όπου η πρώτη ήταν συνδεδεμένη με έναν ενισχυτή κι ένα ηχείο και μέσω του προγράμματος Room EQ Wizard θα εκπέμπει συχνότητες για τον συντονισμό των σωλήνων και η δεύτερη ήταν συνδεδεμένη με μία κάρτα ήχου και ένα μικρόφωνο για την καταγραφή των συντονισμών του σωλήνα με την βοήθεια προγράμματος που αναπτύχθηκε σε Matlab.



Εικόνα 5.1.1.1: Ηλεκτρονικός υπολογιστής συνδεδεμένος με ενισχυτή και ηχείο για αναπαραγωγή συχνοτήτων.



Εικόνα 5.1.1.2: Ηλεκτρονικός υπολογιστής συνδεδεμένος με κάρτα ήχου και μικρόφωνο για την καταγραφή των συντονισμών του σωλήνα.

5.1.2 Φασματικός αναλυτής.

Το ηχόμετρο μας δίνει μία μόνο τιμή που χαρακτηρίζει ένα ευρύ συχνοτικό φάσμα (ακουστό). Για να αναδείξουμε τα μεμονωμένα συχνοτικά χαρακτηριστικά που το συνθέτουν πρέπει να αναλύσουμε το μετρούμενο κύμα στο πεδίο των συχνοτήτων. Η διαδικασία της μεταφοράς από την χρονική στη συχνοτική απεικόνιση του ηχητικού κύματος ονομάζεται φασματική ανάλυση του ήχου. Οι συσκευές με τις οποίες γίνεται λέγονται φασματικοί αναλυτές και το αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι το φάσμα. Στο φάσμα που λαμβάνουμε χάνουμε τη σχέση με τη χρονική εξέλιξη του ήχου. Για τις ανάγκες ολοκλήρωσης της πειραματικής διαδικασίας η ανάπτυξη ενός φασματικού αναλύτη κρίθηκε αναγκαία.

5.1.3 Δημιουργία πώματος για τον σωλήνα.

Για την κατασκευή της μαρίμπας ήταν αναγκαία η κατασκευή ενός πώματος που θα είχε δύο χρήσεις. Η πρώτη θα ήταν να προσομοιώσει τον κλειστό - ανοιχτό σωλήνα και η δεύτερη να μειώνει το μήκος του σωλήνα χωρίς να χρειαστεί να κοπεί ο σωλήνας. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν γυαλιστερό φενιζόλ ώστε να μην απορροφεί αλλά να μπορεί να ανακλαστεί με ευκολία το κύμα πίσω ώστε να δημιουργηθεί το στάσιμο κύμα.



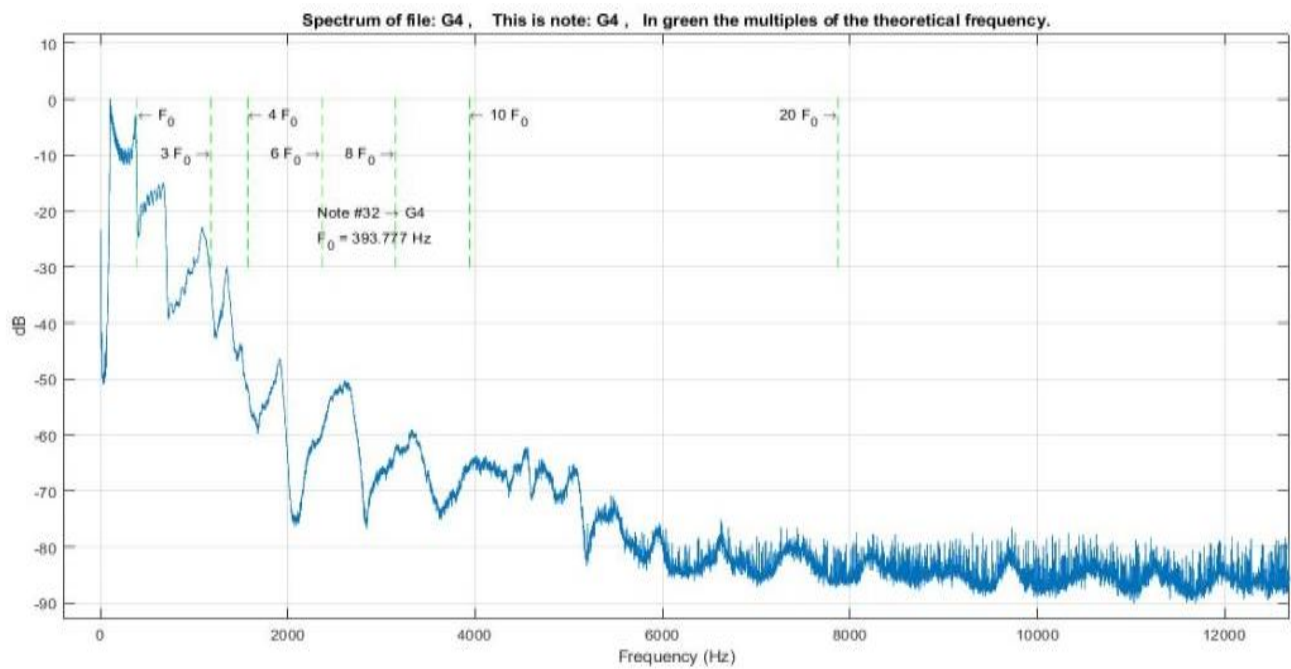
Εικόνα 5.1.3.1: Το πώμα που δημιουργήθηκε δίπλα από τη ράβδο και τη μπαγκέτα για κλίμακα σύγκρισης μεγέθους.

5.1.4 Διαδικασία ηχογράφησης.

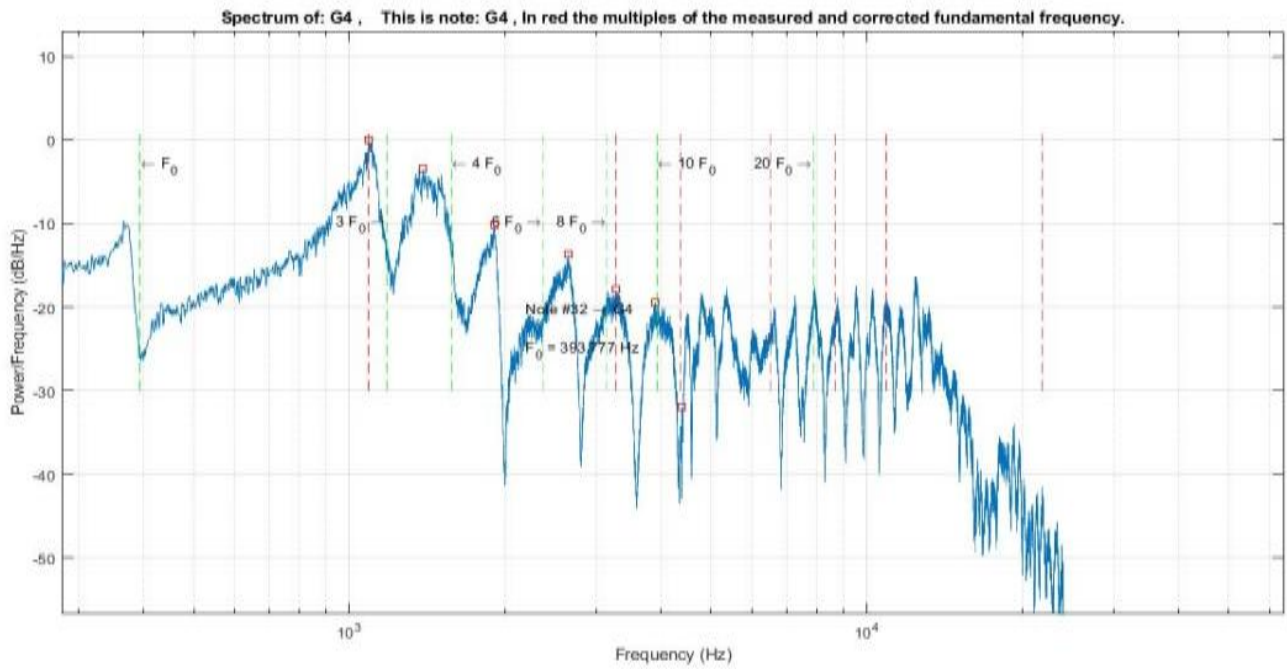
Για την ηχογράφηση επιλέχθηκαν δύο σωλήνες. Ένας πλαστικός σωλήνας PVC κι ένας από λάστιχο διάμετρο 50 χιλιοστών (Φ50). Η διέγερση των σωλήνων έγινε με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι η λογαριθμική σάρωση (log sweep) από 100Hz έως 800 Hz διάρκειας 10 δευτερολέπτων. Ο δεύτερος τρόπος είναι η έκθεση του σωλήνα σε λευκό θόρυβο (white noise) για 10 δευτερόλεπτα. Η θέση του μικροφώνου επιλέχθηκε να είναι ανάμεσα στο μικρόφωνο και τον σωλήνα.



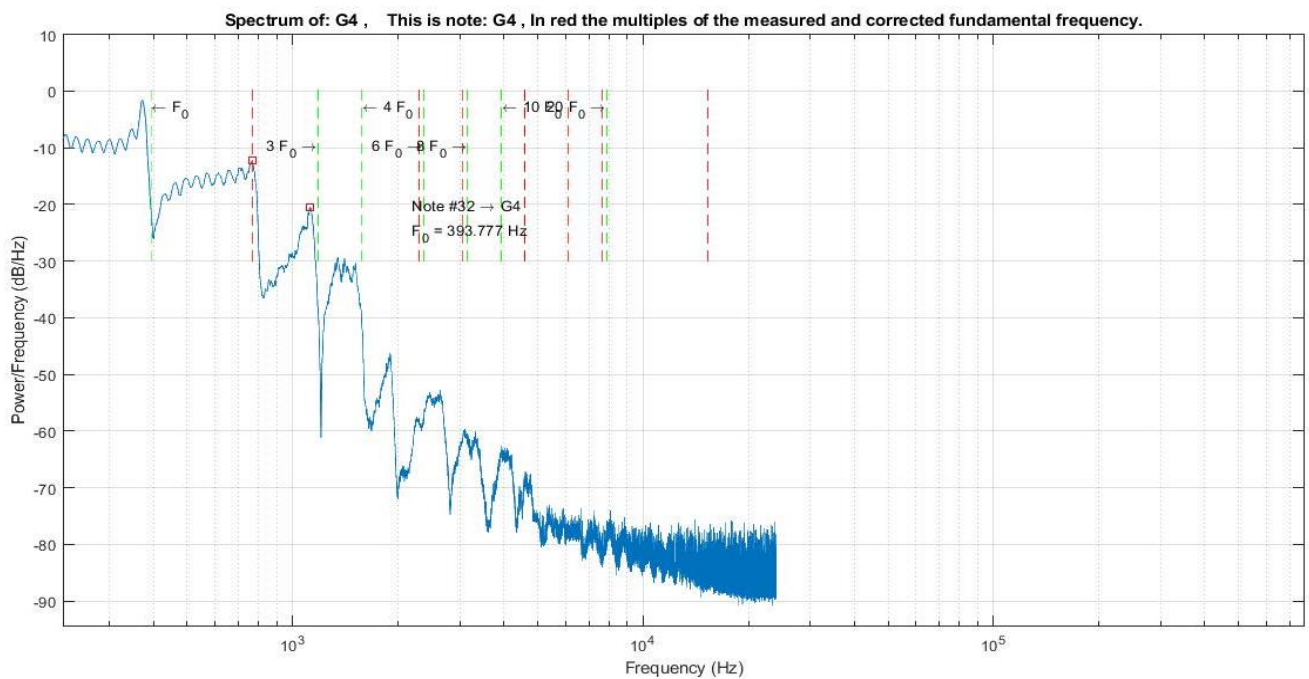
Εικόνα 5.1.4.1: Πρώτη τοποθέτηση μικροφώνου.



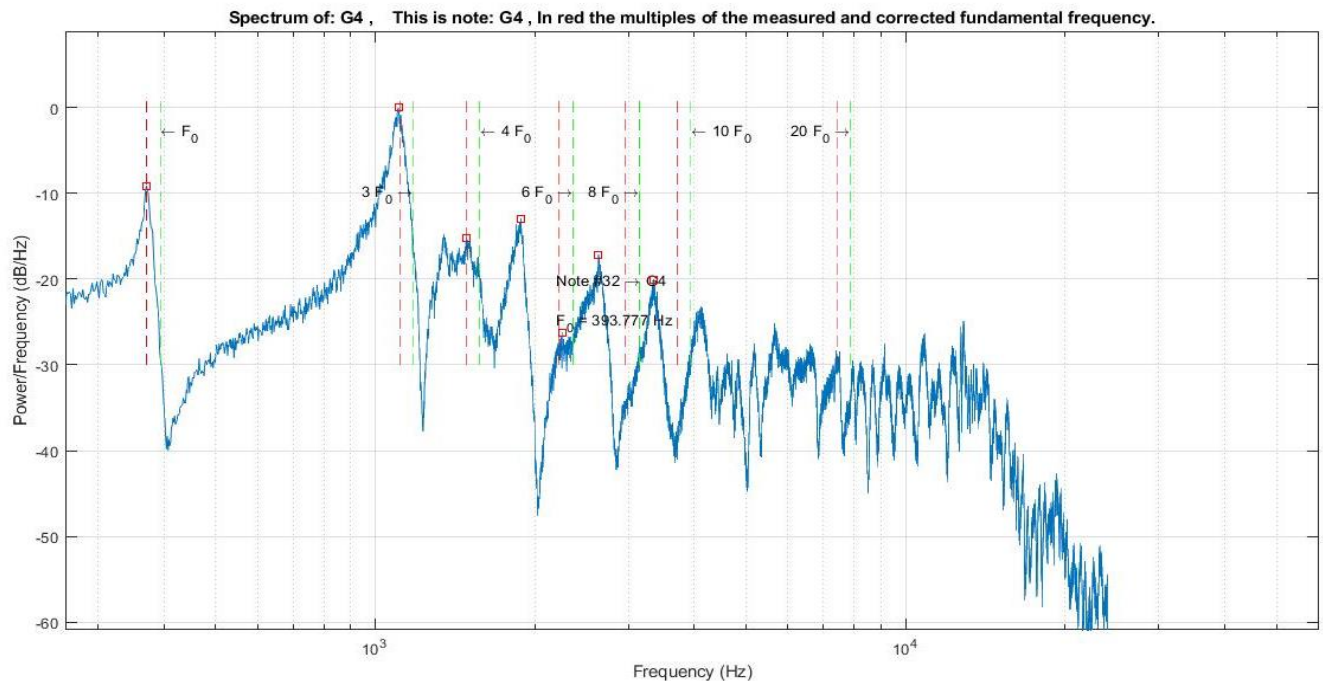
Εικόνα 5.1.4.2: Εφαρμόζοντας FFT στην ηχογράφηση με τον τρόπο logsweep για πλαστικό σωλήνα PVC.



Εικόνα 5.1.4.3: Εφαρμόζοντας FFT στην ηχογράφιση με τον τρόπο *white noise* για πλαστικό σωλήνα ρν.



Εικόνα 5.1.4.4: Εφαρμόζοντας FFT στην ηχογράφιση με τον τρόπο *log sweep* για σωλήνα από λάστιχο..



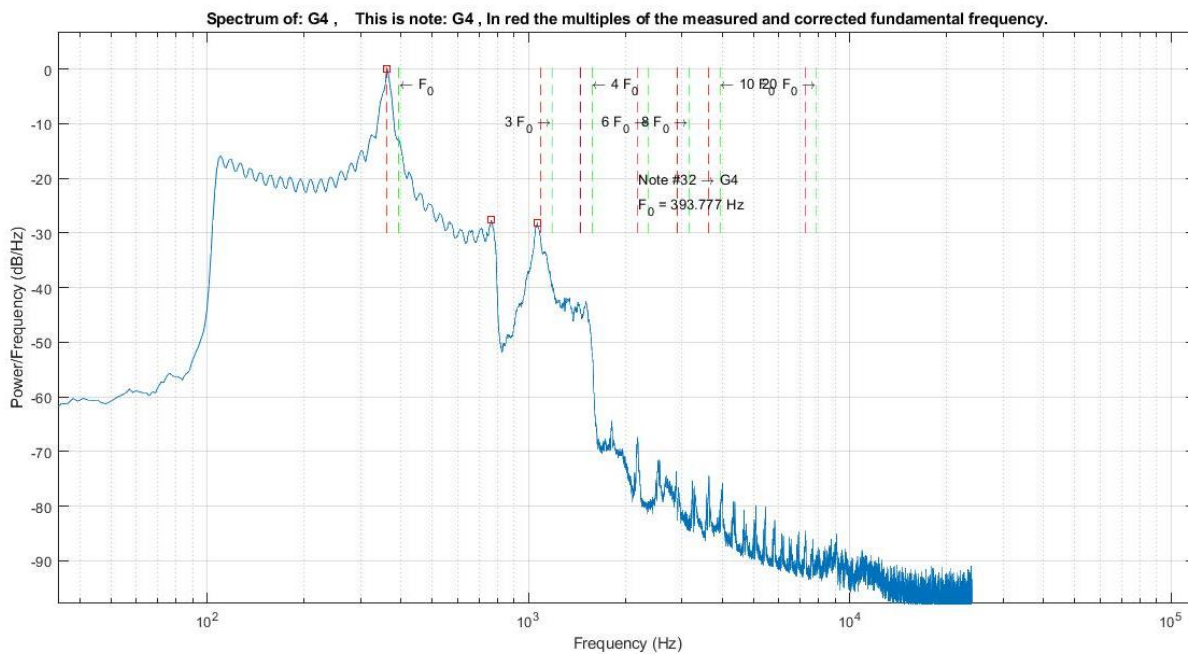
Εικόνα 5.1.4.5: Εφαρμόζοντας FFT στη ηχογράφιση με τον τρόπο white noise για σωλήνα από λάστιχο.

Τα αποτελέσματα από τις ηχογραφήσεις ήταν εσφαλμένα κι αυτό φάνηκε στον φασματικό αναλυτή διότι οι κορυφές της πρώτης αρμονική δεν ήταν στο αναμενόμενο σημείο αλλά και οι επόμενες αρμονικές ήταν μεγαλύτερες σε ένταση και μη πολλαπλάσιες της θεμελίου, πράγμα αδύνατο. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι το ηχείο επηρέαζε άμεσα και σε μεγάλο βαθμό το μικρόφωνο καθώς δεν μπορούσε να πάρει σωστές μετρήσεις από τον σωλήνα. Στην συνέχεια τοποθετήθηκε το μικρόφωνο μέσα στον σωλήνα για καλύτερα αποτελέσματα, δημιουργώντας τρύπα στο πώμα ώστε να μπορεί να σταθεροποιηθεί αλλά και να μην παρεμβαίνει στο συντονισμό.

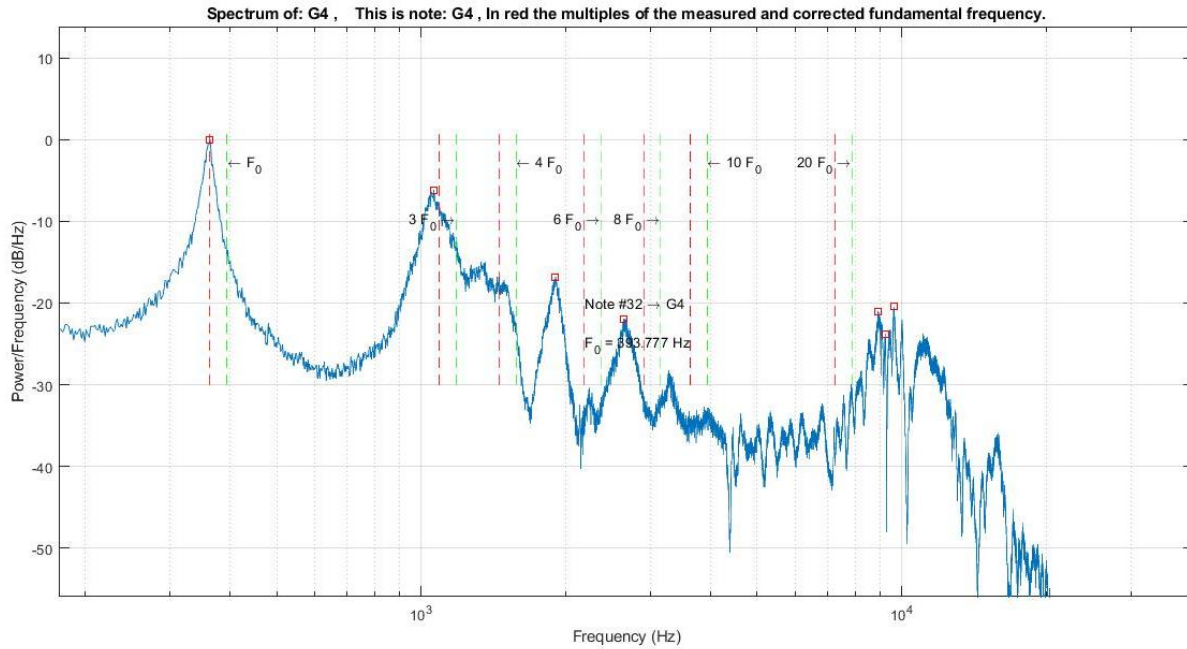


Εικόνα 5.1.4.6: Το μικρόφωνο τοποθετήθηκε μέσα στο πώμα για καλύτερα αποτελέσματα μετρήσεων

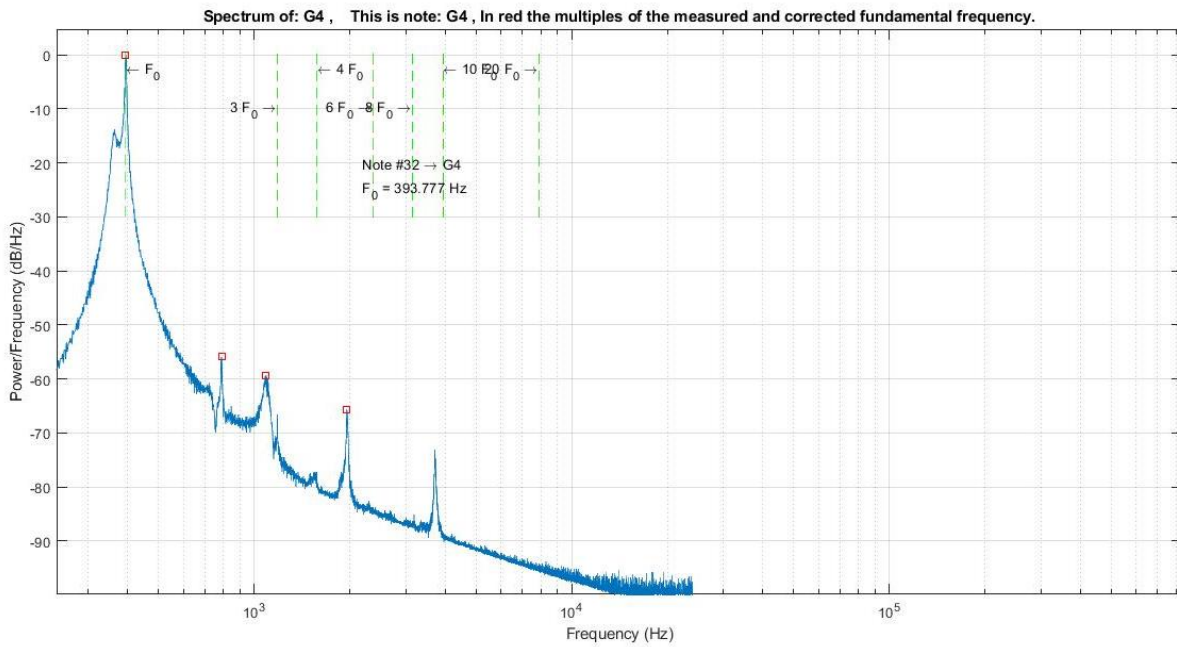
Εφαρμόζοντας αυτή τη μέθοδο, καταφέραμε να πετύχουμε ποιοτικότερα αποτελέσματα. Αργότερα απορρίφθηκε η μέθοδος του white noise και αντικαταστάθηκε με χτύπημα της ράβδου κοντά στην άκρη του σωλήνα εξαιτίας καλύτερων και ποιοτικότερων αποτελεσμάτων. Το πώμα τοποθετήθηκε στα 21.7 εκατοστά από την άκρη του σωλήνα όπως είχε υπολογιστεί θεωρητικά αλλά διαπιστώθηκε ότι η ένταση του συντονισμού ήταν μεγαλύτερη στα 20.6 εκατοστά. Όπως φαίνεται στις παρακάτω μετρήσεις εφαρμόζοντας FFT σε κάθε φάσμα μέτρησης έχουμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα κορυφών στην θεμέλιο και στους αρμονικούς. Η θεμέλιος βρίσκεται στην συχνότητα που βρέθηκε στη θεωρία και οι κορυφές των αρμονικών είναι πολλαπλάσια της και μικρότερες σε ένταση. Από αυτό συμπαιρούμε ότι το κούρδισμα της θεμελίου έγινε με επιτυχία. Πολύ πιθανό είναι να υπάρχει κάποια ή και αρκετή απόκλιση στις περαιτέρω αρμονικές αλλά αυτό οφείλεται στο ότι δεν έγιναν επιπλέον κούρδισματα (δεύτερο ή τρίτο) καθότι αυτό συναντάται μόνο σε επαγγελματικού επιπέδου μαρίμπτες, που απέχει αρκετά από τον σκοπό της παρούσης διπλωματικής καθώς και ότι δεν εφαρμόστηκαν τα τρία επίπεδα λούστρου που απαιτείται.



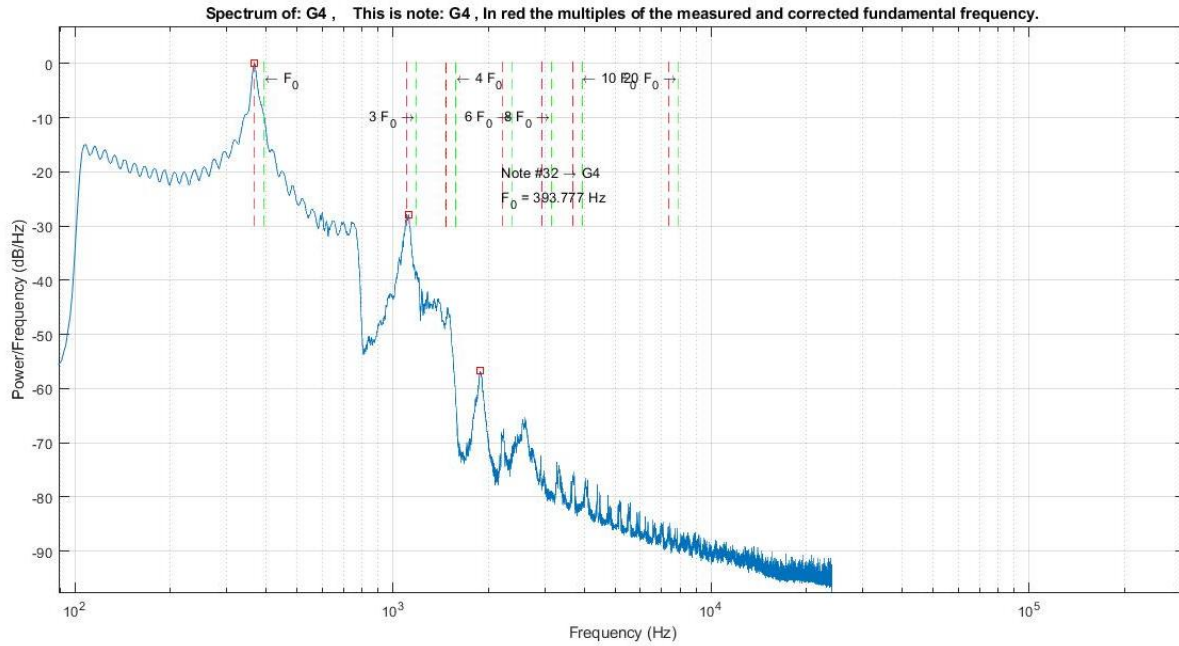
Εικόνα 5.1.4.7: Εφαρμόζοντας FFT στην ηχογράφιση με τον τρόπο log sweep για πλαστικό σωλήνα PVC.



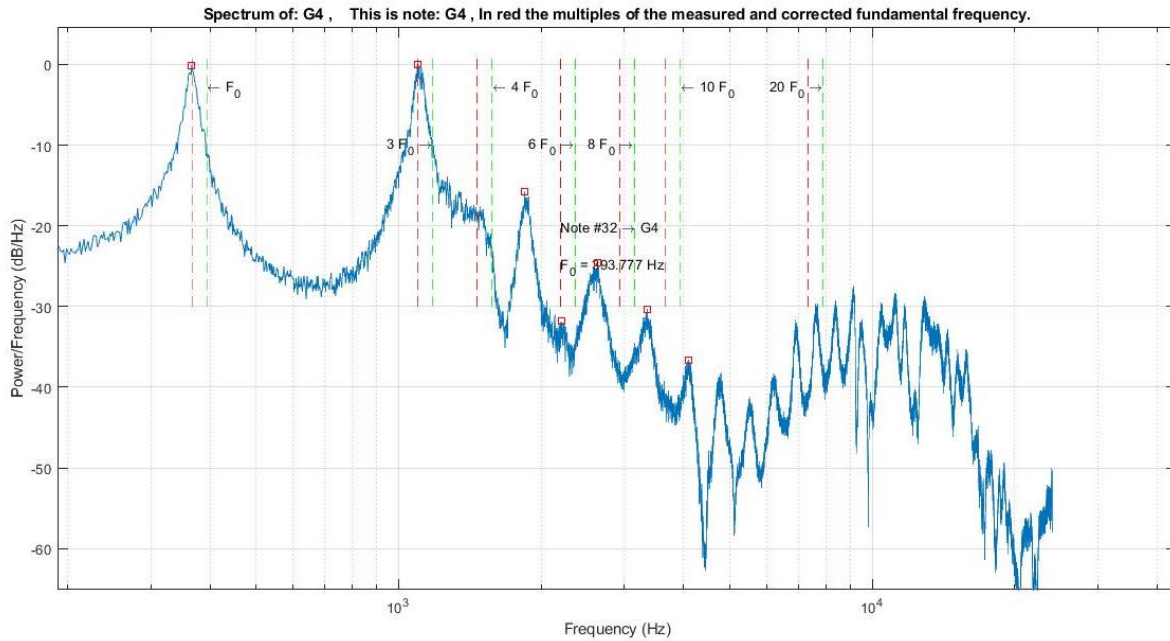
Εικόνα 5.1.4.8: Εφαρμόζοντας FFT στην ηχογράφιση με τον τρόπο white noise για πλαστικό σωλήνα ρvc.



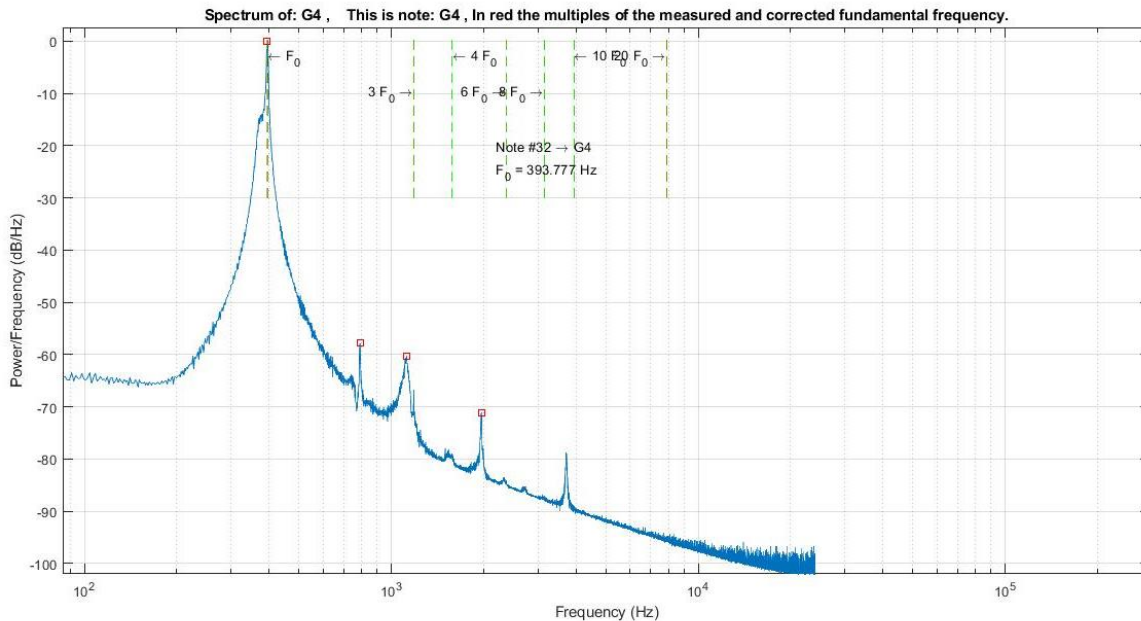
Εικόνα 5.1.4.9: Εφαρμόζοντας FFT στην ηχογράφιση με τον τρόπο χτυπήματος της ράβδου για πλαστικό σωλήνα ρvc.



Εικόνα 5.1.4.10: Εφαρμόζοντας FFT στην ηχογράφιση με τον τρόπο *log sweep* για σωλήνα από λάστιχο.



Εικόνα 5.1.4.11: Εφαρμόζοντας FFT στην ηχογράφιση με τον τρόπο *white noise* για σωλήνα από λάστιχο.



Εικόνα 5.1.4.12 Εφαρμόζοντας FFT στην ηχογράφιση με τον τρόπο χτυπήματος της ράβδου για σωλήνα από λάστιχο.

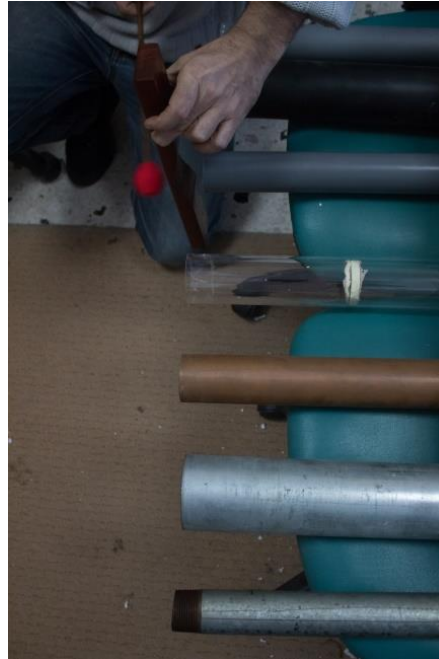
5.2 Συντονίζοντας σωλήνες διαφορετικών υλικών

Χρησιμοποιώντας το ίδιο κλειδί νότας G4, έγινε προσπάθεια ηχογράφησης και εκτίμησης αισθητικής καθώς και συντονισμού με την ακοή σε επτά διαφορετικά είδη σωληνών. Οι σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ένας σωλήνας από λάστιχο διάμετρου Φ50, δύο σωλήνες διαφορετικού είδους πλαστικό ρnc Φ50 και Φ75, ένας σωλήνας από πλεξιγκλάς Φ60, ένας σωλήνας από χαλκό Φ50 και δύο γαλβανιζέ σωλήνες Φ65 και Φ34.



Εικόνα 5.2.1: Οι σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν από αριστερά προς δεξιά, λάστιχο Φ50, πλαστικό Φ50, πλαστικό Φ75, πλεξιγκλάς Φ60, χαλκός Φ50, γαλβανιζέ Φ65, γαλβανιζέ Φ34.

Το κλειδί έχει «χτυπηθεί» αρκετές φορές στην πάνω επιφάνεια. Ο ήχος από το χτύπημα είχε μετρηθεί και ηχογραφηθεί ψηφιακά και οι συχνότητες προσδιορίστηκαν από μετασχηματισμό Φουριέρ (FFT).



Εικόνα 5.2.2: Συντονίζοντας τους σωλήνες χτυπώντας τη ράβδο.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων χρησιμοποιώντας την ακοή ως οδηγό για να βρούμε που συντονίζει περισσότερο ο σωλήνας.

Πίνακας 5.2.1: Αποτελέσματα αισθητικής εκτίμησης συντονισμού σωλήνων διαφορετικών υλικών.

α/α	Είδος σωλήνα	Διάμετρος (Φ)	Μήκος που συντονίζει σωλήνας (cm)
1	Λάστιχο	Φ50	21
2	Πλαστικό	Φ50	22
3	Πλαστικό	Φ75	19.7
4	Πλεξιγκλάς	Φ60	19
5	Χαλκός	Φ50	20.9
6	Γαλβανιζέ	Φ65	20.1
7	Γαλβανιζέ	Φ34	22

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα για το μήκος του σωλήνα χρησιμοποιώντας την ακοή απέχουν από αυτά που βρέθηκαν χρησιμοποιώντας τον φασματικό αναλύτη. Το μήκος που βρέθηκε μέσω της ακοής για σωλήνες Φ50 πλησιάζει αρκετά σε αυτό που βρέθηκε στην θεωρία. Σε σωλήνες μεγαλύτερης διάμετρου υπήρξε το αναμενόμενο μήκος που θα ήταν μικρότερο από αυτό των σωλήνων με διάμετρο Φ50 καθώς και σε αυτόν που είχε μικρότερη διάμετρο να έχει μεγαλύτερο μήκος. Η αισθητική εκτίμηση με την βοήθεια της ακοής έφερε ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά αυτό δεν σημαίνει βέβαια πως θα πρέπει να μειωθεί ο βαθμός συνεισφοράς του φασματικού αναλυτή ούτε και ο βαθμός ποιότητας των αποτελεσμάτων του.

Κεφάλαιο 6

Η μπάρα της Μαρίμπας

6.1 Εισαγωγή στη θεωρία της ράβδου

Η ράβδος της μαρίμπας δονείται σε πολύπλοκα σχήματα, όπου παράγει έναν ήχο με μοναδικό χαρακτήρα. Μία κατανόηση για την ποιότητα του ήχου αποκτάται μέσω της μελέτης των δονήσεων. Κάθε τύπος δόνησης ονομάζεται τρόπος δόνησης. Σε μία επιστημονική μελέτη για το κλειδί της C3 (η C κάτω από την μεσαία C), αναγνωρίστηκαν 25 τρόποι δόνησης σε διάστημα 0 έως 8.000 Hz. Το κούρδισμα ενός κλειδιού μαρίμπας μπορεί να είναι στοιχειώδης (μόνο ένας τρόπος δόνησης) ή σύνθετος (αρκετοί τρόποι δόνησης). Στις αρχές του 20 αιώνα, οι εμπορικές μαρίμπες κουρδίζονταν μόνο στην θεμέλιο. Την διάρκεια του 1920 ξεκίνησε ένα μεγαλύτερο επίπεδο κουρδίσματος, κουρδίζοντας πλέον στην θεμέλιο και στην πρώτη αρμονική (το δεύτερο εγκάρσιο τρόπο ταλάντωσης). Αυτή η εξέλιξη στο κούρδισμα απέδωσε έναν περισσότερο ποθητό ήχο από την μπάρα, εξαιτίας του πρώτου και δεύτερου τρόπου ταλάντωσης, οι οποίοι είχαν κουρδιστεί σε αρμονικό διάστημα μεταξύ τους. Αργότερα, επαγγελματίες κατασκευαστές μαρίμπας άρχισαν να περιλαμβάνουν στο κούρδισμα τους και τον τρίτο εγκάρσιο τρόπο ταλάντωσης, μια διαδικασία που συχνά ονόμαζαν τριπλό κούρδισμα. Στις μοντέρνες μαρίμπες χρησιμοποιείται το τριπλό κούρδισμα ίσως και μερικοί τρόποι ταλάντωσης επιπλέον ή μερικοί κουρδισμένοι ώστε σαν αποτέλεσμα, οι μπάρες, να δημιουργήσουν ένα ακόμη πιο αρμονικό ήχο. Το επίπεδο κουρδίσματος που θα υιοθετηθεί στην κατασκευή μια μπάρας θα εξαρτηθεί από τον σκοπό του κατασκευαστή. Για ένα απλό όργανο, το μόνο που χρειάζεται είναι να κουρδιστεί στην θεμέλιο. Ενώ για ένα συναυλιακό όργανο θα πρέπει να είναι το λιγότερο με τριπλό κούρδισμα και περαιτέρω βελτιώσεις καθώς θα πρέπει να επιτευχθεί ο καλύτερος δυνατός ήχος.

6.2 Είδη ταλαντώσεων της ράβδου.

Αρκετοί μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για να ανακαλυφθούν και να μετρηθούν οι συχνότητες των δονήσεων και να προσδιοριστούν οι υπεύθυνοι τρόποι για κάθε συχνότητα. Καταλήγοντας ότι επιθυμία ήταν η επιτυχία δημιουργίας υψηλού επιπέδου κουρδίσματος κλειδιών, καταλήξαμε ότι οι πλέον σημαντικοί τρόποι ταλάντωσης της ράβδου είναι 12 όπου και αναλύονται παρακάτω.

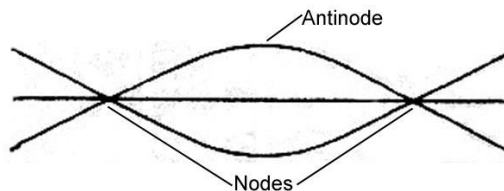
6.2.1 Πρώτος εγκάρσιος τρόπος δόνησης (Θεμέλιος)

Χρησιμοποιώντας τη μπάρα C2 όπου έχει χτυπηθεί με σφυρί παρατηρούμε ότι το αλάτι έχει μεταφερθεί στις άκρες της όπου υπάρχουν δεσμοί. Χτυπώντας την μπάρα

στο κέντρο, ενισχύονται τα αποτελέσματα για να επιτύχουμε την υψηλότερη διέγερση του πρώτου ρυθμού επειδή αυτή είναι η περιοχή με την περισσότερη εκτροπή.



Εικόνα 6.2.1.1: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του πρώτου εγκάρσιου τρόπου της μπάρας C2

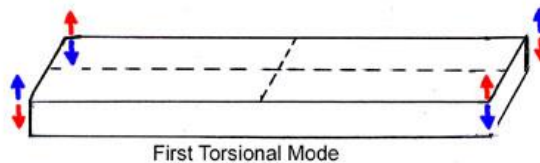


Εικόνα 6.2.1.2: Πρώτος εγκάρσιος τρόπος διέγερσης

Αντιστρόφως, χτυπώντας την μπάρα σε έναν από τους δεσμούς έχει σαν αποτέλεσμα μικρή κίνηση της μπάρα στην περιοχή του πρώτου τρόπου. Ωστόσο, η μπάρα μπορεί να στηριχθεί στους δεσμούς με μικρή απόσβεση του πρώτου ρυθμού.

6.2.2 Πρώτος στροφικός τρόπος δόνησης

Ο επόμενος τρόπος (ιδιορυθμός 2) δόνησης στην C2 μπάρα βρίσκεται στα 102.2 Hz και έχει αναγνωριστεί σαν ο πρώτος στροφικός ιδιορυθμός δόνησης. Ο στροφικός τρόπος δόνησης έχει μία στροφική μορφή κίνησης. Εάν κρατούσαμε τα δύο άκρα της μπάρας και στην στρέφαμε κατά το μήκος της, η μπάρα θα κινούνταν σε ένα σχέδιο σαν του πρώτου στροφικού ρυθμού. Στο παρακάτω διάγραμμα του στροφικού ρυθμού, η κίνηση απεικονίζεται με χρωματιστά βέλη.



Εικόνα 6.2.2.1: Πρώτος στροφικός τρόπος διέγερσης

Τα κόκκινα βέλη απεικονίζουν την κίνηση της μπάρας κατά την διάρκεια της μισή κυκλικής δόνησης και τα μπλε βέλη την κίνηση της άλλης μισής. Στην μπροστινή αριστερή γωνία, η μπάρα κινείται προς τα κάτω (κόκκινο βέλος), η μπροστινή δεξιά γωνία κινείται προς τα πάνω. Στον ίδιο χρόνο η πίσω αριστερή γωνία κινείται προς τα πάνω ενώ η δεξιά γωνία κινείται προς τα κάτω. Αυτός ο ιδιορυθμός έχει δύο δεσμούς, που παραστάνονται σε διακεκομένες γραμμές. Ο ένας δεσμός διασχίζει το κέντρο της μπάρας κατά το μήκος της και ο άλλος βρίσκεται στη μέση του μήκου της και διασχίζει την μπάρα σε όλο το πλάτος της. Δεν υπάρχει κίνηση στις γραμμές των δεσμών κατά την δόνηση. Ο πρώτος στροφικός ιδιορυθμός συνήθως δεν κουρδίζεται.

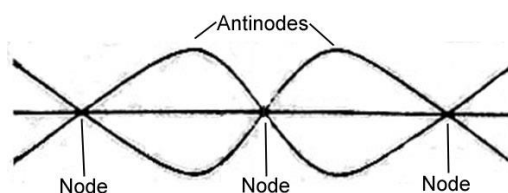
Ο συγκεκριμένος ιδιορυθμός δεν δονείται σε μεγάλο βαθμό αν δεν χτυπηθεί κοντά στην γωνία όπου βρίσκονται οι κοιλίες. Αυτός ο τρόπος ακτινοβολεί ασθενώς, αφού παρακείμενες περιοχές της απέναντης φάσης ακυρώνουν την ακτινοβολία του ήχου σε μεγάλα μήκη κύματος. Ως εκ τούτου, αυτή η λειτουργία δεν μπορεί να προκαλέσει μεγάλο πρόβλημα, αν αφεθεί ακούρδιστη, επειδή τα ηχητικά κύματα που ακτινοβολούν από τις παρακείμενες γωνίες της μπάρας τείνουν να ακυρώνουν η μία την άλλη. Χτυπώντας την μπάρα στην γωνία, με το αλάτι να βρίσκεται πάνω της και η μπάρα να υποστηρίζεται μερικώς στο κέντρο της για να κατασταλεί ο πρώτος εγκάρσιος τρόπος. Το αλάτι συσσωρεύτηκε στο δεσμό, που βρίσκεται στο κέντρο και κατά το μήκος της.



Εικόνα 6.2.2.2: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του πρώτου στροφικού τρόπου της μπάρας C2

6.2.3 Δεύτερος εγκάρσιος τρόπος δόνησης

Ο επόμενος τρόπος (ιδιορυθμός 3) της δόνησης στην C2 μπάρα, είναι ο δεύτερος εγκάρσιος τρόπος. Ο πρώτος, δεύτερος και τρίτος εγκάρσιος τρόπος είναι ρυθμοί, με τους οποίους συνήθως κουρδίζουν την μαρίμπα, επειδή είναι τα βασικά συστατικά που συμβάλλουν στην χρεία της ράβδου. Ο δεύτερος εγκάρσιος τρόπος δονείται σε ένα πρότυπο παρόμοιο με αυτό του πρώτου εγκάρσιου, αλλά, ο δεύτερος εγκάρσιος τρόπος έχει τρεις δεσμούς σε αντίθεση με τον πρώτο που έχει δύο. Ο δεσμός στο κέντρο της μπάρας είναι ένα σημαντικό στοιχείο του δεύτερου εγκάρσιου τρόπου. Αν η μπάρα χτυπηθεί ακριβώς στο κέντρο, όπου βρίσκεται ο δεσμός, θα υπάρχει ελάχιστη ταλάντωση εξαιτίας του. Ο δεύτερος εγκάρσιος τρόπος της C2 μπάρας είναι κουρδισμένος στα 262.8 Hz. Ο πρώτος εγκάρσιος τρόπος της C2 είχε κουρδιστεί προηγουμένως στα 65.70 Hz. Διαιρώντας το 262.8 προς το 65.70 έχουμε σαν αποτέλεσμα, ίσο με 4.00. Αυτό μας δείχνει ότι ο δεύτερος εγκάρσιος τρόπος δονείται σε συχνότητες τέσσερις φορές μεγαλύτερες από ότι ο πρώτος, ή δύο οκτάβες πάνω από την θεμέλιο. Οι δεσμοί στην μπάρα δεν αντιστοιχούν ακριβώς με αυτούς στην επόμενη φωτογραφία, επειδή η απεικόνιση αντιστοιχεί σε διαφορετική μπάρα, απλώς αναφέρεται ως παράδειγμα καθώς οι τοποθεσίες των δεσμών ποικίλουν ανάλογα με τις διαστάσεις της μπάρας και άλλων παραγόντων.



Εικόνα 6.2.3.1: Δεύτερος εγκάρσιος τρόπος διέγερσης

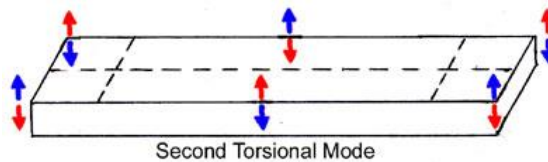
Η μπάρα C2 εκτεθειμένη σε συχνότητα 262.8 Hz. Έχοντας ρίξει αλάτι στην μπάρα παρατηρούμε την εμφάνιση των δεσμών στα άκρα και στο κέντρο μια μικρή ποσότητα αλατιού σχηματίζει τον δεσμό που βρίσκεται στο κέντρο.



Εικόνα 6.2.3.2: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του δεύτερου εγκάρσιου τρόπου της μπάρας C2

6.2.4 Δεύτερος στρωφικός τρόπος δόνησης

Ο επόμενος τρόπος (ιδιορυθμός 4) της δόνησης από την C2 ράβδο βρέθηκε στα 595 Hz και ταυτοποιήθηκε σαν τον δεύτερο στρωφικό τρόπο δόνησης. Η αναλογία σε σύγκριση με την θεμέλιο είναι 9.06. Αντίθετα με τον πρώτο στρωφικό τρόπο, αυτός ο ιδιορυθμός έχει τις κοιλίες στο κέντρο της μπάρας, τοποθετημένες σε κάθε άκρη της. Τα μπλε και κόκκινα βέλη βρίσκονται τοποθετημένα στο κέντρο της μπάρας.



Εικόνα 6.2.4.1: Δεύτερος στρωφικός τρόπος δόνησης

Αυτός ο τρόπος δόνησης μπορεί να διεγερθεί κατά την διάρκεια ενός παιχνιδιού, αν το σφυρί χτυπήσει την μπάρα προς την άκρη του κέντρου της ως προς το μήκος της. Αυτός ο τρόπος ακτινοβολεί καλύτερα από ότι ο χαμηλός (1-1) τρόπος, εξαιτίας του μικρού μήκους κύματος. Όταν η ράβδος χτυπηθεί κάθετα στην κορυφή, κοντά στις άκρες, ο (2-1) τρόπος έχει σχεδόν ίσο πλάτος με τον (4-0) τρόπο στο εκπεμπόμενο φάσμα. Για διευκρίνηση το (1-1) αντιστοιχεί στον πρώτο στρωφικό τρόπο, το (2-1) στον δεύτερο στρωφικό τρόπο και (4-0) στον τρίτο εγκάρσιο τρόπο. Ωστόσο, ο δεύτερος στρωφικός τρόπος μπορεί να αποδειχθεί προβληματικός όσο αφορά το κούρδισμα εξαιτίας της ισχυρής ακτινοβολίας του ήχου. Η C2 μπάρα εκτεθειμένη σε συχνότητα 595 Hz. Μπορούμε να διακρίνουμε το αλάτι που απομακρύνεται από τις κοιλίες και συγκεντρώνεται κατά μήκος του κέντρου στους δεσμούς.

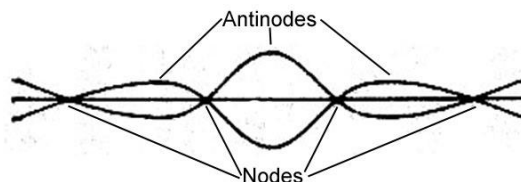


Εικόνα 6.2.4.2: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του δεύτερου στρωφικού τρόπου της μπάρας C2

6.2.5 Τρίτος εγκάρσιος τρόπος δόνησης

Ο επόμενος τρόπος (ιδιορυθμός 5) δόνησης της C2 ράβδου είναι ο τρίτος εγκάρσιος τρόπος. Έχει κούρδιστεί στα 662.2 Hz. Αυτός ο τύπος δόνησης μοιάζει με

τον πρώτο και δεύτερο εγκάρσιο τρόπο, αλλά, σε αυτήν την περίπτωση υπάρχουν τέσσερις δεσμοί και στο κέντρο της μπάρας δημιουργείται μία κοιλία.



Εικόνα 6.2.5.1: Τρίτος εγκάρσιος τρόπος διέγερσης

Σε αντίθεση με τον δεύτερο εγκάρσιο τρόπο, αυτός ο ιδιορυθμός διεγείρετε όταν η μπάρα χτυπηθεί στο κέντρο, όπως στον πρώτο εγκάρσιο τρόπο. Αυτός ο ιδιορυθμός χρησιμοποιείτε σε κούρδισμα αλλά συνήθως στις πιο χαμηλές. Ο τρίτος εγκάρσιος τρόπος κουρδίζεται συνήθως σε τρεις οκτάβες και μία τρίτης μεγάλη πάνω από την θεμέλιο. Δηλαδή 10.08 φορές μεγαλύτερη από την συχνότητα του πρώτου εγκάρσιου τρόπου. Οι δεσμοί στην μπάρα δεν αντιστοιχούν ακριβώς με αυτούς στην φωτογραφία, επειδή η απεικόνιση αντιστοιχεί σε διαφορετική μπάρα, απλώς αναφέρεται ως παράδειγμα καθώς οι τοποθεσίες των δεσμών ποικίλουν ανάλογα με τις διαστάσεις της μπάρας και άλλων παραγόντων. Η C2 μπάρα εκτεθημένη σε συχνότητα 662.2 Hz. Μπορούμε να διακρίνουμε τη συγκέντρωση του αλατιού στους δεσμούς.

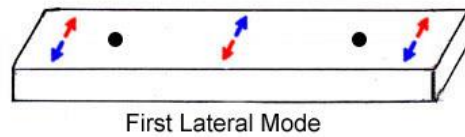


Εικόνα 6.2.5.2: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του τρίτου εγκάρσιου τρόπου της μπάρας C2

6.2.6 Πρώτος πλευρικός τρόπος δόνησης

Ο επόμενος τρόπος (ιδιορυθμός 6) δόνησης της C2 ράβδου βρέθηκε στα 786 Hz και ονομάστηκε πρώτος πλευρικός τρόπος δόνησης. Η αναλογία σε σύγκριση με την θεμέλιο είναι 12.0. Οι πλευρικοί τρόποι δόνησης είναι συνηθισμένα εγκάρσιοι αλλά η κίνησή τους δεν είναι πάνω και κάτω. Η κίνηση του είναι δεξιά και αριστερά (ως προς εμάς). Για να διεγερθεί ο τρόπος, μας προδίδει ότι πρέπει να χτυπηθεί στην άκρη του κέντρου ως προς το μήκος της μπάρας αλλά ο πρώτος πλευρικός τρόπος περιέχει κάθετα στοιχεία, τουλάχιστον σε μερικές μπάρες. Ωστόσο ένα απλό χτύπημα αρκεί για να διεγερθεί ο ιδιορυθμός. Είναι γνωστό πως επαγγελματίες εφαρμόζουν μεθόδους κούρδισματος όπως η “ενσφήνωση” σε αυτόν τον ρυθμό. Αυτό προκαλεί μια σύγκρουση και ένα μεγάλο εγκάρσιο τρόπο δόνησης. Ένα αδύναμο κάθετο στοιχείο μπορεί να παρατηρηθεί, πιθανόν εξαιτίας του ελάχιστου ασύμμετρου φαγώματος. Δηλαδή αν η μπάρα δεν έχει ένα τέλειο συμμετρικό φάγωμα από κάτω, θεωρείται ότι μπορεί να οδηγήσει σε κάθετες κινήσεις στην μπάρα για τον πλευρικό τρόπο.

Ακόμα και όταν χτυπάμε την μπάρα με κάθετο τρόπο, ο πρώτος πλευρικός τρόπος μπορεί να διεγερθεί σε ένα βαθμό. Η επόμενη εικόνα δείχνει την κατεύθυνση της δόνησης με μπλε και κόκκινα βέλη. Οι μαύρες κουκίδες αντιστοιχούν στους δεσμούς.



Εικόνα 6.2.6.1: Πρώτος πλευρικός τρόπος διέγερσης

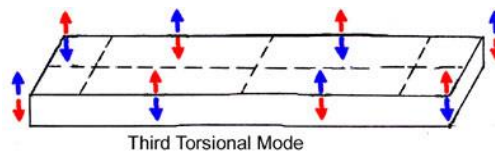
Οι δεσμοί στον πλευρικό τρόπο είναι μοναδικοί διότι κινούνται κάθετα στην μπάρα(στον άξονα Z). Όλοι οι άλλοι τρόποι κινούνται οριζόντια.(στον X και Ψ άξονα). Η C2 μπάρα εκτεθημένη σε συχνότητα 786 Hz. Παρατηρούμε ότι το αλάτι σπρώχνεται προς τις άκρες της ράβδου.



Εικόνα 6.2.6.2: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του πρώτου πλευρικού τρόπου της μπάρας C2

6.2.7 Τρίτος στροφικός τρόπος δόνησης

Ο επόμενος τρόπος (ιδιορυθμός 7) δόνησης στην C2 μπάρα βρέθηκε στα 1203 Hz και ταυτοποιήθηκε σαν τον τρίτο στροφικό τρόπο δόνησης. Η αναλογία σε σχέση με την θεμέλιο είναι 18.3.



Εικόνα 6.2.7.1: Τρίτος στροφικός τρόπος διέγερσης

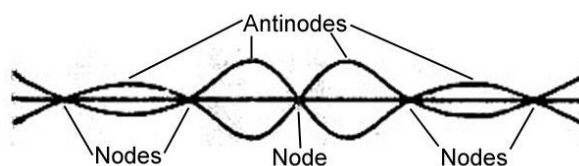
Η C2 ράβδος εκτεθημένη σε συχνότητα 1203 Hz, παρατηρείται ότι το αλάτι διώχνεται από τις κοιλίες και συγκεντρώνεται στο κέντρο όπου υπάρχουν δεσμοί.



Εικόνα 6.2.7.2: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του τρίτου στροφικού τρόπου της μπάρας C2

6.2.8 Τέταρτος εγκάρσιος τρόπος δόνησης

Ο όγδοος ιδιορυθμός μετρήθηκε στα 1287 Hz και ονομάστηκε τέταρτος εγκάρσιος τρόπος. Η αναλογία σε σχέση με την θεμέλιο είναι 19.6. Αυτός ο τρόπος είναι παρόμοιος με τον τρίτο εγκάρσιο τρόπο, με την διαφορά ότι έχει πέντε δεσμούς αντί για τέσσερις. Επίσης αυτός ο ιδιορυθμός έχει δεσμό στο κέντρο της μπάρας, όπως και ο δεύτερος εγκάρσιος τρόπος.



Εικόνα 6.2.8.1: Τέταρτος εγκάρσιος τρόπος δόνησης

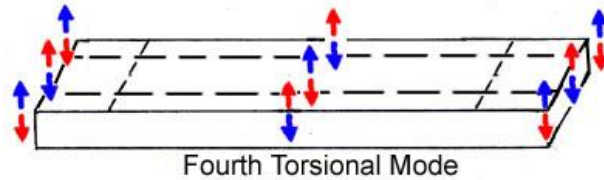
Ωστόσο, αυτός ο τρόπος δεν θα διεγερθεί σε μεγάλο βαθμό αν χτυπηθεί με την μπάρα στο κέντρο της ράβδου. Θεωρείται πως οι επαγγελματίες κουρδίζουν αυτόν τον ρυθμό σε πιο μπάσες ράβδους και πιθανότατα σε αναλογία 20 φορές την τιμή της θεμέλιου συχνότητας. Οι δεσμοί στην μπάρα δεν αντιστοιχούν ακριβώς με αυτούς στην επόμενη πάνω φωτογραφία, επειδή η απεικόνιση αντιστοιχεί σε διαφορετική μπάρα, απλώς αναφέρεται ως παράδειγμα καθώς οι τοποθεσίες των δεσμών ποικίλουν ανάλογα με τις διαστάσεις της μπάρας και άλλων παραγόντων. Η μπάρα C2 εκτεθειμένη σε συχνότητα 1287 Hz, παρατηρείται ότι το αλάτι συγκεντρώνεται στους δεσμούς.



Εικόνα 6.2.8.1: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του τέταρτου εγκάρσιου τρόπου της μπάρας C2

6.2.9 Τέταρτος στροφικός τρόπος δόνησης

Ο επόμενος τρόπος (ιδιορυθμός 9) δόνησης της C2 ράβδου, βρέθηκε στα 1585 Hz και ταυτοποιήθηκε σαν το τέταρτο στροφικό τρόπο δόνησης. Η αναλογία σε σύγκριση με τη θεμέλιο είναι 24.1 φορές. Ο τέταρτος στροφικός τρόπος είναι μοναδικός σε σύγκριση με τους υπόλοιπους στροφικούς τρόπους δόνησης που αναφέρονται. Παρατηρείται η ύπαρξη δύο γραμμών δεσμών στο κέντρο κατά το μήκος της ράβδου αντί για μία.



Εικόνα 6.2.9.1: Τέταρτος στροφικός τρόπος διέγερσης

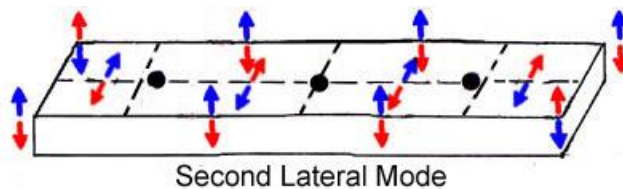
Η C2 ράβδος εκτεθημένη σε συχνότητα 1585 Hz, παρατηρείτε ότι το αλάτι συγκεντρώνεται κατά μήκος των δύο γραμμών δεσμών.



Εικόνα 6.2.9.1: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του τέταρτου στροφικού τρόπου της μπάρας C2

6.2.10 Δεύτερος πλευρικός τρόπος δόνησης

Ο επόμενος τρόπος (ιδιορυθμός 10) δόνησης της C2 μπάρας βρέθηκε στα 1680 Hz και ταυτοποιήθηκε σαν τον δεύτερο πλευρικό τρόπο δόνησης. Η αναλογία σε σύγκριση με την θεμέλιο βρέθηκε 25.6 φορές. Και ο πρώτος αλλά και ο δεύτερος πλευρικός τρόπος συνήθως περιλαμβάνουν κάποια κάθετη δόνηση πέρα από το πλευρικό στοιχείο. Αυτός είναι και ο λόγος που ενεργοποιούνται μετά από έναν συγκεκριμένο βαθμό όταν το σφυρί χτυπήσει συγκεκριμένες τοποθεσίες στην επιφάνεια της μπάρας. Ωστόσο, η παρακάτω εικόνα μας δίνει απεικόνιση των κάθετων στοιχείων. Οι δεσμοί στα πλευρικά στοιχεία είναι οι μαύρες κουκίδες.



Εικόνα 6.2.10.1: Δεύτερος πλευρικός τρόπος διέγερσης

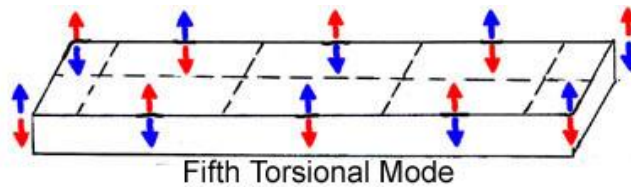
Οι δεσμοί στα κάθετα στοιχεία αναπαράστώνται σαν διακεκομμένες γραμμές και είναι παρόμοιοι με αυτούς του τρίτου στροφικού τρόπου. Η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε με το αλάτι δεν μας δίνει σαφές αποτέλεσμα. Αλλά πήραμε ως αποτέλεσμα τα 1680 Hz. Το σχήμα είναι πιο δύσκολο στην κατανόηση από τα υπόλοιπα σχήματα που παρουσιάστηκαν. Αυτό οφείλεται κυρίως στην παρουσία σημαντικών κάθετων και πλευρικών στοιχείων δόνησης αυτού του τρόπου. Η C2 ράβδος εκτεθημένη σε συχνότητα 1680 Hz, παρατηρείται ότι το αλάτι συγκεντρώνεται στο κέντρο και κατά μήκος των ακρών στην μπάρα.



Εικόνα 6.2.10.1: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του δεύτερου πλευρικού τρόπου της μπάρας C2

6.2.11 Πέμπτος στροφικός τρόπος δόνησης

Ο επόμενος τρόπος (ιδιορυθμός 11) δόνησης της C2 ράβδου βρέθηκε στα 1957 Hz και ταυτοποιήθηκε σαν τον πέμπτο στροφικό τρόπο δόνησης. Η αναλογία σε σύγκριση με την θεμέλιο είναι 29.8 φορές. Αυτός ο τρόπος είναι παρόμοιος με τον τρίτο στροφικό τρόπο, με την διαφορά ότι σε αυτόν έχουμε τέσσερις γραμμές δεσμών αντί για τρεις να διασχίζουν το πλάτος σε όλο το μήκος της ράβδου.



Εικόνα 6.2.11.1: Πέμπτος στροφικός τρόπος διέγερσης

Η C2 ράβδος εκτεθημένη σε συχνότητα 1957 Hz, παρατηρείτε ότι το αλάτι διώχεται από τις κοιλίες και συγκεντρώνεται στο κέντρο κατά μήκος της ράβδου.



Εικόνα 6.2.11.1: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του πέμπτου στροφικού τρόπου της μπάρας C2

6.2.12 Πέμπτος εγκάρσιος τρόπος δόνησης

Αποτελεί τον ρυθμό αριθμό νούμερο 12 και τελευταίο, όπου μετρήθηκε στα 2097 Hz και είναι ο πέμπτος εγκάρσιος τρόπος δόνησης. Η αναλογία σε σύγκριση με την θεμέλιο είναι 31.9 Hz. Αυτός ο τρόπος είναι παρόμοιος με τον τέταρτο εγκάρσιο τρόπο, με την διαφορά ότι έχει έξι δεσμούς αντί για πέντε. Επίσης αυτός ο ιδιορυθμός έχει κοιλία στο κέντρο της μπάρας, όπως και ο τρίτος εγκάρσιος τρόπος. Αυτός ο τρόπος για να διεγερθεί πρέπει να χτυπηθεί στο κέντρο. Ο συγκεκριμένος τρόπος δεν χρησιμοποιείται για κούρδισμα σε κοινά εμπορικά όργανα. Η C2 ράβδος όταν είναι εκτεθειμένη σε συχνότητα 2097 Hz, παρατηρείτε ότι το αλάτι συγκεντρώνεται στους δεσμούς.



Εικόνα 6.2.12.1: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του πέμπτου στροφικού τρόπου της μπάρας C2

Κεφάλαιο 7

Συντονισμός της μαρίμπας

7.1 Ο συντονισμός της ράβδου

Είναι γνωστό ότι είναι εύκολο να καταστραφεί μόνιμα ο συντονισμός μιας ράβδου, ο οποίος πρέπει έπειτα να αντικατασταθεί. Όσο περισσότερους τρόπους θα προσπαθήσουμε να συντονίσουμε, τόσο πιο δύσκολος θα γίνεται ο συντονισμός. Συντονίζοντας την θεμελίο και το δεύτερο εγκάρσιο τρόπο πληρούμε τις προϋποθέσεις για την κατασκευή ενός σοβαρού οργάνου που απευθύνεται σε επαγγελματίες μουσικούς. Για τον πληρέστερο συντονισμό, θα πρέπει να συντονίσουμε τον τρίτο εγκάρσιο τρόπο και ίσως ακόμη και τον τέταρτο εγκάρσιο τρόπο. Για να επιτύχουμε υψηλότερα πρότυπα, θα πρέπει να συντονίσουμε μερικώς κάποιους από τους στρεφόμενους ή πλευρικούς τρόπους. Η επίτευξη ενός ακριβούς συντονισμού, μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση ενός δέκτη στροβοσκοπίου. Δυστυχώς, οι δέκτες στροβοσκοπίων είναι ακριβοί. Εάν δεν έχουμε πρόσβαση σε έναν δέκτη στροβοσκοπίου λόγω κόστους, μπορεί να πραγματοποιηθεί προσπάθεια συντονισμού με έναν λιγότερο ακριβό ηλεκτρονικό δέκτη, αλλά, μπορεί να αποδειχθεί δύσκολο εάν όχι αδύνατο, να συντονίσουμε τους αρμονικούς ήχους με αυτούς τους δέκτες. Πριν από την ανάπτυξη των δεκτών στροβοσκοπίων το 1942, οι επαγγελματίες κατασκευαστές χρησιμοποιούσαν τα σύνολα συντονισμένων ραβδών ως πρότυπα, χρησιμοποιώντας τα αυτιά τους για τις συγκρίσεις τόνου. Ακόμη και σήμερα οι επαγγελματίες κατασκευαστές στηρίζονται στις ακουστικές πτυχές τεχνικής για ορισμένους συντονισμούς. Οι εγκάρσιοι τρόποι των ράβδων της μαρίμπας, είναι αρμονικά συντονισμένοι (δηλαδή οι αρμονικοί ήχοι εγκάρσιου τρόπου είναι ολόκληρα πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας). Ο πρώτος εγκάρσιος τρόπος των ράβδων της μαρίμπας είναι συντονισμένος στη θεμελιώδη, ο δεύτερος εγκάρσιος τρόπος είναι συντονισμένος στον τέταρτο αρμονικό (δύο οκτάβες πάνω από τη θεμελιώδη) και ο τρίτος εγκάρσιος τρόπος είναι συντονισμένος στον δέκατο αρμονικό (σχεδόν τρεις οκτάβες πάνω από τη θεμελιώδη). Τριαπλασιάζοντας συντονισμένα την εγγραμμένη μπάσα της μαρίμπας, από C2 σε G#3 (πρώτος, δεύτερος και τρίτος τρόπος συντονίζονται στη θεμελιώδη, τέταρτος αρμονικός και δέκατος αντίστοιχα), το οποίο μεταδίδει έναν περισσότερο σύνθετο τόνο συμφώνου. Οι ράβδοι που είναι στη μεσαία εγγραμμένοι (A3 σε C5) έχουν συντονιστεί διπλά (πρώτος και δεύτερος εγκάρσιος τρόπος που είναι συντονισμένοι στη θεμελιώδη και ο τέταρτος αρμονικός αντίστοιχα). Οι αρμονικοί που έχουν καταγραφεί υψηλότερα (C#5 σε C7) κατοικούν επάνω από τη σειρά του οργάνου και είναι συνεχείς για τις πολύ συνοπτικές χρονικές περιόδους ή μπορεί ακόμη και να είναι μη-ακουστοί. Ο συντονισμός των αρμονικών ήχων, γίνεται

δυσκολότερος στις υψηλότερες καταγραφές λόγω της πολύ σύντομης διατήρησης. Ο τρίτος εγκάρσιος τρόπος, έχει τον πιο κοντινό χρόνο διατήρησης και είναι δύσκολο να συντονιστεί επάνω από G#3. Όπως παραπάνω, ο δεύτερος εγκάρσιος τρόπος είναι επίσης πολύ δύσκολο να συντονιστεί. Εντούτοις, έρχεται ένα σημείο στα πλήκτρα όπου οι ράβδοι δεν δονούνται πλέον σε έναν συγκεκριμένο αρμονικό ήχο, ο οποίος περιορίζει το συντονισμό ενός αρμονικού ήχου στις ράβδους, κάτω από εκείνο το σημείο. Μία απλή ράβδος δεν δονείται με τους αρμονικούς ήχους. Προκειμένου να συντονιστεί η ράβδος στους αρμονικούς ήχους, είναι απαραίτητο να κοπεί μια αψίδα από το κατώτατο σημείο. Η αφαίρεση του ξύλου, επιφέρει αλλαγές σε δύο από τις ιδιότητες της ράβδου σημαντικές στην διαδικασία συντονισμού. Η πρώτη αλλαγή εντοπίζεται στην καμπτική δύναμη και η δεύτερη στην μάζα. Αφαιρώντας ξύλο από την ράβδο, έχει ως αποτέλεσμα στην ράβδο την μείωση της καμπτικής δύναμης και μείωση της μάζας της. Εντούτοις, η καμπτική δύναμη είναι ανάλογη προς τον κύβο του πάχους της ράβδου και η μάζα είναι ανάλογη μόνο ως προς το πάχος. Μια μείωση της καμπτικής δύναμης, οδηγεί σε ένα χαμηλότερο ποσοστό δόνησης ενώ μια μείωση της μάζας οδηγεί σε μια αύξηση στο ποσοστό δόνησης. Αυτά είναι αντικρουόμενα φαινόμενα από τα ποτελέσματα που εμφανίζονται όταν αφαιρείται ξύλο από την ράβδο. Εντούτοις, δεδομένου ότι η καμπτική δύναμη συσχετίζεται με τον κύβο του πάχους των ραβδών αυτή η ιδιότητα επιδρά περισσότερο από τη μάζα στις περιοχές όπου εμφανίζεται η κάμψη. Παραδείγματος χάριν, όταν αφαιρείται το ξύλο από το κέντρο της ράβδου, το ποσοστό δόνησης μειώνεται. Επειδή η καμπτική δύναμη μειώνεται περισσότερο από την μάζα. Δεδομένου ότι, η ράβδος λυγίζει σε μεγάλο βαθμό στην κεντρική της περιοχή, η μείωση της καμπτικής δύναμης εξουσιάζει πέρα από την απώλεια της μάζας. Αντίθετα, στις ίδιες τις άκρες της ράβδου δεν υπάρχει καμία κάμψη στους εγκάρσιους τρόπους. Επομένως, μια πτώση της καμπτικής δύναμης στις άκρες της ράβδου δεν επηρεάζει τη μείωση του ποσοστού δόνησης. Όταν το ξύλο αφαιρείται από τις άκρες της ράβδους, η μάζα είναι η μόνη σημαντική ιδιότητα για τον συντονισμό. Δεδομένου ότι μια μείωση της μάζας οδηγεί σε μια αύξηση του ποσοστού δόνησης, η αφαίρεση του ξύλου στις άκρες της ράβδου θα αυξήσει το ποσοστό δόνησης. Μια καλή κατανόηση των αποτελεσμάτων της ξύλινης αφαίρεσης στις διάφορες θέσεις της ράβδου είναι το κλειδί στο συντονισμό.

7.2 Διαδικασία συντονισμού

Η διαδικασία του συντονισμού, αρχίζοντας τον τριπλό συντονισμό με την κοπή μιας πολύ συντηρητικής αψίδας, η οποία οδηγεί σε μία ράβδο με διαφορά ημιτονίων επάνω από τη σημειωμένη νότα. Κατόπιν, μικρές ποσότητες αφαιρούνται από τις συγκεκριμένες περιοχές της αψίδας για να επιτευχθούν τα αρμονικά διαστήματα (η τέταρτη και η δέκατη αρμονική δηλ. 4 και 10 φορές η θεμελιώδης). Η θεμελιώδης χαμηλώνει περισσότερο από τους αρμονικούς ήχους όταν αφαιρείται το υλικό από το κέντρο της αψίδας (πρώτη περιοχή). Ο δεύτερος εγκάρσιος τρόπος, χαμηλώνει

περισσότερο όταν αφαιρείται το υλικό μεταξύ το κέντρου και του τέλους της αψίδας (δεύτερη περιοχή). Ο τρίτος εγκάρσιος τρόπος, χαμηλώνει πιο πολύ όταν αφαιρείται το υλικό κοντά στο τέλος της αψίδας (τρίτη περιοχή). Όταν και οι τρεις συχνότητες είναι στα επιθυμητά αρμονικά διαστήματα, τότε το υλικό αφαιρείται ομοιόμορφα πέρα από την αψίδα για να πλησιάσουν τις επιθυμητές νότες.



Εικόνα 7.2.1: Οι περιοχές της αψίδας όπου θα αφαιρεθούν

Αυτή η μέθοδος συντονισμού, φαίνεται λογική εάν θυμηθούμε τους τρόπους δόνησης για την ράβδο. Ο πρώτος εγκάρσιος τρόπος δόνησης (ο θεμελιώδης), απαιτεί την μέγιστη κάμψη της ράβδου στο κέντρο (κοιλία). Με την αφαίρεση του υλικού στο κέντρο, η ράβδος γίνεται πιο εύκαμπτη (λιγότερο δύσκαμπτη), το οποίο οδηγεί σε ένα πιο αργό ποσοστό δόνησης. Οι κοιλίες για τον δεύτερο εγκάρσιο τρόπο δόνησης (που συντονίζεται στην τέταρτη αρμονική) είναι και στις δύο πλευρές του κέντρου της ράβδου, έτσι η αφαίρεση του υλικού εκεί σε μία πιο εύκαμπτη ράβδο στις θέσεις όπου αυτός ο τρόπος αυτός απαιτεί τη μέγιστη κάμψη. Ο τρίτος εγκάρσιος τρόπος δόνησης (που συντονίζεται στη δέκατη αρμονική) έχει τις κοιλίες στο κέντρο της ράβδου και πλησιάζει σε κάθε μία από τις ζώνες που ονομάζονται 3 στην ανεικόνιση ανωτέρω. Επομένως, αφαιρώντας υλικό από τις απονομαζόμενες περιοχές 3 έχει ως αποτέλεσμα την περισσότερη ευελιξία για τις δύο από τις τρεις κοιλίες αυτού του τρόπου.

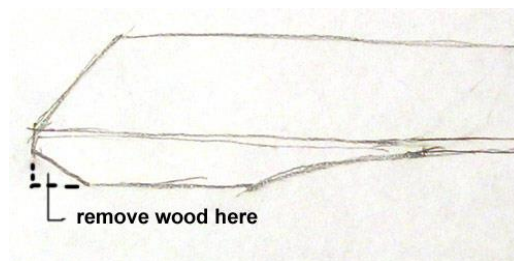
7.3 Δημιουργώντας την καμάρα

Το ποσοστό του ξύλου που πρέπει να αφαιρεθεί από την κάτω πλευρά της ράβδου διαφέρει από κλειδί σε κλειδί, με τις μπάσες νότες να απαιτούν περισσότερη αφαίρεση. Επιλέξαμε την C4 ως αρχικό σημείο. Σημειώσαμε μία καμάρα με το μολύβι κατά μήκος στην άκρη της ράβδου, όπου γίνεται παράλληλη όταν φθάνει στο κέντρο, ξεκινώντας από το $\frac{1}{4}$ του μήκους από κάθε άκρη. Μόλις κοπεί το ξύλο και δημιουργηθεί η αρχική καμάρα με την βοήθεια ενός μικροφώνου ηχογραφήσαμε για να δούμε τις πρώτες συχνότητες και τους εγκάρσιους τρόπους, καθώς και σε ποιο στάδιο βρίσκεται το κλειδί για περαιτέρω κούρδισμα. Το κούρδισμα των δεσμών εξαρτάται από την μπάρα, για την C4 χρειάζεται να κουρδίσουμε μόνο τον πρώτο και δεύτερο εγκάρσιο τρόπο. Στην συνέχεια πρέπει με προσοχή να κουρδίσουμε τους τρόπους στο απαιτούμενο αρμονικό διάστημα. Για ράβδους με δύο κουρδίσματα, στην αρχή κουρδίζουμε τον δεύτερο εγκάρσιο τρόπο δύο οκτάβες πάνω από την θεμέλιο, αφαιρώντας ξύλο κοντύτερα στις άκρες της καμάρας.

Μόλις επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα των δύο οκτάβων πάνω από την θεμέλιο, αφαιρούμε το ξύλο ομοιόμορφα σε όλο το τόξο για “ρίξουμε” την θεμέλιο και τον δεύτερο εγκάρσιο τρόπο. Για μπάσες ράβδους, ο τρίτος εγκάρσιος τρόπος μπορεί να έχει συχνότητα μεγαλύτερη των δέκα φορές αυτής της θεμελίου. Σε αυτήν την περίπτωση, αφαιρούμε με προσοχή ίσο υλικό κοντά σε κάθε μία από τις δύο άκρες του τόξου. Μπορεί να χρειαστεί να επεκτείνουμε την καμάρα. Μία σημαντική λεπτομέρεια είναι να αφαιρούμε μικρά ποσά ξύλου και να μετράμε μετά από κάθε αφαίρεση. Μετά το κούρδισμα του τρίτου εγκάρσιου τρόπου, πρέπει να φέρουμε τον δεύτερο εγκάρσιο τρόπο σε ένα διάστημα δύο οκτάβων πάνω από την θεμέλιο. Ύστερα αφαιρούμε ξύλο ομοιόμορφα σε όλο το τόξο για να ρίξουμε την θεμέλιο και τους άλλους ρυθμούς στις απαραίτητες συχνότητες. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας πιθανόν να χρειαστεί να κάνουμε μερικές μικρές επεμβάσεις αφαιρώντας υλικό από συγκεκριμένες ζώνες ώστε να διατηρηθεί το κατάλληλο αρμονικό διάστημα μεταξύ της θεμελίου και των άλλων ρυθμών. Συνεχίζουμε με το κούρδισμα έως ότου φθάσουμε περίπου 50 cent πάνω από το στόχο μας, τότε δημιουργούμε τις τρύπες για να περαστεί το σκοινί. Εφαρμόζουμε το λούστρο στην μπάρα και ύστερα κάνουμε το τελικό κούρδισμα.

7.4 Διορθώνοντας το κούρδισμα μιας ράβδου

Εάν κατά λάθος κουρδίσουμε την μπάρα ελάχιστα κάτω από την επιθυμητή συχνότητα, μπορούμε να αυξήσουμε ελάχιστα την συχνότητα αφαιρώντας ξύλο από τις άκρες της μπάρας. Συνήθως αυτό γίνεται μειώνοντας το πάχος της μπάρας ανάμεσα στους δεσμούς και στις άκρες της μπάρας. Η αφαίρεση ξύλου κοντά στην άκρη της μπάρας έχει το μεγαλύτερο αποτέλεσμα. Ωστόσο, μπορούμε λοξομήσουμε την άκρη της μπάρας στο κάτω μέρος της και να αυξήσουμε το κούρδισμα.



Εικόνα 7.4.1: Η περιοχή όπου αφαιρείται το ξύλο

Η αφαίρεση ξύλου μόνο 0.5 mm από το πάχος της μπάρας στην περιοχή του τόξου, μπορεί να ρίξει την συχνότητα της θεμελίου περίπου 8% (περισσότερο από ένα ημιτόνιο).

7.5 Δυσκολίες κούρδισματος πλευρικών και στροφικών ρυθμών

Οι πλευρικοί και στροφικοί τρόποι μπορούν να κούρδιστούν δημιουργώντας εγκοπές από την κάτω πλευρά της μπάρας, στις άκρες της και κεντρικά ως προς το μήκος της. Η κεντρική περιοχή του τόξου μπορεί να διαμορφωθεί ώστε το πάχος να είναι μεγαλύτερο στο κέντρο από τις άκρες. Αυτό ονομάζεται ενσφήνωση. Κατάλληλα τοποθετημένες ραβδώσεις στις περιοχές του τόξου βοηθούν στο κούρδισμα ενός πλευρικού ή στροφικού που μας δυσκολεύει. Καλό είναι να γνωρίζουμε ότι η ενσφήνωση θα επιρρεάσει το κούρδισμα των εγκάρσιων ρυθμών. Εάν χρησιμοποιήσουμε την τεχνική της ενσφήνωσης για να επιστρέψουμε σε μία κατάσταση, θα χρειαστεί να αυξήσουμε το κούρδισμα των εγκάρσιων ρυθμών, πρώτα αφαιρώντας ξύλο από τις άκρες της ράβδου.



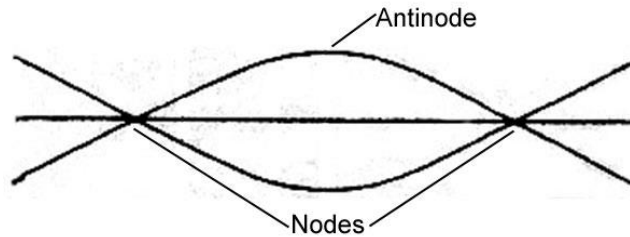
Εικόνα 7.5.1: Η τεχνική της ενσφήνωσης

7.6 Χρησιμοποιώντας κουρδιστήρι για να μετρήσουμε τις συχνότητες και τους ρυθμούς

Οι συχνότητες μετρούνται με κουρδιστήρι. Οι διαφορετικοί τρόποι τονίζονται ανάλογα με το που και πως πιάνεται η μπάρα καθώς και με το που την χτυπάμε με το σφυρί. Ένας τρόπος μπορεί να εμφανιστεί κρατώντας την μπάρα σε θέση που συμπίπτει με ένα δεσμό. Ο τρόπος αποσβένει εάν η μπάρα πιάνεται σε θέση που συμπίπτει με μία κοιλία.

7.6.1 Η θεμέλιος (Πρώτος εγκάρσιος τρόπος)

Για να εμφανιστεί η θεμέλιος, η μπάρα πρέπει να κρατιέται από ένα δεσμό στον πρώτο εγκάρσιο τρόπο και να χτυπηθεί στο κέντρο της.



Εικόνα 7.6.1.1: Πρώτος εγκάρσιος τρόπος διέγερσης



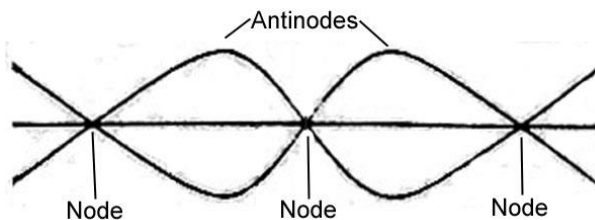
Εικόνα 7.6.1.2: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του πρώτου εγκάρσιου τρόπου της μπάρας C2



Εικόνα 7.6.1.3: Τεχνική διέγερσης του πρώτου εγκάρσιου τρόπου

7.6.2 Δεύτερος εγκάρσιος τρόπος

Για να εμφανιστεί ο δεύτερος τρόπος, η μπάρα πρέπει να κρατηθεί στο κέντρο της και να χτυπηθεί όπως απεικονίζεται παρακάτω. Χρειάζεται να δοκιμάσουμε μερικές φορές με μερικά χτυπήματα και διαφορετικά κρατήματα της μπάρας για να βρούμε που θα ακουστεί πιο δυνατά ο δεύτερος εγκάρσιος τρόπος όταν χτυπηθεί. Ελαφρά προσαρμόζουμε την θέση όπου πιάνουμε την μπάρα ώστε η μπάρα να ακουστεί καθαρά όταν χτυπηθεί. Ο τέταρτος εγκάρσιος τρόπος μπορεί να μετρηθεί με τον ίδιο τρόπο γιατί έχει τον δεσμό στο κέντρο της ράβδου.



Εικόνα 7.6.2.1: Δεύτερος εγκάρσιος τρόπος διέγερσης



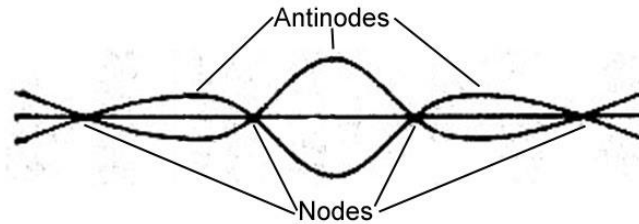
Εικόνα 7.6.2.2: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του δεύτερου εγκάρσιου τρόπου της μπάρας C2



Εικόνα 7.6.2.3: Τεχνική διέγερσης του δεύτερου εγκάρσιου τρόπου

7.6.3 Τρίτος εγκάρσιος τρόπος

Για να εμφανιστεί ο τρίτος τρόπος, πρέπει να πιάσουμε την μπάρα στη μία άκρη και να χτυπηθεί στο κέντρο. Πρέπει να γνωρίζουμε ότι οι εξωτερικοί δεσμοί του τρίτου εγκάρσιου τρόπου είναι κοντά στο τέλος της μπάρας σε σχέση με του πρώτου εγκάρσιου τρόπου. Ωστόσο, κρατώντας την μπάρα από την άκρη της, δεν επιρρεάζει τον τρίτο εγκάρσιο τρόπο αρκετά αλλά επιρρεάζει αρκετά την θεμέλιο. Ο δεύτερος εγκάρσιος τρόπος δεν θα διεγερθεί όταν η μπάρα χτυπηθεί στο κέντρο εξαιτίας του δεσμού που βρίσκεται εκεί. Αυτοί είναι οι λόγοι που ο τρίτος εγκάρσιος τρόπος διεγείρεται με αυτήν την μέθοδο και οι άλλοι δύο εγκάρσιοι τρόποι χαμηλώνουν..



Εικόνα 7.6.3.1: Τρίτος εγκάρσιος τρόπος διέγερσης



Εικόνα 7.6.3.2: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς του τρίτου εγκάρσιου τρόπου της μπάρας C2



Εικόνα 7.6.1.3: Τεχνική διέγερσης του τρίτου εγκάρσιου τρόπου

7.7 Δημιουργώντας τις τρύπες στην ράβδο- Βρίσκοντας τους κόμβους του θεμελιώδους τρόπου

Αφότου έχουμε συντονίσει τη ράβδο σε 50 cents επάνω από τις σημειωμένες νότες, θα δημιουργηθούν με τρυπάνι οι τρύπες για το σκοινί. Τοποθετούμε δύο κομμάτια αφρολέξ κάτω από την προσέγγιση θέση των κόμβων.



Εικόνα 7.7.1: Η μπάρα τοποθετημένη πάνω σε κομμάτια αφρολέξ

Ρίχνουμε λίγο αλάτι στη ράβδο, στην περιοχή των κόμβων, και έπειτα χτυπάμε πολύ ελαφριά με ένα σφυρί στο κέντρο της ράβδου.



Εικόνα 7.7.2: Διαδικασία διέγερσης της μπάρας

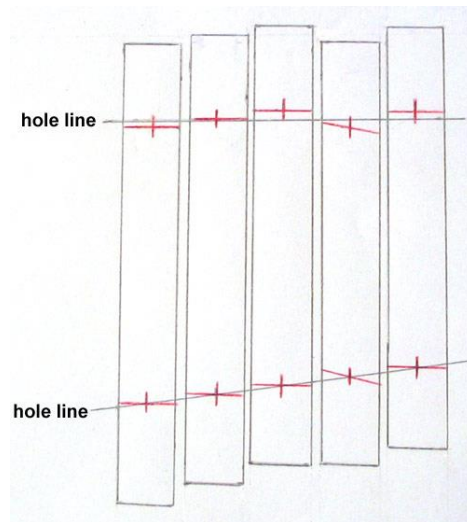
Συνεχίζουμε έως ότου συσσωρευτεί το αλάτι πάνω σε κάθε κόμβο. Σημειώνουμε τις γραμμές των κόμβων ελαφριά με ένα μολύβι πάνω στην επιφάνεια της ράβδου. Σε μερικές ράβδους, σημειώσαμε ότι το άλας δεν έχει συσσωρευτεί στο κάθετο μήκος της ράβδου, αλλά διαγωνία. Στο σύνολο των ραβδών, μερικοί θα έχουν τους κόμβους κάθετα στο μήκος των ραβδών και μερικοί μπορεί να λυγίζουν. Αυτό οφείλεται στην ανομοιόμορφη φύση του ξύλου.



Εικόνα 7.7.3: Συγκεντρωμένο αλάτι στους δεσμούς της μπάρας

Σημειώνουμε το κέντρο κάθε δεσμού με αλάτι (στο κέντρο των ραβδών κατά πλάτος). Προτού δημιουργήσουμε τις τρύπες με το τρυπάνι, πρέπει να σημειώσουμε όλες τις ράβδους με το κατάλληλο διάστημα μεταξύ τους. Η τρύπα στην ράβδο που βρίσκεται κοντά στο κέντρο του πλάτους του οργάνου (εσωτερικό), θα πρέπει να είναι τρυπημένη κάθετα στο μήκος των ραβδών. Αρχικά, παρατάσουμε όλες τις ράβδους σε μία ευθεία γραμμή κοιτώντας η εξωτερική πλευρά να είναι ευθυγραμμισμένη, έτσι ώστε όλοι οι εξωτερικοί δεσμοί να είναι σε μία ευθεία γραμμή. Προσπαθούμε να ευθυγραμμίσουμε την ευθεία άκρη για ελαχιστοποιήσουμε τις αποστάσεις από τους

αληθινούς κόμβους της ευθείας. Μπορεί να μην είναι δυνατό να περαστεί μια ευθεία γραμμή μέσω όλων αυτών των κόμβων, οπότε σ' αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να συμβιβαστούμε. Το απαιτούμενο είναι να ευθυγραμμιστεί κάθε ράβδος για να ελαχιστοποιηθεί η απόσταση όπου οι τρύπες πρέπει να τρυπηθούν πάνω σε κάθε δεσμό. Μετακινούμε μεμονωμένα τις ράβδους ελαφρώς προς το κέντρο ή έξω για να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ των θέσεων. Κατόπιν, σύρουμε δύο γραμμές στις ράβδους με μία ευθεία γραμμή. Αυτές οι γραμμές χαρακτηρίζουν τις θέσεις όπου οι ράβδοι θα πρέπει να τρυπηθούν. Μετράμε την γωνία της εξωτερικής γραμμής και χρησιμοποιούμε την μέτρηση της γωνίας κατά την διάτρηση των τρυπών στην εξωτερική πλευρά.



Εικόνα 7.7.4: Σχεδιάγραμμα των ράβδων για τον χαρακτηρισμό των θέσεων των τρυπών.

Οι κόκκινες γραμμές αντιπροσωπεύουν τους δεσμούς για κάθε ράβδο που καθορίζεται με την μέθοδο του αλατιού που περιγράφεται παραπάνω. Η κορυφή της απεικόνισης, αντιπροσωπεύει την εσωτερική πλευρά των πληκτρών. Η εσωτερική γραμμή που σύρεται για να χαρακτηρίσει τις θέσεις για τις εσωτερικές τρύπες, είναι ένας συμβιβασμός που έρχεται όσο το δυνατόν πιο κοντά σε κάθε δεσμό διατηρώντας μια κάθετη ευθειών γραμμών στα μήκη των ράβδων.

7.8 Η ανθρώπινη ακοή σε διαφορετικές συχνότητες και η διαβάθμιση του πλάτους της μπάρας.

Μία από τις προκλήσεις στο σχεδιασμό ενός μουσικού οργάνου είναι να ακούγεται στην περιοχή των μπάσων και να παράγει τόνους που μπορούν εύκολα να ακουστούν. Το ανθρώπινο αυτί έχει μία αξιολογη έκταση ευαισθησίας σε διαφορετικές συχνότητες ήχου.

Η ευαισθησία στην περιοχή των μπάσων είναι αρκετά μικρότερη από την περιοχή των 1000 Hz έως 4000 Hz. Για να ξεπερασθεί αυτό το πρόβλημα, οι μπάσες ράβδοι είναι σχεδιασμένες με μεγαλύτερο πλάτος ώστε να μπορέσουν να αναπαράγουν ήχο σε υψηλότερο επίπεδο ενέργειας.



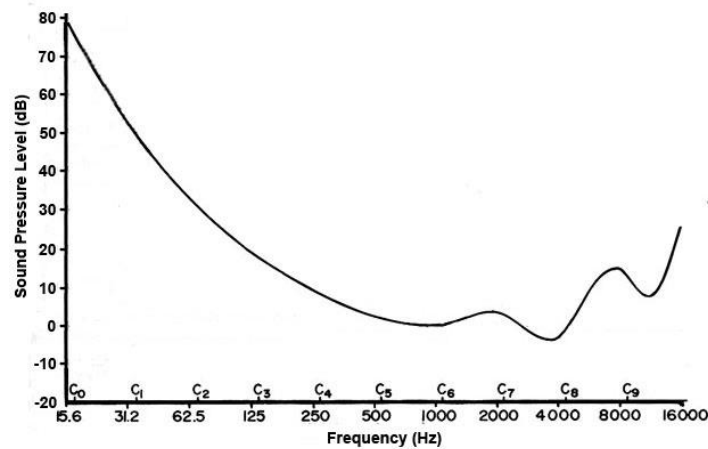
Εικόνα 7.8.1: Οι μπάρες σε πλάγια όψη



Εικόνα 7.8.2: Οι μπάρες στην κάτοψη

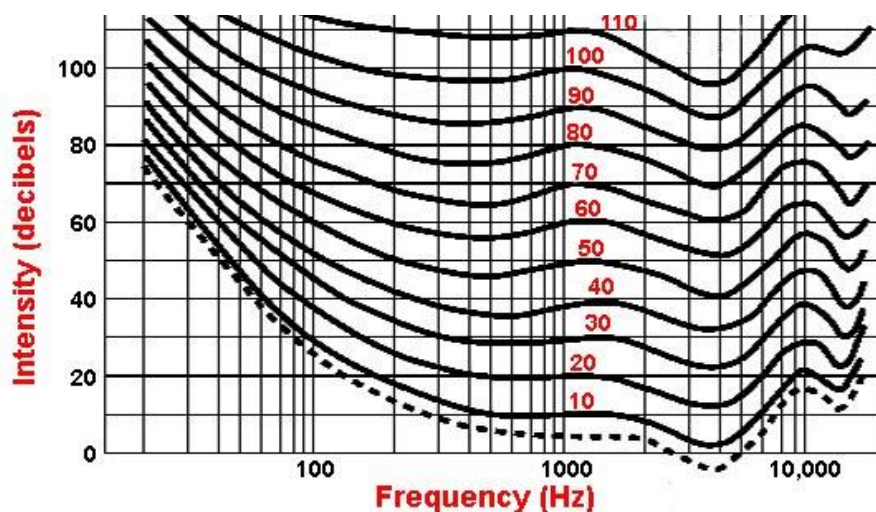
Το ανθρώπινο αυτί είναι περισσότερο ευαίσθητο στις περιοχές των 1000 Hz έως των 4000 Hz. Το επίπεδο ενέργειας του ήχου αναπαράσσεται σε ντεσιμπέλ (dB). Μία αύξηση των 10 dB αντιπροσωπεύει μια αύξηση δέκα φορές στην ενέργεια του ήχου και μία αύξηση 20 dB μία αύξηση εκατό φορές στην ενέργεια του ήχου. Ήχος συχνότητας 62.5 Hz (η χαμηλότερη νότα στην μαρίμπα) πρέπει να είναι 30 dB από τον ήχο αναφοράς των 1000 Hz ώστε το ανθρώπινο αυτί να μπορέσει να τον αντιληφθεί εξίσου.

Αυτό σημαίνει ότι ο ήχος των 62.5 Hz πρέπει να έχει επίπεδο ενέργειας χίλιες φορές μεγαλύτερο από έναν ήχο 1000 Hz στο κατώφλι της ανθρώπινης ακοής.



Εικόνα 7.8.3: Κατώφλι ακοής μέσου ανθρώπου σε διαφορετικές συχνότητες.

Στην πραγματικότητα η κατάσταση δεν είναι τόσο κακή όσο μπορεί να φαίνεται απλώς κοιτώντας την γραμμή για το κατώφλι ακοής (0 dB στα 1000 Hz). Καθώς το επίπεδο ήχου αυξάνεται, υπάρχει λιγότερη διαφορά ανάμεσα στις συχνότητες της αντιληπτής έντασης, όπως αναπαριστά η γραφική παράσταση. Για παράδειγμα, ένας τόνος στα 1000 Hz, έντασης 40 dB θα έχει ένταση περίπου ίση με ένα τόνο στα 60 Hz με ένταση 60 dB. Με άλλα λόγια, ο ήχος των 60 Hz θα πρέπει να έχει 100 φορές την ενέργεια από τον ήχο των 1000 Hz που έγινε αντιληπτός στην ίδια ένταση. Η C2 ράβδος θα πρέπει να παράγει 10 με 100 φορές την ενέργεια από μια μπάρα κοντά στα 1000 Hz για να γίνει αντιληφθεί στην ίδια ένταση. Είναι ξεκάθαρο ότι οι μπάσες μπάρες δεν θα μπορέσουν να ανταποκριθούν σε αυτά κριτήρια επιπέδου παραγωγής ενέργειας. Για την ακρίβεια, τα πιο πολλά μπάσα όργανα δεν παράγουν αυτά τα επίπεδα ήχου και αυτή είναι η αιτία που συνήθως θεωρούμε πως έχουν μικρότερη ένταση.



Εικόνα 7.8.4: Καμπύλες ίσης ακουστότητας για το μέσο ανθρώπινο αυτί.

7.9 Διαφορές μαρίμπας – ξυλοφώνου και η ιστορία του συντονισμού

Στα τέλη του 19ου αιώνα, ο John Calhoun Deagan άρχισε να κατασκευάζει ξυλόφωνα στις Ηνωμένες Πολιτείες (Trommer, H., 1996). Η επιχείρησή του, άκμασε στο Σικάγο ως επιχείρηση J.C.Deagan. Η J.C.Deagan Inc., κατασκεύασε πολλά διαφορετικά μουσικά όργανα συμπεριλαμβανομένων των μουσικών κουδουνιών, των ορχηστρικών κουδουνιών, ξυλόφωνα, μαρίμπες κ.α. Μία άλλη προεξέχουσα επιχείρηση των Η.Π.Α. που κατασκεύασε όργανα με ράβδους στις αρχές του 20ου αιώνα ήταν κατασκευαστική εταιρεία Leedeey. Κατά τη διάρκεια της μέσης δεκαετίας του '20, και οι δύο επιχειρήσεις ανέπτυξαν τις μεθόδους για το δεύτερο εγκάρσιο τρόπο των ράβδων (Winterhoff, 1927 - Schluter, 1931). Πριν από εκείνο τον χρόνο, μόνο ο θεμελιώδης ήταν συντονισμένος. Η πρακτική του συντονισμού του τρίτου εγκάρσιου τρόπου, αναπτύχθηκε αργότερα. Εντούτοις, καθιερώθηκε πριν από το 1969 επειδή αναφέρεται από τον McCallum(1969) και Moore(1970). Ο McCallum δηλώνει: “Στην περίπτωση των ραβδών της μαρίμπας, σύγχρονος συντονισμός ρίχνει τους πρώτους δύο συντονισμούς στο ίδιο επίπεδο με την θεμελιώδη. Ο συντονισμός του τρίτου αρμονικού ήχου γίνεται συχνά, αλλά είναι δύσκολος και αποτελεί πολυτέλεια”. Στο παράρτημά του, ο McCallum καθιστά σαφές ότι ο πρώτος αρμονικός ήχος (δεύτερος εγκάρσιος τρόπος) είναι συντονισμένος δύο οκτάβες πάνω από τον θεμελιώδη και ο δεύτερος αρμονικός ήχος (τρίτος εγκάρσιος) είναι συντονισμένος τρεις οκτάβες πάνω από το θεμελιώδη. Δεν δείχνει το διάστημα του αρμονικού που χρησιμοποιείται για τον τρίτο αρμονικό ήχο (τέταρτος εγκάρσιος). Απ’όσο γνωρίζουμε, τα σύγχρονα πρότυπα που χρησιμοποιούνται από τους κατασκευαστές μαρίμπας για τον τρίτο εγκάρσιο τρόπο είναι η δέκατη αρμονική, όχι η όγδοη όπως απαριθμεί ο McCallum. Εντούτοις, ο Nakano και ο Ohmuro (1997) προτείνουν έναν συντονισμό όπως αυτός που προτείνεται από τον McCallum στο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τους (δίπλωμα που ορίζεται στην εταιρεία Yamaha). Ο

Moore(1970) δηλώνει τα εξής: “Για τον ιδιαίτερα ακριβή συντονισμό, ο τρίτος μερικός και ο δεύτερος μερικός μπορούν να συντονιστούν σε μία επιθυμητή αρμονική σχέση με τον θεμελιώδη. Ο συντονισμός του τρίτου μερικού, απαιτεί την προσοχή και την ικανότητα του κατασκευαστή να γίνεται κατόπιν παραγγελίας του πελάτη. Ο συντονισμός του τρίτου μερικού γίνεται στις ράβδους με τις βασικές αρχές C4 προς τα κάτω. Για την μαρίμπα και τις ράβδους, οι επιθυμητές αναλογίες των δευτέρων και τρίτων αρμονικών ως προς το θεμελιώδη είναι 4:1 και 10:1. Για τις ράβδους του ξυλοφώνου οι επιθυμητές αναλογίες είναι 3:1 και 6:1.” Δύο βιβλία που δημοσιεύονται με διαφορά ενός έτους (McCallum 1969-Moore 1970) έχουν τέτοιες διαφορετικές απόψεις σχετικά με τον συντονισμό του τρίτου εγκάρσιου τρόπου. Η διαφορά οφείλεται πιθανώς στις δύο πηγές που στηρίζονται οι συντάκτες. Ο McCallum αναφέρει τον Ντελ Ρόπερ της Μονροβίας ως πηγή του για τις λεπτομέρειες του συντονισμού. Η πηγή του Moore για τη συντονίζουσα αρχή εμφανίζεται είναι ο Musser της Ludwig Industries. Σαφώς, ο Musser θα αποτελούσε πρότυπο για εκείνη την εποχή καθώς ήταν σημαντικός κατασκευαστής μαριμπών. Ο McCallum δηλώνει για τον Ντελ Ρόπερ: “είναι ειδικός κατασκευαστής μαρίμπας και φτιάχνει φιλότεχνα όργανα”. Εντούτοις, δεν γνωρίζουμε εάν ο κ. Ρόπερ είχε συνδεθεί με τη φήμη ενός γνωστού κατασκευαστή μαρίμπας. Είναι γνωστό ότι έφτιαχνε μαρίμπες από συνήθεια αλλά όχι για εμπορικούς σκοπούς. Σ’εκείνη την περίπτωση, η αρχή του Moore πρέπει να χρησίμευε για εμπορικούς σκοπούς. Η μαρίμπα και το ξυλόφωνο, και τα δύο κατασκευάζονται από ξύλινες ράβδους όμως σαν όργανα έχουν διαφορετικό χαρακτήρα. Οι διαφορές οφείλονται εν μέρει στο συντονισμό των αρμονικών. Οι εγκάρσιοι τρόποι της μαρίμπας είναι συντονισμένοι σε άρτιους αριθμούς ενώ ο δεύτερος εγκάρσιος του ξυλοφώνου συντονίζεται σε περιπτό αριθμό (περιπτή αρίθμηση στις Η.Π.Α. ενώ άρτια στην Ευρώπη). Επιπλέον, οι ράβδοι του ξυλοφώνου τείνουν να είναι κάπως παχύτεροι από της μαρίμπας και παίζονται με πιο σκληρές σφύρες. Επιπλέον, πολλά ξυλόφωνα έχουν μια πυξίδα C4, C8 ενώ οι μαρίμπες έχουν συνήθως από C4 μέχρι C7. Ο χαρακτήρας κάθε οργάνου, αναπτύσσεται περαιτέρω μέσω των αντηχείων. Ένα ξυλόφωνο μπορεί να χαρακτηριστεί ως όργανο με φωτεινή χροιά ενώ η μαρίμπα ως όργανο με σκοτεινή χροιά, ιδιαίτερα στην μπασα περιοχή. Κάθε ράβδος της μαρίμπας, τοποθετείται ακριβώς πάνω από ένα αντηχείο, το οποίο ενισχύει τον ήχο του θεμελιώδους. Οι σωλήνες αντηχείων, είναι κλειστοί στο κάτω μέρος. Ένα αντηχείο κλειστών σωλήνων ενισχύει μόνο τους περιπτους αρμονικούς. Επομένως οι 4ες και οι 10ες της μαρίμπας δεν ενισχύονται. Αυτό το χαρακτηριστικό δίνει την σκοτεινή χροιά της μαρίμπας. Αντίθετα, το ξυλόφωνο έχει ένα φωτεινό χαρακτήρα εν μέρει επειδή ο δεύτερος εγκάρσιος ενισχύεται επίσης από το αντηχείο. Αυτό είναι εμφανές, επειδή ο δεύτερος εγκάρσιος του ξυλοφώνου είναι συντονισμένος σε περιπτή αρμονική. Ο πεντατονικός συντονισμός χρησιμοποιείται συχνά για αυτό το είδος συντονισμού στο ξυλόφωνο, όπου ο δεύτερος εγκάρσιος είναι συντονισμένος σε μια οκτάβα και ένα πεμπτο πάνω από το θεμελιώδη (αναλογία 3:1).

Ο πεντατονικός συντονισμός αναπτύχθηκε στις Η.Π.Α. από τον Henry Schluter, ο οποίος ήταν κύριος κατασκευαστής για την επιχείρηση Deagan (Schluter 1931). Η απεικόνιση κατωτέρω, παρουσιάζει τη μορφή της ράβδου ενός ξυλοφώνου σύμφωνα με τον Schluter.



Εικόνα 7.9.1: Απεικόνιση της ράβδου σύμφωνα με τον Schluter

Στην απεικόνιση ανωτέρω, μπορούμε να δούμε ότι η ράβδος είναι σχετικά παχιά στο κέντρο και υπάρχουν δύο αψίδες. Αυτή η μορφή αποτελεί μέθοδο με αναλογία 3:1 για το δεύτερο εγκάρσιο και το θεμελιώδη. Η αναλογία 3:1, μπορεί επίσης να αναπτυχθεί με περικομμένη αψίδα ενός συγκεκριμένου σχεδιαγράμματος (Orduna-Bustamante, 1991). Οι βαθύτερες εγκοπές αψίδων σε κάθε πλευρά του κέντρου των ραβδών βρίσκονται κοντά στις κοιλίες για τον δεύτερο εγκάρσιο τρόπο. Επομένως, ο δεύτερος εγκάρσιος τρόπος μειώνεται σχετικά περισσότερο από τον θεμελιώδη, ενώ, ο θεμελιώδης διατηρείται σχετικά υψηλός στο κεντρικό σημείο της ράβδου.

7.10 Μερικές πληροφορίες σχετικά με το κούρδισμα και τις μουσικές κλίμακες.

Η μοντέρνα δυτική μουσική απασχολεί μια ίσης ιδιοσυγκρασίας κλίμακα, η οποία είναι ένας συμβιβασμός αναπτηγμένος για να διευκολύνει την μουσική που παράγεται από διαφορετικά κλειδιά. Ένα παλαιότερο σύστημα, γνωστό ως απλός τονισμός, απασχολεί μια κλίμακα σύμφωνα με την οποία κάθε βήμα μέχρι το τέλος της κλίμακας είναι ένας ολόκληρος λόγος αριθμών ως εξής: C 1/1, D 9/8, E 5/4, F 4/3, G 3/2, A 5/3, B 15/8, C 2/1. Ο απλός τονισμός έχει σαν αποτέλεσμα μια συλλογή από νότες όπου ο ήχος του είναι πολύ ευχάριστος εξαιτίας της αναλογίας των ολόκληρων αριθμών που εμπεριέχονται. Ωστόσο, εάν κάποιος προσπαθήσει να μετατοπίσει τα πλήκτρα ενώ παίζει μουσική σε ένα όργανο κουρδισμένο με αυτόν τον τρόπο, τα αποτελέσματα δεν είναι αποδεκτά. Μερικά μουσικά όργανα, καθώς και της μαρίμπας, έχουν σταθερά κουρδίσματα. Για να παίξει διαφορετικά κλειδιά κάποιος με την τεχνική του απλού τονισμού, αυτά τα όργανα πρέπει να επανακουρδιστούν (ή στην περίπτωση της μαρίμπας, να χρησιμοποιηθεί ένα διαφορετικό σετ κλειδιών). Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, η κλίμακα ίσης ιδιοσυγκρασίας αναπτύχθηκε. Στη χρωματική κλίμακα των δώδεκα ημιτονίων, κάθε βήμα είναι η δωδέκατη ρίζα του δύο, η οποία διατηρεί τον διπλασιασμό συχνότητας με κάθε οκτάβα.

Η δωδέκατη ρίζα του δύο είναι το 1.059463. Ωστόσο, μπορούμε να υπολογίσουμε τις συχνότητες από τις νότες στην κλίμακα ξεκινώντας από ένα γνωστό σημείο και απλά πολλαπλασιάζοντας με το 1.059463 για να βρούμε την συχνότητα του επόμενου ημιτόνιου. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι κουρδίζουμε μια νότα A4 = 440 Hz. Για να υπολογίσουμε την συχνότητα της A#4, κάνουμε ως εξής: $1.059463 \times 440 \text{ Hz} = 466.16 \text{ Hz}$. Για να υπολογίσουμε την B4, πολλαπλασιάζουμε $1.059463 \times 466.16 \text{ Hz} = 493.88 \text{ Hz}$ και ούτω καθεξής. Αν συνεχίσουμε τους υπολογισμούς με αυτό τον τρόπο θα βρούμε την A5 στα 880 Hz (η συχνότητα διπλασιάζεται στην οκτάβα). Παρακάτω συγκρίνουμε τις συχνότητες μιας οκτάβας για απλό τονισμό και ίσης ιδιοσυγκρασίας.

Πίνακας 7.10.1 Σύγκριση συχνότητων οκτάβας για απλό τονισμό και ίσης ιδιοσυγκρασίας

Note	Just Intonation (Hz)	Equal Temperament (Hz)
C	264	261.63
D	297	293.66
E	330	329.63
F	352	349.23
G	396	391.99
A	440	440.00
B	495	493.88
C	528	523.25

Μέσω αυτού του πίνακα, μας δίνεται η δυνατότητα να διευκρινίσουμε την λεπτομέρεια στο κούρδισμα του δέκατου αρμονικού στην μπάρα. Στην περίπτωση του τέταρτου αρμονικού, η συχνότητα θα πρέπει να είναι τέσσερις φορές την θεμέλιο συχνότητα εξαιτίας του διαστήματος που είναι δύο οκτάβες. Ωστόσο, ο δέκατος αρμονικός δεν διάστημα οκτάβων, και με ένα ίσης ιδιοσυγκρασίας κούρδισμα, η συχνότητα του δέκατου αρμονικού δεν θα είναι ακριβώς δέκα φορές την θεμέλιο (το κούρδισμα θα είναι δέκα φορές την θεμέλιο) Για να διευκρινίσουμε περαιτέρω,

δημιουργήσαμε ένα πίνακα με κουρδίσματα για απλό τονισμό της χαμηλής οκτάβας στην μαρίμπτα.

Πίνακας 7.10.2 Κουρδίσματα για απλό τονισμό της χαμηλής οκτάβας

Fundamental	Fourth Harmonic	Tenth Harmonic
C2 (65.70 Hz)	C4 (262.81 Hz)	E5 (662.25 Hz)
C#2	C#4	F5
D2	D4	F#5
D#2	D#4	G5
E2	E4	G#5
F2	F4	A5
F#2	F#4	A#5
G2	G4	B5
G#2	G#4	C6
A2 (110.5 Hz)	A4 (442 Hz)	C#6 (1113.77 Hz)
A#2	A#4	D6
B2	B4	D#6

Τείνουμε να ακούμε τις υψηλές νότες λίγο επίπεδες. Για να το διορθώσουμε αυτό, ένα όργανο μπορεί να κουρδίσει τις υψηλές νότες ελαφρά οξείς. Για την συγκεκριμένη μαρίμπτα ξεκινήσαμε με ένα κλειδί C#6, προσθέσαμε ένα cent στο κούρδισμα για κάθε ημιτόνιο (C#6 + 1 cent, D6 + 2 cents, κ.ο.κ). Ένα cent είναι το 1/100 του διαστήματος ανάμεσα στα ημιτόνια (υπάρχουν 1200 cent σε μία οκτάβα)

Αναφορές - Βιβλιογραφία

- [1] Παπαδογιάννης Ν, Μπακαρέζος Ε, «Κυματική Φυσική Για Μηχανικούς Ήχου και Ακουστικής», Κρήτη, 2015
- [2] M. L. Munjal, «Acoustics Of Ducts And Mufflers With Application To Exhaust And Ventilation System Design», India, 1987
- [3] Σκαρλάτος Δ, «Εφαρμοσμένη Ακουστική», Φιλιμάθεια, Πάτρα, 2012
- [4] Hugh D. Young, “Πανεπιστημιακή Φυσική Τόμος Α' Μηχανική – Θερμοδυναμική», 1994
- [5] J. La Favre, «<http://www.lafavre.us/tuning-marimba.html>», 2012
- [6] Πασχαλίδου Σ, Σηφάκης Μ, Κουζούπης Σ, «Εφαρμοσμένη Ακουστική Ι Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων», ΑΤΕΙ Κρήτης, παράρτημα Ρεθύμνου, τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2007