

Τ. Ε. Ι ΗΠΕΙΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
Τμήμα Λαϊκής και παραδοσιακής μουσικής

Επιβλέπων καθηγητής : κος Δημήτριος Καραμάνης

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΑ ΤΟ
ΚΑΠΑΚΙ ΣΤΟΝ ΗΧΟ ΕΝΟΣ ΕΓΧΟΡΔΟΥ
ΜΟΥΣΙΚΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ : ΤΟ ΟΥΤΙ

ΧΑΡΗΣ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΔΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2005

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η έρευνα αυτή αποτελεί την πτυχιακή μου εργασία στο Τμήμα Λαϊκής και παραδοσιακής μουσικής του Τ.Ε.Ι. Ηπείρου κατά την διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2004-2005. Δυο σημαντικά ενδιαφέροντα στα οποία αφιέρωσα τον περισσότερο χρόνο μου, φοιτώντας στη σχολή, ήταν η κατασκευή έγχορδων μουσικών οργάνων και η εκμάθηση του ουτιού. Σε κάποια στιγμή της φοιτητικής μου πορείας οι δύο αυτές αγάπες, μοιραία συνδέθηκαν όταν πήρα την απόφαση να κατασκευάσω το πρώτο μου ούτι. Την ίδια περίπου χρονική περίοδο πραγματοποιήθηκε στη Θεσσαλονίκη η διεθνής συνάντηση για το ούτι όπου ο γνωστός κατασκευαστής Faruk Turunz, προσέγγισε την κατασκευή του ουτιού από την σκοπιά της φυσικής ακουστικής.

Η παραπάνω προσέγγιση, μου κίνησε το ενδιαφέρον και με οδήγησε σε καρποφόρες συζητήσεις με τον καθηγητή μου, υπεύθυνο για το μάθημα της κατασκευής, Ευστάθιο Τσόλη. Εκείνος στηριζόμενος στην εμπειρική του γνώση απαντούσε ακούραστα και με επιχειρήματα στα πολυάριθμα ερωτήματά μου. Για το λόγο αυτό τον ευχαριστώ ιδιαίτερα που μοιράστηκε μαζί μου τον χρόνο του και τις ιδέες του στις ατέλειωτες συζητήσεις μας.

Επίσης χρωστώ ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή της φυσικής ακουστικής Δημήτριο Καραμάνη, επιβλέποντα της πτυχιακής μου εργασίας, για την καθοδήγησή του καθώς και τις κατευθυντήριες γραμμές που μου έδωσε στον προσανατολισμό της έρευνας μου. Χωρίς τη συμβολή του δεν θα ήταν εφικτή η παρούσα εργασία, όσον αφορά στο αδιέξοδο που συνάντησα εξαιτίας της έλλειψης τεχνολογικού εξοπλισμού.

Περαιτέρω επιθυμώ να ευχαριστήσω την Καλλιόπη Πάτσια για τη βοήθειά της στη μετάφραση της ξενόγλωσσης σχετικής βιβλιογραφίας, που αποτέλεσε το μεγαλύτερο μέρος των πηγών.

Την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη αξίζει ο πατέρας μου Αναστάσιος Τριανταφυλλίδης για όλη του την υποστήριξη και το ενδιαφέρον του γι' αυτό το εγχείρημά μου και ειδικότερα γιατί διευκόλυνε τη μετάβασή μου στη βιβλιοθήκη του

Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης για τη συλλογή σχετικής βιβλιογραφίας.

Τέλος, θερμές ευχαριστίες απευθύνω στην οικογένειά μου για την άμεση αγάπη, φροντίδα και υποστήριξή τους σε όλα τα στάδια εκτέλεσης και συγγραφής της παρούσας εργασίας, την οποία και τους αφιερώνω.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	1
Εισαγωγή.....	5
1 Αντικειμενικά και υποκειμενικά χαρακτηριστικά των ήχων.....	7
1.1 Γενικά.....	7
1.2 Αντικειμενικά χαρακτηριστικά των ήχων.....	8
1.2.1 Συχνότητα (frequency).....	8
1.2.2 Ένταση (intensity).....	10
1.2.3 Φάσμα συχνοτήτων (frequency spectrum).....	11
1.2.4 Περιβάλλουσα (envelope).....	13
1.2.5 Οι έννοιες modes, nodes και antinodes.....	15
1.3 Υποκειμενικά χαρακτηριστικά των ήχων.....	16
1.3.1 Το ύψος (pitch).....	17
1.3.2 Ακουστότητα (loudness).....	18
1.3.3 Χροιά (timbre)	19
2 Το ούτι και η ακουστική του προσέγγιση	23
2.1 Το ούτι	23
2.2 Το ούτι ως σύστημα συζευγμένων ταλαντούμενων τμημάτων...27	
2.3 Τρόποι ταλαντώσεως των μερών και σύζευξη τους	29
2.3.1 Οι χορδές.....	29
2.3.2 Το αντηχείο.....	31
2.3.3 Το καπάκι.....	33
2.3.4 Τα καμάρια.....	40
2.4 Η μέθοδος tap tone και το κούρδισμα μιας ξύλινης μπάρας.....	45

3 Προϋπάρχουσες μελέτες και μέθοδοι μέτρησης για modal ανάλυση.....	48
3.1 Γενικά	48
3.2 Προϋπάρχουσες μελέτες.....	48
3.3 Μέθοδοι μέτρησης για modal ανάλυση	51
4 Πειραματική μελέτη των modes καπακιού στο ούτι.....	60
4.1 Γενικά.....	60
4.2 Μέθοδος και συσκευές.....	61
4.3 Πειραματικά αποτελέσματα.....	63
4.4 Γενικές παρατηρήσεις.....	72
4.5 Σχολιασμός πειραματικών αποτελεσμάτων.....	73
4.6 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων.....	74
Επίλογος.....	78
Βιβλιογραφία.....	80

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ποιά θα ήταν η απάντηση στην ερώτηση πότε ένα ούτι είναι “άρτια” κατασκευασμένο από πλευράς ήχου; Ίσως σε πολλούς η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα να φαίνεται απλή, αλλά στην πραγματικότητα δεν είναι, λόγω του ότι βασικό ρόλο στη διαμόρφωση της κατέχει η “υποκειμενικότητα”. Για κάθε “ανθρώπινο αυτί” που θα καλούταν να εκφράσει άποψη πάνω σε αυτό το θέμα, η απάντηση θα ήταν διαφορετική. Στην προσπάθειά αυτή να δοθεί μια ολοκληρωμένη απάντηση, σκόπιμο είναι να καταφύγουμε στον τρόπο με τον οποίο δημιουργεί ένας πολύ φημισμένος για τα ούτια του κατασκευαστής από την Τουρκία, ο Faruk Turunz. Ο Faruk Turunz, με τη μέθοδο που ακολουθεί προσπαθεί να επιτύχει μέσα από την κατασκευή ενός ουτιού την ομοιομορφία στις εντάσεις των συχνοτήτων που παράγονται από το όργανο, διατηρώντας ταυτόχρονα την αυτονομία τους¹ (προσπαθεί δηλ. να κρατήσει διακριτές τις αρμονικές). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εξασφαλιστεί η ποιότητα του παραγόμενου ήχου.

Ένα δεύτερο ερώτημα που προκύπτει αυτή τη στιγμή (αν υποθέσουμε πως καταφέραμε να δώσουμε δύο βασικές κατευθύνσεις ώστε να αντιμετωπίσουμε τον αρχικό προβληματισμό) είναι το πώς μπορούμε κατασκευαστικά να επιτύχουμε το “επιθυμητό” αποτέλεσμα. Είναι φανερό ότι με τα νέα δεδομένα τα πράγματα γίνονται ακόμα πιο πολύπλοκα και η προσπάθεια να δοθεί μια αβασάνιστη απάντηση θα ήταν επιτόλαιη. Και αυτό γιατί ο ήχος ενός οργάνου επηρεάζεται από πληθώρα παραγόντων.

Όπως μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό από τον τίτλο της παρούσας εργασίας αλλά και από τα όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω, αντικείμενο μελέτης θα αποτελέσει η έννοια του ήχου και η ακουστική προσέγγιση ενός έγχορδου μουσικού οργάνου όπως είναι το ούτι. Ποιο συγκεκριμένα ο βασικός προβληματισμός αυτής της μελέτης είναι το κατά πόσο μπορούμε να συσχετίσουμε βασικούς κανόνες της επιστήμης της φυσικής με την διαδικασία της κατασκευής ενός έγχορδου μουσικού οργάνου και επιπρόσθετα πόσο εύκολο είναι αυτός ο συσχετισμός να μας παρέχει ασφαλή συμπεράσματα για την ποιότητα του ήχου που θα παραχθεί από το όργανο που θα

¹ Η άποψη του Faruk Turunz για το συγκεκριμένο ζήτημα , αποτέλεσε κεφάλαιο της παρουσίασης του στην ημερίδα ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΛΑΪΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ, που έλαβε χώρα στις 30 Μαΐου 2004 στην ΕΛΕΟΥΣΑ ΑΡΤΑΣ .

κατασκευαστεί.

Έχοντας ως στόχο την παρουσίαση του συγκεκριμένου προβληματισμού σε όλες τις διαστάσεις του, αφετηρία θα αποτελέσει η μελέτη του φαινομένου του ήχου και του τρόπου με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται αυτό το φαινόμενο.

Συνεπώς στο πρώτο κεφάλαιο αυτής της εργασίας παρουσιάζονται αναλυτικά τα υποκειμενικά και τα αντικειμενικά μεγέθη του ήχου. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στα μεγέθη εκείνα που είναι δυνατόν να μετρηθούν και να μας χρησιμεύσουν στην προσπάθεια συσχέτισμού της φυσικής ακουστικής με την κατασκευή ενός έγχορδου μουσικού οργάνου. Ταυτόχρονα παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ του υποκειμενικού ακούσματος και των αντικειμενικών μετρήσιμων μεγεθών και ο τρόπος που αυτά είναι δυνατόν να συνεργαστούν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια περιληπτική παρουσίασή του ουτιού. Η παρουσίαση έχει ως στόχο να δείξει τα μέρη που αποτελούν το ούτι και την συμμετοχή του κάθε μέρους στο τελικό ηχητικό αποτέλεσμα. Ταυτόχρονα επιχειρείται να δειχθεί η σημαντικότητα της συνεισφοράς του καπακιού στον τελικό εκπεμπόμενο ήχο και η ανάγκη για μελέτη αυτής της σημαντικής συμμετοχής μέσω της μέτρησης αντικειμενικών μεγεθών του ήχου.

Μια περιληπτική παρουσίαση μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί πάνω στην ακουστική προσέγγιση του ουτιού αποτελεί το αντικείμενο που διαπραγματεύεται το τρίτο κεφάλαιο. Επίσης γίνεται λόγος για τις διάφορες τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί από μελετητές πάνω στην ανάλυση του τρόπου δόνησης των καπακιών του βιολιού και της κιθάρας. Ο στόχος είναι η χρησιμοποίηση αυτών των τεχνικών στην περίπτωση του ουτιού.

Το τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο αποτελεί το πειραματικό μέρος αυτής της μελέτης. Παρουσιάζονται όλα τα πειραματικά δεδομένα καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν. Επίσης επιδιώκεται η ανάλυση και η αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς και η εξαγωγή βασικών συμπερασμάτων.

Η παρούσα εργασία ολοκληρώνεται συγκεντρώνοντας συμπεράσματα και παρατηρήσεις επί του συγκεκριμένου θέματος. Επίσης γίνεται λόγος για την ανάγκη περαιτέρω μελέτης και τη χρήση σύγχρονων τεχνικών στην modal ανάλυση του ουτιού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΗΧΩΝ .

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Επιχειρώντας να μελετήσουμε ένα έγχορδο μουσικό όργανο όπως είναι το ούτι, σκόπιμο είναι να εστιάσουμε στο ηχητικό αποτέλεσμα που προκύπτει από την προσπάθεια αναπαραγωγής μιας μελωδίας χρησιμοποιώντας το μουσικό αυτό όργανο, αλλά και στον τρόπο που αντιλαμβάνεται “το ανθρώπινο αφτί” αυτό το ηχητικό αποτέλεσμα. Αφετηρία μας λοιπόν δεν μπορεί να είναι κάτι άλλο από το φαινόμενο του ήχου. Ο ήχος ως φυσικό φαινόμενο παρουσιάζει ορισμένα χαρακτηριστικά, η ύπαρξη των οποίων μας επιτρέπει τη μελέτη αυτού του φαινομένου και τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό του. Για την πληρέστερη κατανόηση του φαινομένου του ήχου είμαστε αναγκασμένοι να καταφύγουμε στην επιστήμη της φυσικής με ιδιαίτερη έμφαση στην ακουστική. Στα πλαίσια της επιστήμης της φυσικής ακουστικής, ο ήχος αποτελεί ένα είδος ενέργειας η οποία ισοδυναμεί με μεταβολές της πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα. Ο ήχος παράγεται όταν κάποιο ελαστικό μέσο, που συνήθως είναι ο αέρας, τίθεται σε κίνηση ή αλλιώς αρχίζει να δονείται. Η κίνηση αυτή μεταφράζεται σε μεταβολές της πυκνότητας του αέρα οι οποίες δημιουργούν πυκνώματα και αραιώματα μορίων, τα οποία αρχίζουν να διαδίδονται. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η δημιουργία ενός ηχητικού κύματος το οποίο όταν συναντήσει κάποιο “δέκτη”, όπως για παράδειγμα το ανθρώπινο αφτί, γίνεται αντιληπτό ως ήχος [1,2].

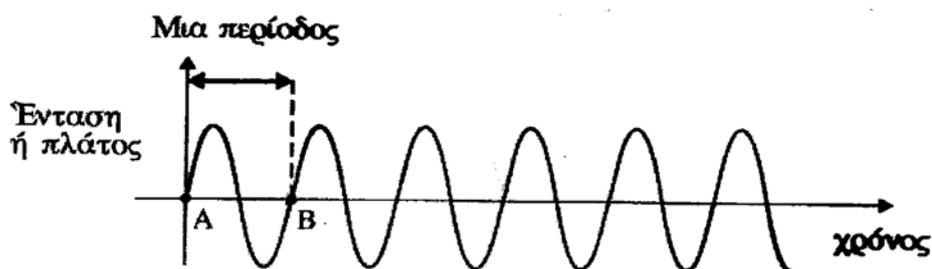
Το φαινόμενο του ήχου όπως αναφέραμε και παραπάνω χαρακτηρίζεται από ορισμένα φυσικά μεγέθη που ονομάζονται αντικειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου ή αντικειμενικά μεγέθη και ορισμένα υποκειμενικά χαρακτηριστικά ή υποκειμενικά μεγέθη. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν το βασικό υλικό που θα μας απασχολήσει σε αυτό το κεφάλαιο.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΗΧΩΝ

Ως αντικειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου καλούμε τα χαρακτηριστικά εκείνα που μπορούν να περιγραφούν και να μελετηθούν από τη φυσική επιστήμη και να προσδιοριστούν ποσοτικά και ποιοτικά επακριβώς μέσω μετρήσεων από εξειδικευμένα όργανα. Για να γίνουν κατανοητά τα παραπάνω αναφέρουμε ότι ένα ηχητικό κύμα μπορεί πλήρως να προσδιοριστεί από την συχνότητά του, την έντασή του, το φάσμα συχνοτήτων του, την ταχύτητα διάδοσής του και το μήκος του.² Όλα αυτά αποτελούν αντικειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου, εξαιτίας του ότι αναφέρονται στη φυσική κατάσταση ενός ήχου και είναι σε θέση να προσδιορίσουν τόσο την ποιότητα όσο και τη ποσότητα του.

1.2.1 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (FREQUENCY).

Θέλοντας να επιτύχουμε τον πληρέστερο προσδιορισμό της έννοιας της συχνότητας, θα ασχοληθούμε στο σημείο αυτό με την κυματομορφή ενός απλού αρμονικού ήχου όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 1.



(Σχ.1) Η ημιτονοειδής καμπύλη

² Τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου δεν είναι μόνο αυτά που αναφέρονται εδώ. Η αναφορά μόνο σ' αυτά τα αντικειμενικά μεγέθη γίνεται λόγω του ότι τα συγκεκριμένα μεγέθη θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η αποκαλούμενη ημιτονοειδής καμπύλη, η οποία απεικονίζει την κίνηση ενός απλού ήχου σε συνάρτηση με το χρόνο. Απλός ήχος χαρακτηρίζεται ο ήχος που αποτελείται από μια μόνο συχνότητα και δεν μπορεί να αναλυθεί σε απλούστερες μορφές καθώς στην ουσία αποτελεί την πιο απλή ταλάντωση που λαμβάνει χώρα στη φύση. Η απόσταση από το σημείο Α έως το Β του σχήματος είναι η περίοδος της ημιτονοειδούς καμπύλης. Είναι δηλαδή ο χρόνος (σε δευτερόλεπτα) που απαιτείται για ένα πλήρη κύκλο. Το σύνολο των κύκλων που μπορούν να εκτελεστούν μέσα σε ένα δευτερόλεπτο καλείται συχνότητα της ταλάντωσης [3,4,5].

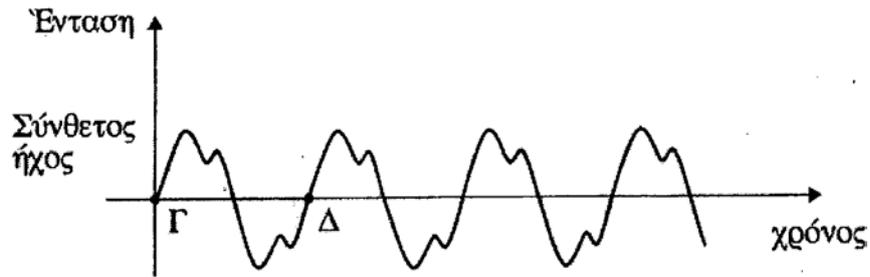
Η συχνότητα (frequency) συμβολίζεται με το γράμμα f , μετρείται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο και έχει μονάδα μέτρησης το 1 Hertz (στο διεθνές σύστημα SI συμβολίζεται 1Hz). Ο μαθηματικός τύπος που συνδέει τη συχνότητα f μιας ταλάντωσης και την περίοδο T αυτής είναι :

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

Βέβαια ο ήχος που παράγουν τα περισσότερα μουσικά όργανα δεν είναι ένας απλός ήχος.³ Δηλαδή δεν αποτελείται από μια μόνο συχνότητα, αλλά από πολλές και για αυτό ονομάζεται σύνθετος ήχος. Σε αυτό το φάσμα των πολλών συχνοτήτων κυριαρχεί μια συχνότητα η οποία ονομάζεται θεμελιώδης συχνότητα(fundamental). Οι υπόλοιπες συχνότητες που αποτελούν τον σύνθετο ήχο ονομάζονται παράγωγες και είναι υψηλότερες συχνότητες και συνήθως χαμηλότερης έντασης από τη θεμελιώδη. Στην περίπτωση του σύνθετου ήχου η περίοδος είναι το κομμάτι εκείνο της κυματομορφής που επαναλαμβάνεται σχεδόν αυτούσιο όπως μπορούμε να δούμε στο παρακάτω σχήμα⁴ (απόσταση Γ-Δ) [1,2].

³ Ένας απλός ήχος που υπάρχει στην φύση είναι αυτός του διαπασών.

⁴ Το Σχ .2 απεικονίζει έναν σύνθετο ήχο σε αρκετά απλοποιημένη μορφή. Στην πραγματικότητα η κυματομορφή ενός σύνθετου ήχου είναι πιο πολύπλοκη σε σημείο που δεν είναι τόσο εύκολα αντιληπτή η περίοδος του. Η χρησιμοποίηση της συγκεκριμένης καμπύλης, έχει ως στόχο την καλύτερη κατανόηση και διαφοροποίηση του απλού από τον σύνθετο ήχο.



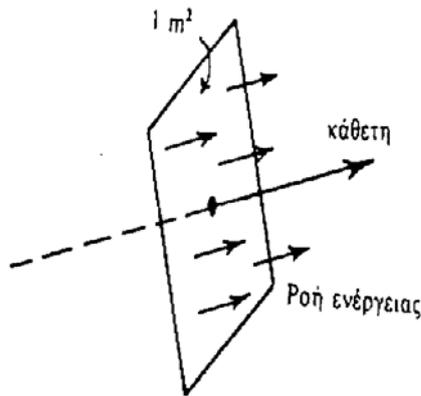
(Σχ.2) Η καμπύλη ενός σύνθετου ήχου

Χρησιμοποιώντας λοιπόν το παράδειγμα της νότας ΛΑ που παράγεται από ένα μουσικό όργανο με συχνότητα 440 Hz αντιλαμβανόμαστε ότι η συχνότητα 440 Hz αναφέρεται στη θεμελιώδη συχνότητα αυτού του σύνθετου ήχου. Οι παράγωγες συχνότητες και ο τρόπος που διατάσσονται αυτές σε σχέση με τη θεμελιώδη συχνότητα αποτελούν το φάσμα συχνοτήτων του σύνθετου ήχου, στο οποίο θα αναφερθούμε αναλυτικότερα σε επόμενο υποκεφάλαιο.

1.2.2. ΕΝΤΑΣΗ (INTENSITY)

Διεγείροντας μια τεντωμένη χορδή ενός μουσικού οργάνου προσφέρουμε ένα ποσό ενέργειας που χρησιμοποιείται ώστε να ξεκινήσει η χορδή την ταλάντωση της. Ένα μέρος αυτής της ενέργειας μετατρέπεται σε ακουστική ενέργεια, ενέργεια δηλαδή που μεταφέρεται μέσω των ηχητικών κυμάτων στο χώρο γύρω από την ηχητική πηγή.⁵ Η ακουστική ενέργεια που μεταφέρεται σε ένα δευτερόλεπτο καλείται ακουστική ισχύς και μετράται σε ακουστικά Watts. Η ένταση ενός κύματος ορίζεται ως η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου (ισχύς), που διαπερνά κάθετα μια επιφάνεια μοναδιαίου εμβαδού (Σχ.3). Μονάδα μέτρησης της έντασης στο σύστημα (SI) είναι Watts/m^2 . Επομένως, η ισχύς που εκπέμπεται από σημειακή πηγή κάθετα σε σφαιρική επιφάνεια ακτίνας r_1 προκαλεί ένταση ίση με $I_1 = P/4\pi r_1^2$. Βάσει των παραπάνω μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η ένταση ενός κύματος μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από την ηχητική πηγή και μάλιστα αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης της επιφάνειας από την πηγή.[1,2,4,5]

⁵ Στην προκειμένη περίπτωση η ηχητική πηγή είναι το ίδιο το όργανο.



(Σχ.3) .Ενέργεια που διαπερνά κάθετα μια επιφάνεια μοναδιαίου εμβαδού.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι ο απόλυτος τρόπος μέτρησης του μεγέθους της έντασης με μονάδες W/m^2 , δεν είναι πολύ πρακτικός, λόγω των ελάχιστων ή των τεράστιων αντίστοιχα τιμών που μπορεί να πάρει το μέγεθος αυτό. Για τον λόγο αυτό, ορίστηκε μέσω πειραμάτων το κατώτατο όριο έντασης που μπορεί να γίνει αντιληπτό από το ανθρώπινο αυτί και το οποίο αντιστοιχεί στην τιμή των $10^{-12} W/m^2$. Κάθε τιμή έντασης που πρόκειται να μετρηθεί εξάγεται κατόπιν σύγκρισης με αυτήν την κατώτατη τιμή. Κρίθηκε επίσης απαραίτητη και η χρήση λογαρίθμων όπως σε περιπτώσεις μεγεθών των οποίων οι τιμές προκύπτουν εξαιρετικά μεγάλες ή πάρα πολύ μικρές. Η λογαριθμική μονάδα μέτρησης της στάθμης έντασης είναι το Decibel (dB). Στην κατώτατη τιμή έντασης την $10^{-12} W/m^2$ ορίστηκε αντιστοιχία 0 dB. Ένας ήχος 10 φορές πιο ισχυρός με ένταση $10^{-11} W/m^2$ αντιστοιχεί σε 10 dB. Με τη βοήθεια πειραμάτων οι επιστήμονες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα 120 dB αποτελούν το ανώτατο όριο ανεκτικότητας της ακοής⁶ [1,2,3].

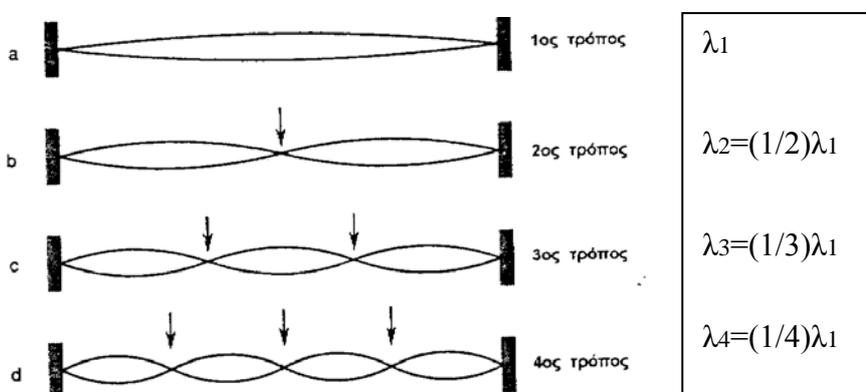
1.2 .3. ΦΑΣΜΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ (FREQUENCY SPECTRUM)

Σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί προηγουμένως είναι γνωστό ότι οι ήχοι που παράγουν σχεδόν όλα τα μουσικά όργανα είναι ήχοι σύνθετοι. Ήχοι δηλαδή που αποτελούνται από μια θεμελιώδη συχνότητα και άλλες παράγωγες. Η θεμελιώδης συνιστώσα έχει την πιο χαμηλή συχνότητα από τις συνιστώσες στον σύνθετο ήχο και σχηματίζει τη θεμέλιο για τις άλλες συνιστώσες. Οι παράγωγες συχνότητες είναι συνήθως χαμηλότερης έντασης από την θεμέλιο. Ο συνολικός αριθμός των συχνοτήτων, η ένταση που έχει κάθε μια, η κατανομή τους και ο τρόπος που

⁶ Από αυτό το όριο και πάνω προκαλείται πόνος στο ανθρώπινο αυτί.

συσχετίζονται οι βάσεις τους, αποτελούν το φάσμα συχνοτήτων ενός ήχου, καθορίζοντας το είδος της κυματομορφής του. Το φάσμα συχνοτήτων ενός ήχου είναι το χαρακτηριστικό εκείνο που κάνει δύο ήχους που έχουν ίδια ένταση και ίδιες θεμελιώδεις συχνότητες να διαφέρουν. Η ίδια νότα για παράδειγμα το ΛΑ που αντιστοιχεί στη συχνότητα των 440 Hz και παράγεται από ένα πιάνο διαφέρει από αυτή της κιθάρας στην ίδια συχνότητα. Ο λόγος είναι ότι οι σύνθετοι αυτοί ήχοι έχουν διαφορετικά φάσματα συχνοτήτων[1,4].

Για τα γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται-γεννιούνται οι παράγωγες συχνότητες σε σχέση με τη θεμελιώδη συχνότητα ενός ήχου-κύματος, αναγκαία είναι η παρουσίαση του παραδείγματος της ταλάντωσης μιας τεντωμένης χορδής. Κατά τη διέγερση της, η χορδή πάλλεται με διάφορους τρόπους όπως παρουσιάζεται παρακάτω: Ταλαντώνεται ως προς το συνολικό μήκος της, ως προς το μισό μήκος της, ως προς το 1/3 και 1/4 και ούτω καθεξής του μήκους της, παράγοντας με αυτό τον τρόπο τη θεμελιώδη συχνότητα, την πρώτη παράγωγο, τη δεύτερη, την τρίτη, και ούτω καθεξής αντίστοιχα (Σχ.4).



(Σχ.4) Τρόποι δόνησης της χορδής.

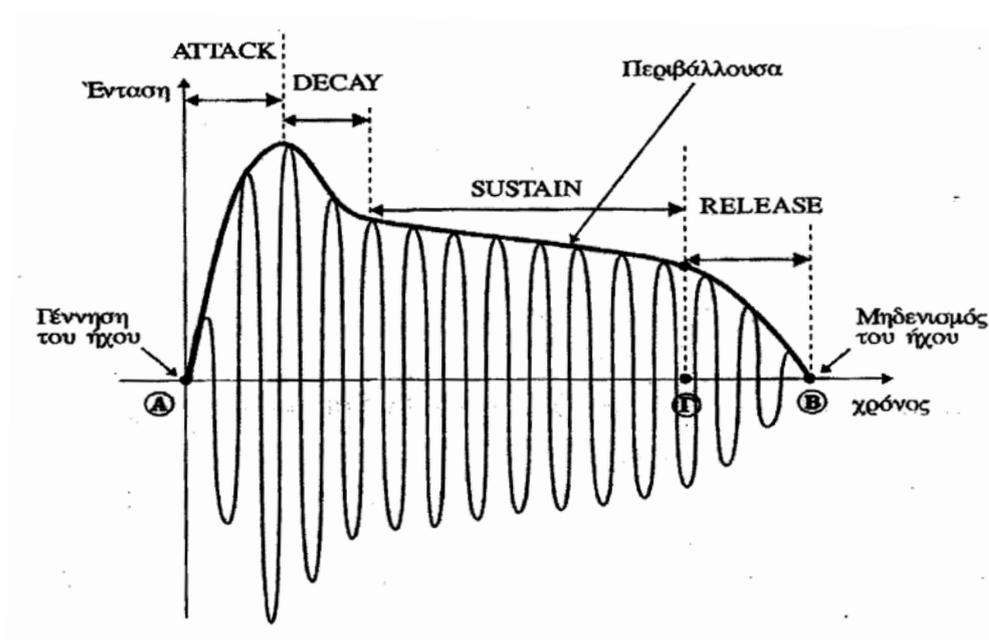
Οι παράγωγες συχνότητες των μουσικών οργάνων είναι κυρίως ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας. Αυτές οι παράγωγες συχνότητες ονομάζονται αρμονικές (harmonics) με την εξής ακολουθία: Σε σύνθετο ήχο με θεμελιώδη συχνότητα 110 Hz, η 1^η αρμονική αντιστοιχεί στα 110 Hz, η 2^η στα 220 Hz, η 3^η στα 330 Hz, η 4^η στα 440 Hz και ούτω καθεξής. Προκαλούνται βέβαια και παράγωγες συχνότητες οι τιμές των οποίων δεν αποτελούν ακέραιο πολλαπλάσιο της

θεμελιώδους συχνότητας. Αυτές οι παράγωγες συχνότητες ονομάζονται μη-αρμονικές (in harmonics) συχνότητες[1,4].

Ο πιο απλός και κατανοητός τρόπος με τον οποίο είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τους σύνθετους ήχους ,είναι η μέθοδος που βασίζεται στο θεώρημα του Fourier. Σύμφωνα με το θεώρημα αυτό ο σύνθετος ήχος μπορεί να αναλυθεί από μια σειρά ημιτονοειδών κυματομορφών με καθορισμένες συχνότητες, πλάτη και φάσεις κάθε σύνθετης κυματομορφής. Μια τέτοια ανάλυση ονομάζεται Fourier ανάλυση. Η χρήση της μας βοηθάει δηλαδή να αναλύσουμε κάθε σύνθετο ήχο σε πολλούς απλούς και να καταλάβουμε με αυτό τον τρόπο, τη δομή του φάσματος συχνοτήτων ενός ήχου, που παράγεται από ένα μουσικό όργανο [1].

1.2.4.ΠΕΡΙΒΑΛΟΥΣΑ (ENVELOPE)

Από τη στιγμή που παράγεται ένας ήχος, από ένα μουσικό όργανο για παράδειγμα, μέχρι τη στιγμή που θα σιγήσει ολοκληρωτικά, το πλάτος της κυματομορφής του ή αλλιώς η ένταση του μεταβάλλεται. Η μεταβολή αυτή της έντασης του ήχου καθ' όλη τη διάρκεια εξέλιξης του έχει τη μορφή της καμπύλης του σχήματος που δίνεται παρακάτω (Σχ.5)[4].



Σχ.5. Η περιβάλλουσα (ENVELOPE) στη γενική της μορφή .

Στο διάγραμμα αυτό βλέπουμε την αναπαράσταση της μεταβολής της έντασης του ήχου σε σχέση με το χρόνο. Η καμπύλη που προκύπτει ονομάζεται περιβάλλουσα.

Μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις φάσεις στην καμπύλη :

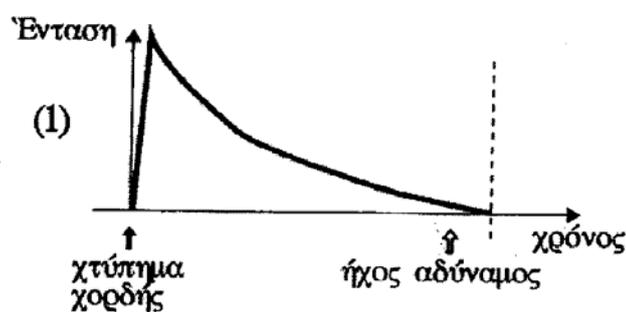
α). Η πρώτη φάση αποδίδει την αρχική και ανάλογα με το μουσικό όργανο αργή ή γρήγορη αύξηση της έντασης. Συνδέεται με την ατάκα δηλαδή με το πρώτο χτύπημα για παράδειγμα της χορδής και ονομάζεται Attack.

β). Στη δεύτερη φάση η καμπύλη μας παρουσιάζει την αρχή της μείωσης της έντασης, αμέσως μετά την ατάκα. Ουσιαστικά μιλάμε για την αρχική εξασθένηση του ήχου που ονομάζεται Decay.

γ). Στην τρίτη φάση παρατηρούμε τη διατήρηση μιας μέτριας έντασης, μέχρι το σημείο Γ. Ουσιαστικά αναφερόμαστε στην έννοια της διάρκειας οπότε και η φάση αυτή ονομάζεται Sustain.

δ). Τέλος στην τέταρτη φάση παρατηρούμε τη δραστική μείωση και το μηδενισμό του ήχου. Η φάση αυτή ονομάζεται Release[2].

Πρέπει να αναφέρουμε σε αυτό το σημείο ότι η μορφή της περιβάλλουσας εξαρτάται από το είδος του μουσικού οργάνου. Ένα έγχορδο μουσικό όργανο όπως είναι η κιθάρα ή το ούτι για παράδειγμα έχει γρήγορο-έντονο attack, λόγω του ότι η έντασή τους αποκτά απότομα μεγάλες τιμές. Όσο πιο δυνατά χτυπηθεί η χορδή τόσο πιο έντονο είναι το attack. Ταυτόχρονα όμως ο ήχος στην περίπτωση της κιθάρας ή του ουτιού εξασθενεί γρήγορα. Η καμπύλη της περιβάλλουσας στην περίπτωση της κιθάρας⁷ παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα 6:



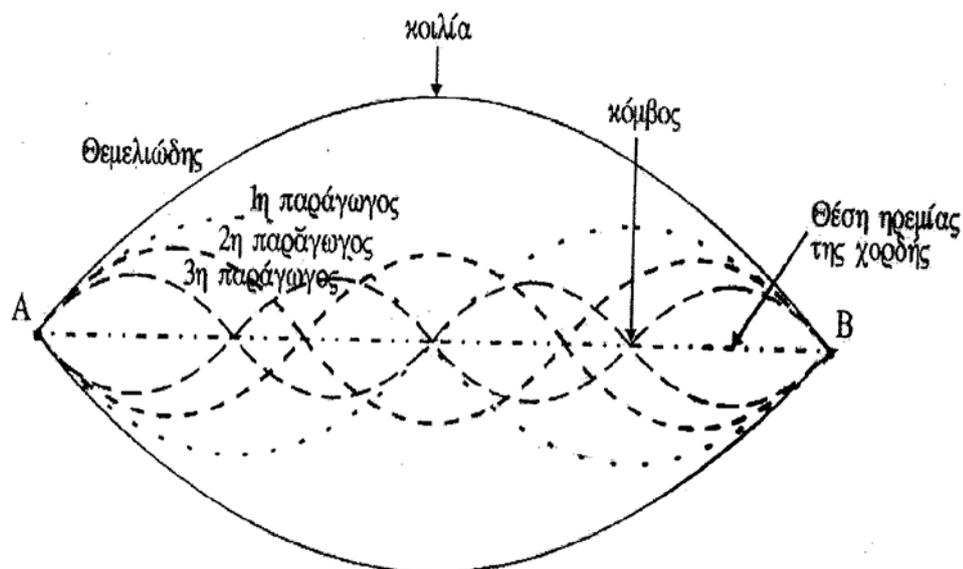
Σχ.6 Περιβάλλουσα καμπύλη κιθάρας

⁷ Μπορούμε να συσχετίσουμε την περιβάλλουσα καμπύλη της κιθάρας με αυτή που ισχύει στο ούτι λόγω του παρόμοιου τρόπου διέγερσης της χορδής. Και τα δύο αυτά έγχορδα μουσικά όργανα ανήκουν στην κατηγορία των εγχόρδων που παράγουν ήχο με τράβηγμα της χορδής.

Ο ήχος δηλαδή φαίνεται να έχει μόνο attack και release, δηλαδή έντονη αύξηση της έντασης και απότομη μείωσή της. Η χορδή για αρκετό χρόνο συνεχίζει να ταλαντεύεται ασθενώς, ο ήχος όμως είναι ουσιαστικά μη αισθητός, μέχρι του σημείου που μηδενίζεται[2].

1.2.5 ΟΙ ΕΝΝΟΙΕΣ MODES, NODES ΚΑΙ ANTINODES

Εάν παρατηρήσουμε μια τεντωμένη χορδή να πάλλεται, όπως ήδη έχουμε αναφέρει στο υποκεφάλαιο 1.2.3, μπορούμε να διακρίνουμε την πληθώρα των τρόπων κατά τους οποίους αυτή ταλαντώνεται. Γίνεται αντιληπτό ότι κάτι τέτοιο είναι πολύ δύσκολο να γίνει με απλή παρατήρηση δια γυμνού οφθαλμού. Αυτές οι διαφορετικές ταλαντώσεις μιας χορδής, που φαίνονται και στο σχήμα 4, ονομάζονται modes. Στο παρακάτω σχήμα (Σχ.7) απεικονίζεται μια χορδή η οποία δονείται με όλους αυτούς τους τρόπους (modes) την ίδια χρονική στιγμή. Τα σημεία της χορδής, στα οποία δεν υπάρχει κίνηση, καλούνται σημεία μηδενικής ταλάντωσης ή κόμβοι (nodes). Τα σημεία όπου το πλάτος της δόνησης είναι μέγιστο, καλούνται σημεία μέγιστη ταλάντωσης ή κοιλίες (antinodes)[1,3,4].



Σχ.7 Οι πολλαπλές ταλαντώσεις μιας χορδής AB δημιουργούν τις παράγωγες συχνότητες πέραν της θεμελιώδους.

Βάσει των προαναφερθέντων καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η θέση που κατέχει το σημείο στο οποίο ξεκινά η διέγερση, παίζει σημαντικό ρόλο στον τρόπο με τον οποίο θα δονηθεί η χορδή.⁸ Έτσι για παράδειγμα διεγείροντας τη χορδή σε ένα σημείο το οποίο αποτελεί κομβικό σημείο (node) για έναν τρόπο (mode) δόνησης της χορδής, τότε αυτό το mode δεν θα πραγματοποιηθεί ή θα είναι τόσο ανίσχυρο που δύσκολα θα γίνει αντιληπτό από το ανθρώπινο σύστημα ακοής. Ακριβώς την ίδια συμπεριφορά μπορούμε να εντοπίσουμε και σε μια ξύλινη ράβδο ή σε μια ξύλινη πλάκα κατά την διάρκεια δόνησης τους[4]. Η παραπάνω διαπίστωση θα αποτελέσει τη βάση για τον συσχετισμό της ξύλινης ράβδου με τα καμάρια στο ούτι και της ξύλινης πλάκας με το καπάκι του οργάνου που θα πραγματευτούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

1.3.ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΗΧΩΝ.

Με τον όρο υποκειμενικά χαρακτηριστικά αναφερόμαστε στα χαρακτηριστικά εκείνα των ήχων που αφορούν τις αισθήσεις και τις ψυχολογικές εντυπώσεις που δημιουργούνται στον άνθρωπο αναφορικά με τον ρόλο του ως ακροατή. Αυτές οι αισθήσεις κυρίως σχετίζονται με το ποιόν και το ποσόν ενός ήχου και δεν υπάρχει η δυνατότητα να μετρηθούν με τη βοήθεια οργάνων μέτρησης, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των αντικειμενικών χαρακτηριστικών των ήχων.

Πολύ συχνά είναι δυνατό να διακρίνουμε ορισμένους συσχετισμούς μεταξύ των υποκειμενικών και αντικειμενικών χαρακτηριστικών. Παρόλα' αυτά στην καθημερινή ακουστική πραγματικότητα αυτό που αντιλαμβανόμαστε, ο ήχος δηλαδή, σχεδόν ποτέ δεν αποτελεί ένα ακριβές αντίγραφο του φυσικού ερεθίσματος, δηλαδή του ηχητικού κύματος. Τις περισσότερες των περιπτώσεων έχουμε να κάνουμε με ένα παραλλαγμένο αντίγραφο του φυσικού ήχου, λόγω της ιδιομορφίας της ανθρώπινης ακοής και των αλλοιώσεων και παραμορφώσεων που αυτό υφίσταται. Η επιστήμη της φυσικής μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια τη συχνότητα ενός ήχου, αλλά το άτομο αντιλαμβάνεται το μουσικό ύψος. Η ένταση του ηχητικού κύματος επίσης μπορεί να μετρηθεί, αλλά το ανθρώπινο ακουστικό αντιλαμβάνεται την ακουστότητα. Ένας σύνθετος ήχος τέλος μπορεί να αναλυθεί στις αρμονικές του συνιστώσες, σε αντίθεση

⁸ Δηλαδή το σημείο εκείνο που θα τραβήξουμε την χορδή για να αρχίσει να πάλλεται.

όμως ένας ακροατής αντιλαμβάνεται την χροιά. Το συμπέρασμα λοιπόν που προκύπτει από την παραπάνω θέση είναι πως τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά των ήχων που έχουν άμεση σχέση με τα αντικειμενικά αλλά δεν ταυτίζονται με αυτά είναι: το ύψος (pitch), η ακουστότητα (loudness) και η χροιά (timbre)[1].

1.3.1.ΤΟ ΥΨΟΣ (PITCH)

Ως ύψος ορίζεται το χαρακτηριστικό εκείνο του ήχου, που παρέχει στο ανθρώπινο αυτί την δυνατότητα να περιγράψει τους ήχους ως υψηλούς ή χαμηλούς. Μπορεί δηλαδή να θεωρηθεί το χαρακτηριστικό εκείνο της ακουστικής εντύπωσης με βάση το οποίο οι ήχοι μπορούν να διαταχθούν πάνω σε μια μουσική κλίμακα.

Το ύψος ενός ήχου σχετίζεται με τον ρυθμό επανάληψης του, δηλαδή με τη συχνότητα του ηχητικού κύματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα ενός ήχου τόσο πιο μεγάλο είναι και το ύψος. Λόγω του ότι το ύψος ανήκει στα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου, το ανθρώπινο σύστημα ακοής δεν είναι σε θέση να μετρήσει άμεσα τη συχνότητα ταλάντωσης ενός ηχητικού κύματος. Δύο διαφορετικής συχνότητας ήχοι μπορούν να γίνουν αντιληπτοί από το ανθρώπινο αυτί κατά τρόπο σχετικό. Αντιλαμβάνεται δηλαδή ότι ο ένας ήχος είναι πιο οξύς η πρίμος από τον άλλο και γενικότερα ήχους χαμηλών συχνοτήτων τους αντιλαμβάνεται σαν μπάσους, ενώ ο ήχος υψηλών συχνοτήτων σαν πρίμους[1,5].

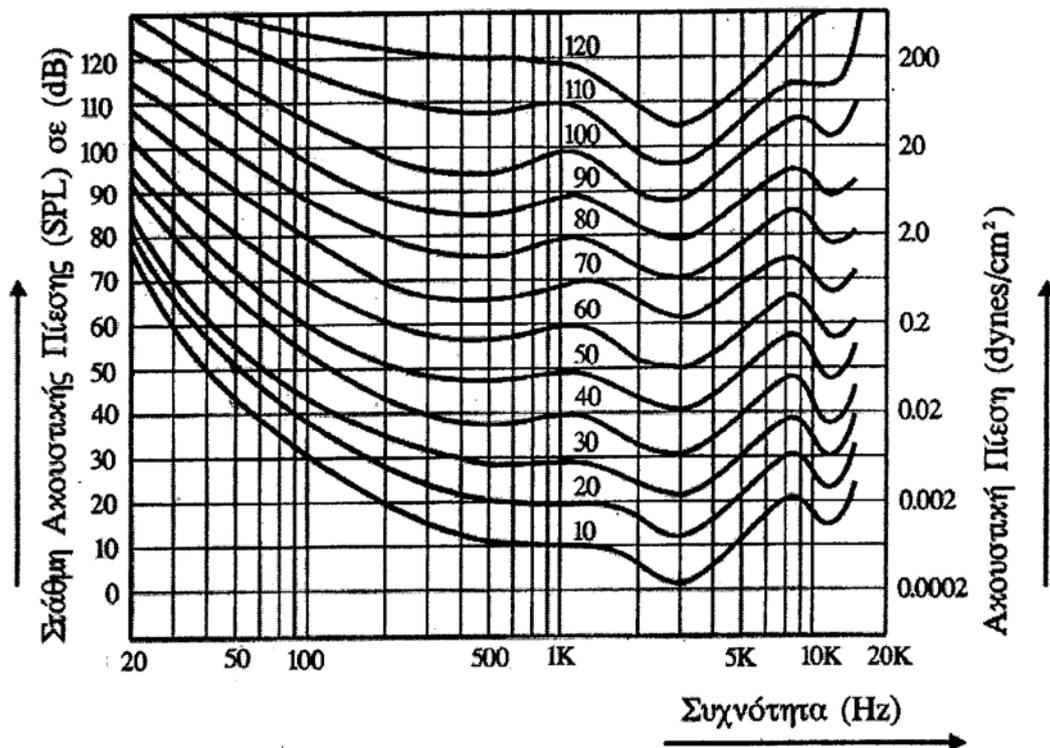
Ένα παράδειγμα στο οποίο γίνεται φανερή η διαφοροποίηση της έννοιας του ύψους από το φυσικό μέγεθος της συχνότητας είναι το ακόλουθο: Το μουσικό διάστημα Ντο-Ρε της δεύτερης οκτάβας του πιάνου με συχνότητες 65.4 Hz και 73.4 Hz αντίστοιχα, γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο αυτί σαν διάστημα ενός μουσικού τόνου. Την διαφορά των 8 Hz που υπάρχει δηλαδή στο διάστημα αυτό στην προκειμένη περίπτωση την αντιλαμβάνεται ως διάστημα τόνου. Το διάστημα τώρα Ντο-Ντο# της τρίτης οκτάβας του πιάνου με συχνότητες 130.8 Hz και 138.6 Hz αντίστοιχα, διαφορά δηλαδή επίσης 8 Hz, σ' αυτή την περίπτωση γίνεται αντιληπτό σαν διάστημα ημιτόνιου.

Κατά συνέπεια ο τρόπος που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο αυτί τις διαφορές συχνοτήτων, σχετίζεται άμεσα με τη θέση αυτών στο ακουστικό φάσμα. Έτσι σε χαμηλές συχνοτήτες αντιλαμβάνεται λιγότερα διαφορετικά ύψη απ' ότι σε υψηλές

συχνότητες που οι διαφορές συχνοτήτων γίνονται αντιληπτές με περισσότερη ανάλυση σε περισσότερα ύψη[2,4].

1.3.2. ΑΚΟΥΣΤΟΤΗΤΑ (LOUDNESS)

Με τον όρο ακουστότητα αναφερόμαστε στο χαρακτηριστικό εκείνο γνώρισμα, βάσει του οποίου επιτυγχάνεται η διάκριση μεταξύ ενός ισχυρού και ενός ασθενούς ήχου. Κατ' αυτή την έννοια αποτελεί την υποκειμενική αντίληψη του φυσικού μεγέθους της έντασης. Ταυτοχρόνως το υποκειμενικό μέγεθος της ακουστότητας σχετίζεται άμεσα και με την συχνότητα ενός ήχου. Έτσι ενώ για μια συχνότητα, η αύξηση του πλάτους της ταλάντωσης αυτόματα προκαλεί μια αντίστοιχη αύξηση στην ένταση του ήχου, η ευαισθησία του ανθρώπινου αυτιού είναι διαφορετική για τις διάφορες περιοχές των ακουστικών συχνοτήτων[1]. Αυτό σημαίνει πιο απλά ότι ήχοι ίδιας έντασης, αλλά διαφορετικής συχνότητας έχουν διαφορετική ακουστότητα. Το διάγραμμα των καμπυλών ίσης ακουστότητας που συνέταξαν οι Fletcher-Munson και που ακολουθεί παρακάτω (Σχ.8) μας παρουσιάζει αναλυτικότερα τις παραπάνω θέσεις.



Σχ.8 Καμπύλες ίσης ακουστότητας.

Όπως διαπιστώνουμε εξετάζοντας το παραπάνω διάγραμμα το ανθρώπινο αυτί, δεν είναι το ίδιο ευαίσθητο σε όλες τις συχνότητες. Κάτω από το 1 kHz καθώς και πάνω από τα 6 kHz η ευαισθησία του παρουσιάζει αισθητή μείωση. Αντίθετα, στην περιοχή των 3 kHz με 4 kHz παρουσιάζει τη μέγιστη ευαισθησία⁹. Η πρώτη από κάτω καμπύλη παριστάνει την ένταση διαφόρων ακουστικών συχνοτήτων, που μόλις γίνονται αντιληπτές από τον άνθρωπο. Η καμπύλη αυτή του διαγράμματος ονομάζεται κατώφλι ακουστότητας ενώ η υψηλότερη καμπύλη αντιπροσωπεύει το όριο του πόνου[3,4].

Η μονάδα της στάθμης ακουστότητας είναι το phone. Έτσι όπως παρατηρούμε στον πίνακα (Σχ.8), η συχνότητα των 50 Hz με ένταση 50 dB γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο αυτί περίπου σε τιμή ακουστότητας 20 phons, ενώ η συχνότητα 3 kHz στην ίδια ένταση των 50 dB, γίνεται αντιληπτή περίπου σε τιμή 60 phons. Αυτό βέβαια δε σημαίνει ότι η δεύτερη συχνότητα των 3 kHz ηχεί με τριπλάσια ένταση από την πρώτη των 50 Hz, λόγω του ότι η στάθμη ακουστότητας δεν εκφράζει ακουστότητες με απόλυτο τρόπο. Η λύση στο πρόβλημα αυτό που προέκυπτε λοιπόν δόθηκε με την εισαγωγή μιας υποκειμενικής κλίμακας ακουστότητας. Η κλίμακα αυτή είναι η κλίμακα των Sones. Σύμφωνα με την κλίμακα αυτή, τα 2 Sones, ηχούν με διπλάσια ακουστότητα απ' ότι το 1 Sone, τα 20 Sones επίσης διπλάσια από τα 10 Sones και ούτω καθεξής. Τέλος το 1 sone ορίστηκε ως ο ήχος που παράγει ένας απλός τόνος συχνότητας 1000 Hz με στάθμη 40 phons[1,2,3].

1.3.3.ΧΡΟΙΑ (TIMBRE)

Η χροιά αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα της μουσικής και εξαρτάται άμεσα από την αρμονική δομή των ήχων. Πρόκειται για το κύριο χαρακτηριστικό βάσει του οποίου γίνεται η σύγκριση δύο ήχων του ίδιου ύψους και της ίδιας ακουστότητας. Πιο πρακτικά θα μπορούσαμε να πούμε πως η χροιά είναι το χαρακτηριστικό εκείνο του ήχου, το οποίο μας δίνει την δυνατότητα να αναγνωρίσουμε το είδος του μουσικού οργάνου που παράγει το συγκεκριμένο ήχο[4]. Βέβαια ως μη αντικειμενικό

⁹ Το συμπέρασμα αυτό βγαίνει λόγω του ότι συχνότητες μέχρι και το 1kHz καθώς και συχνότητες από 6kHz και πάνω χρειάζεται να εκτελεστούν σε μεγαλύτερη ένταση από αυτές ανάμεσα στα 3kHz-4 kHz ώστε να γίνουν το ίδιο αντιληπτές.

μέγεθος, η χροιά είναι η υποκειμενική αντίληψη του αρμονικού περιεχομένου του ήχου. Η αίσθηση της χροιάς ενός ήχου, εξαρτάται από τον αριθμό των παραγώγων συχνοτήτων που περιέχει, την αρμονική ή μη σχέση τους με τη θεμελιώδη συχνότητα, τον τρόπο κατανομής τους, δηλαδή από το φάσμα συχνοτήτων του ήχου. Ένας ήχος για παράδειγμα που η ποσότητα των παραγώγων συχνοτήτων του είναι μεγάλη, ακούγεται “πλούσιος”. Ενώ αντίθετα ένας ήχος με μικρό αριθμό παραγώγων συχνοτήτων είναι πιο “λιτός”.

Οι αρμονικές παράγωγες συχνότητες, αυτές δηλαδή που αποτελούν πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας, δημιουργούν με τη θεμελιώδη συχνότητα ενός ήχου αλλά και μεταξύ τους “ σύμφωνα ” μουσικά διαστήματα. Για παράδειγμα η δεύτερη και τέταρτη αρμονική δημιουργούν το διάστημα της οκτάβας με τη θεμέλιο, ενώ η τρίτη κι έκτη αρμονική απέχουν διάστημα πέμπτης καθαρό από τη θεμέλιο. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι η ύπαρξη των αρμονικών συχνοτήτων ενισχύει η έστω διατηρεί την αίσθηση της τονικότητας σε έναν ήχο[1].

Όπως όμως ήδη έχει αναφερθεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, κατά την διάρκεια παραγωγής ενός ήχου, παράγονται ταυτόχρονα και συχνότητες οι οποίες δεν αποτελούν πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας. Οι μη-αρμονικές αυτές συχνότητες σχηματίζουν με την θεμέλιο αλλά και μεταξύ τους “διάφωνα” διαστήματα. Για το λόγο αυτό η ύπαρξη μη-αρμονικών συχνοτήτων σε έναν ήχο τείνει να εξαφανίσει την αίσθηση του ύψους.

Επιπλέον χρήσιμο είναι να σημειωθεί πως το αρμονικό φάσμα των ακουστικών οργάνων αλλάζει συνεχώς και δεν είναι κάτι εντελώς αμετάβλητο. Κατά συνέπεια η αντίληψη που μας δημιουργείται για την χροιά των οργάνων εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο λαμβάνουν χώρα αυτές οι αλλαγές[1].

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε προσπάθεια να παρουσιαστεί η διαφορά που υπάρχει ανάμεσα σε αυτό που ο άνθρωπος αισθάνεται και καταλαβαίνει ακούγοντας ένα έγχορδο μουσικό όργανο και σε αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα σύμφωνα με την φυσική ακουστική. Επιχειρώντας την μελέτη από την πλευρά του ήχου, ενός μουσικού οργάνου, πρέπει να ληφθούν υπόψιν και οι δύο αυτές προσεγγίσεις. Για έναν κατασκευαστή μουσικών οργάνων που αγνοεί βασικούς θεωρητικούς κανόνες της ακουστικής, μοναδικό οδηγό του για την κατασκευή ενός “άρτια”, από πλευράς ήχου οργάνου, αποτελεί αποκλειστικά η αντίληψη και η αίσθηση που του παρέχει το αυτί του. Σκοπός της μελέτης αυτής όμως είναι να επιτύχουμε τη συνεργασία της ακουστικής εμπειρίας και των κανόνων της φυσικής κατά τη διαδικασία κατασκευής

ενός μουσικού οργάνου. Ακούγοντας ένα πολύ καλό ηχητικά μουσικό όργανο και με βάση την εμπειρία που μπορεί να έχει ένας παραδοσιακός κατασκευαστής, κρίνεται βέβαιο πως θα είναι σε θέση να αναπαράγει το καλό αυτό ηχητικό αποτέλεσμα. Δύσκολα όμως θα έχει την δυνατότητα για περαιτέρω βελτίωση αυτού. Και αυτό λόγω του ότι βασική προϋπόθεση για ένα τέτοιο εγχείρημα είναι η γνώση από ακουστικής πλευράς της λειτουργίας ενός μουσικού οργάνου. Η εμπειρία του κάθε κατασκευαστή που εργάζεται με τους παραδοσιακούς τρόπους κατασκευής σχετίζεται ουσιαστικά με τα “πρότυπα” που πρέπει να ακολουθήσει προκειμένου να επιτύχει ένα καλό ηχητικό αποτέλεσμα. Δεν μπορεί κανείς να αποκλείσει βέβαια και τις τάσεις για πειραματισμό που μπορεί να έχει ο οποιοσδήποτε κατασκευαστής επάνω στην δουλειά του, αλλά ακόμα και αυτή η ανησυχία χωρίς τις γνώσεις της ακουστικής, που ισχύουν σε ένα μουσικό όργανο, είναι πάλι “πειραματισμός στα τυφλά”. Οι πιθανότητες να επιτευχθεί ένα καλό ηχητικά μουσικό όργανο είναι αρκετά μεγάλες για έναν έμπειρο κατασκευαστή, αλλά το αποτέλεσμα αυτό δεν μπορούμε να πούμε ότι είναι προϊόν μιας πορείας από βήματα που συνειδητά ακολουθήθηκαν. Φυσικά κανείς δεν μπορεί να ισχυριστεί πως είναι σε θέση να ελέγξει απόλυτα το αποτέλεσμα που θα προκύψει όταν ολοκληρωθεί ένα μουσικό όργανο. Αυτό φαίνεται εντελώς λογικό αν προσπαθήσουμε να αναλογιστούμε την πληθώρα των παραγόντων που εμπλέκονται στο τελικό ηχητικό αποτέλεσμα. Πάντα το απρόσμενο έχει θέση σε μια τέτοια διαδικασία. Σίγουρα όμως μέσα από τη μελέτη ενός οργάνου με τη βοήθεια της επιστήμης της ακουστικής πολλές προοπτικές βελτίωσης μπορούν να διαφανούν.

Μελετώντας ένα μουσικό όργανο, στην προκειμένη περίπτωση ένα ούτι, το οποίο σύμφωνα με την ανθρώπινη αντίληψη θεωρείται από ηχητικής πλευράς ένα καλό όργανο, μπορούμε να καταλήξουμε σε ορισμένα συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα αυτά είναι δυνατό να μετρηθούν με τη βοήθεια της ακουστικής. Μπορούμε δηλαδή να αποτυπώσουμε αριθμητικά τη σχέση των εντάσεων που έχει το συγκεκριμένο όργανο στις διάφορες περιοχές συχνότητων του. Επίσης ποιες συχνότητες είναι αυτές που κυριαρχούν κατά την διαδικασία εκτέλεσης του οργάνου, οι οποίες ευθύνονται για την αίσθηση του ηχοχρώματος (χρoιά) που μας προκαλεί. Ένα ακόμα κομμάτι που μπορεί να μας απασχολήσει είναι η καθαρότητα που επικρατεί μεταξύ των διαφόρων συχνότητων που το όργανο αυτό παράγει. Βέβαια για όλα αυτά τα δεδομένα δεν είναι ένας ο παράγοντας ο οποίος ευθύνεται. Το ούτι όπως και όλα τα μουσικά όργανα είναι ένα σύστημα περίπλοκο, που ολοκληρωτικά συμμετέχει στο τελικό ηχητικό αποτέλεσμα. Σίγουρα βέβαια το ποσοστό συμμετοχής

κάθε μέρος του οργάνου είναι διαφορετικό. Κάποια μέρη του ευθύνονται σε μεγαλύτερο βαθμό, αλλά αυτό θα αποτελέσει αντικείμενο ανάλυσης σε επόμενο υποκεφάλαιο και αφού προηγηθεί η περιγραφή των μερών που αποτελούν το ούτι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΤΟ ΟΥΤΙ ΚΑΙ Η ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.

2.1.ΤΟ ΟΥΤΙ

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, η αναφορά στον τρόπο κατασκευής ενός νυκτού εγγόρδου μουσικού οργάνου, όπως είναι το ούτι, δεν μπορεί παρά να σταθεί σε βασικές αρχές της διαδικασίας αυτής. Στόχος μας δεν είναι η διεξοδική ανάλυση της μεθόδου που ακολουθείται προκειμένου να κατασκευαστεί ένα ούτι. Η περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής γίνεται κυρίως στα πλαίσια μιας προσπάθειας αποδόμησης του μουσικού οργάνου στα μέρη που το αποτελούν και εστίασης στη σχέση που έχει το κάθε μέρος αλλά και όλο το όργανο ως σύνολο με τον ήχο που τελικά παράγεται.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το ούτι είναι ένα σύνολο το οποίο αποτελεί ένα μέσο για τη δημιουργία ήχων και κατ' επέκταση μουσικής. Θα μπορούσαμε να κρίνουμε ένα μουσικό όργανο συνολικά και να παρατηρήσουμε τα κύρια χαρακτηριστικά που το καθιστούν ιδιαίτερο. Μεμονωμένα όμως μια τέτοια μελέτη δεν θα είναι σε θέση να μας οδηγήσει στην απάντηση του ερωτήματος γιατί αυτό το μουσικό όργανο που μελετάμε έχει αυτά τα χαρακτηριστικά. Πού οφείλονται και τι περιθώρια βελτίωσης υπάρχουν από την πλευρά της κατασκευής του.

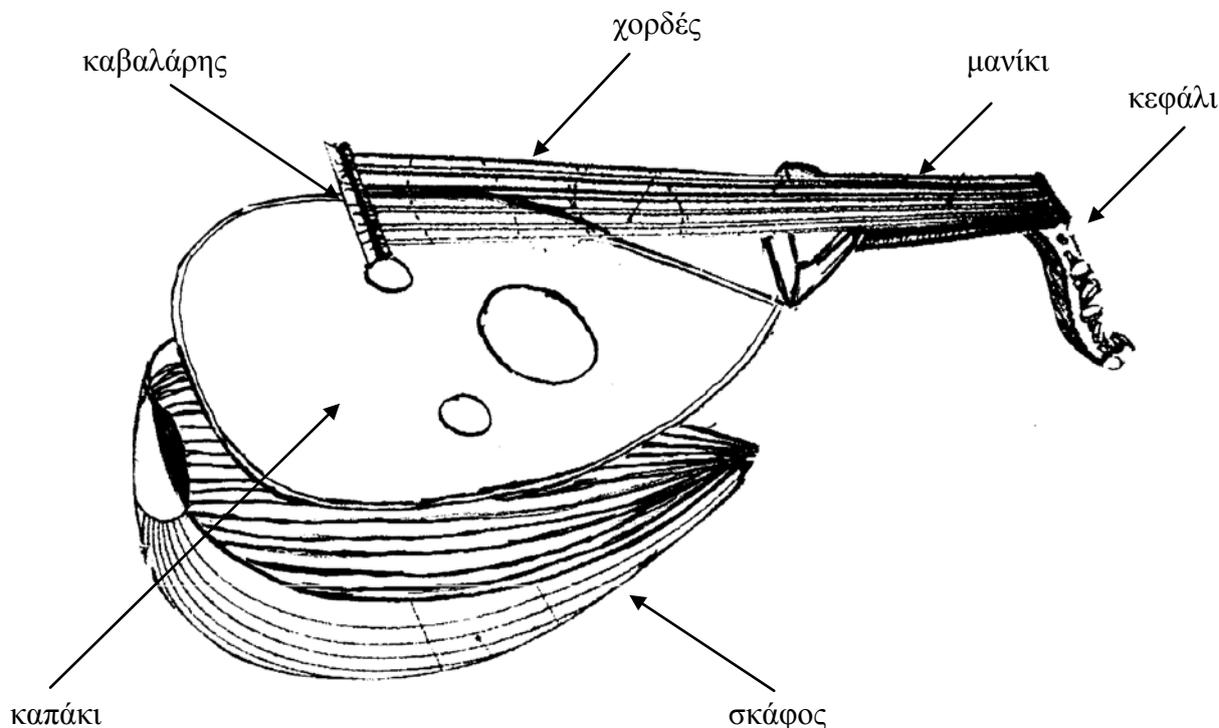
Σκόπιμη είναι στο σημείο αυτό, η αναφορά μας στα κύρια μέρη του οργάνου εστιάζοντας σε αυτά που επιδρούν σημαντικά στο τελικό ηχητικό αποτέλεσμα.

Το ούτι είναι ένα νυκτό έγχορδο μουσικό όργανο που ανήκει στην οικογένεια του λαούτου. Αναφερόμαστε στο τούρκικο ούτι όπως αυτό καθιερώθηκε από το Μανόλη Βένιο, τον πιο διάσημο Ρωμιό οργανοποιό της Πόλης¹⁰[6]. Τα κύρια στοιχεία που αποτελούν ένα ούτι είναι το σώμα, που με τη σειρά του αποτελείται από το σκάφος και το καπάκι, ο βραχίονας ή μανίκι, το κεφάλι ή καράβολας και οι έξι χορδές[7].

¹⁰ Βλ. στο βιβλίο Ρωμηοί Συνθέτες της Πόλης, στο επίμετρο 2, οι Ρωμηοί οργανοποιοί στη λόγια μουσική της Πόλης.

Οι χορδές είναι προσαρμοσμένες στη γέφυρα ή αλλιώς καβαλάρη, η οποία είναι κολλημένη στην επίπεδη επιφάνεια του σώματος δηλαδή στο καπάκι και κουρδίζονται στις νότες E₂, A₂, B₂, E₃, A₃, D₄ (από τη μπάσα περιοχή προς την πρίμα). Οι χορδές με κούρδισμα A₂, B₂, E₃, A₃, D₄ είναι ζεύγη χορδών ενώ η πιο μπάσα χορδή με κούρδισμα E₂ είναι μονή. Τα δύο πρώτα ζεύγη χορδών (κοιτώντας από κάτω προς τα πάνω) είναι από πλαστικό υλικό (πετονιά) ενώ οι υπόλοιπες τέσσερις χορδές είναι από μετάξι με μεταλλική περιέλιξη εξωτερικά. Είναι τεντωμένες πάνω από το καπάκι και περνώντας πάνω από την ταστιέρα καταλήγουν στο κεφάλι.

Το σώμα του οργάνου αποτελείται από ένα μεγάλο αχλαδόσχημο ηχείο και από το καπάκι. Το ηχείο του οργάνου κατασκευάζεται από 21-23 δούγιες (ξύλινες λωρίδες κατάλληλα διαμορφωμένες) κολλημένες μεταξύ τους[7]. Το καπάκι του οργάνου προσαρμόζεται στην ανοικτή επιφάνεια του ηχείου. Είναι επίπεδο και έχει μια μεγάλη τρύπα (sound hole) και δύο μικρότερες εκατέρωθεν της μεγάλης. Κάτω από τις δύο μικρότερες τρύπες κολλιέται ο καβαλάρης του οργάνου. Οι χορδές δένουν στον καβαλάρη με τον ίδιο τρόπο όπως στην κλασική κιθάρα.



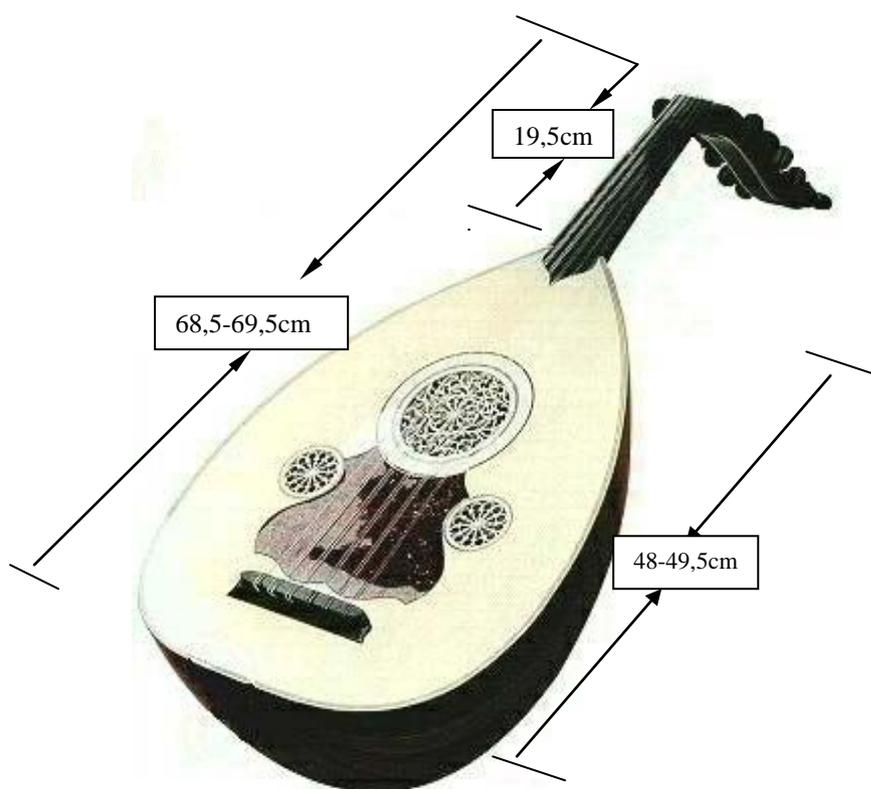
Ο βραχίονας στο ούτι είναι αρκετά κοντός σε σχέση με το σώμα του. Από τη μια του μεριά στερεώνεται επάνω στο σώμα του οργάνου ενώ από την άλλη στο κεφάλι. Το κεφάλι και το μανίκι δημιουργούν μεταξύ τους γωνία περίπου 90° . Το μήκος που θα έχει το μανίκι εξαρτάται από το μήκος χορδής του οργάνου. Συνηθίζεται, στο σημείο που ενώνεται το μανίκι με το σκάφος του οργάνου, να αντιστοιχεί η 5^η νότα κάθε χορδής του οργάνου. Δηλαδή στην κάτω χορδή που σε ανοικτή θέση είναι κουρδισμένη στο D₄, το σημείο αντιστοιχεί στη νότα A₄, ένα διάστημα 5^η επάνω. Όσο λοιπόν πιο μεγάλο είναι το μήκος χορδής¹¹ τόσο πιο μακρύ μανίκι θα έχει το ούτι και αντίστροφα. Τα αραβικά ούτια με μεγαλύτερο μήκος χορδής, έχουν μακρύτερο μανίκι από τα τούρκικα ούτια.

Μπορούμε να διακρίνουμε ορισμένες αναλογίες που ακολουθούνται στα περισσότερα ούτια: η πρώτη έχει να κάνει με το σχήμα του αντηχείου του οργάνου. Το αντηχείο στο μέγιστο βάθος του αποτελεί ένα ημικύκλιο. Οι διαστάσεις αυτού του ημικυκλίου καθορίζονται από τις διαστάσεις που έχει το καπάκι. Έτσι παρατηρείται ότι το μέγιστο βάθος στο ούτι συμπίπτει με το μισό του μέγιστου πλάτους στο καπάκι. Στις περισσότερες περιπτώσεις βέβαια, αυτό το μέγιστο βάθος του αντηχείου, που προκύπτει από τις διαστάσεις του καπακιού, είναι λίγο αυξημένο. Μπορούμε να φανταστούμε δηλαδή το μισό καπάκι του οργάνου να ακολουθεί μια ημικυκλική τροχιά και έτσι προκύπτει το σκάφος ή αντηχείο στο ούτι. Μια άλλη αναλογία είναι δυνατόν να παρατηρηθεί μεταξύ της θέσης που κολλιέται ο καβαλάρης πάνω στο καπάκι και της θέσης στην οποία ανοίγεται η μεγάλη τρύπα πάνω στο καπάκι στο ούτι. Ουσιαστικά δεν μένει παρά να υπολογιστεί το 1/3 του μήκους χορδής του οργάνου. Σε μήκος χορδής για παράδειγμα 58.5 cm το 1/3 υπολογίζεται στα 19.5 cm. Μετρώντας τώρα από το πάνω καβαλάρη (στη θέση δηλαδή που διασταυρώνονται το κεφάλι με το μανίκι) 19.5 cm, στο σημείο αυτό αντιστοιχεί η ένωση του μανικιού με το σκάφος. Από αυτό το σημείο μετρώντας άλλα 19.5 cm υπολογίζουμε τη θέση στην οποία θα ανοιχτεί η μεγάλη τρύπα πάνω στο καπάκι. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στο κέντρο της τρύπας. Από αυτό το σημείο επίσης αν μετρήσουμε 19.5 cm μας δίνεται η θέση στην οποία κολλιέται ο καβαλάρης πάνω στο καπάκι του ουτιού.

Στο σχήμα που ακολουθεί δίδονται οι διαστάσεις που συναντώνται (κατά μέσο όρο) σε ένα ούτι. Είναι επίσης φανερό αυτό που αναφέραμε παραπάνω για τη

¹¹ Το μήκος χορδής είναι η απόσταση μεταξύ των δύο καβαλάρηδων ενός εγχόρδου μουσικού οργάνου.

σχέση του μήκους του μανικιού με το μήκος του σκάφους. Το μήκος του σκάφους είναι περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερο από αυτό του μανικιού. Το μέγιστο πλάτος που έχει το καπάκι στο ούτι περίπου στα 36.5 εκατοστά καθώς και το μήκος χορδής του οργάνου περίπου 58.5 εκατοστά είναι διαστάσεις που καθιέρωσε ο Μανόλης Βένιος[6]. Σίγουρα υπάρχουν και ούτια με μικρότερες διαστάσεις, αλλά μπορούμε να παρατηρήσουμε και σε αυτά την τήρηση των αναλογιών που προαναφέραμε.



(Σχ.9) Τυπικές διαστάσεις του ουτιού.

Σε επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε με λεπτομέρεια τις διαστάσεις που έχει το καπάκι του οργάνου, τόσο τις εξωτερικές, όσο το πάχος και τις θέσεις των οπών. Πρώτα όμως είναι αναγκαίο να προσεγγιστεί το ούτι ως ένα σύστημα συζευγμένων ταλαντούμενων τμημάτων προκειμένου να γίνει αντιληπτός ο τρόπος

που λειτουργεί ως όργανο αλλά και πώς το κάθε μέρος του οργάνου συντελεί στην παραγωγή του ήχου.

2.2. ΤΟ ΟΥΤΙ ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΖΕΥΤΜΕΝΩΝ ΤΑΛΑΝΤΟΥΜΕΝΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ

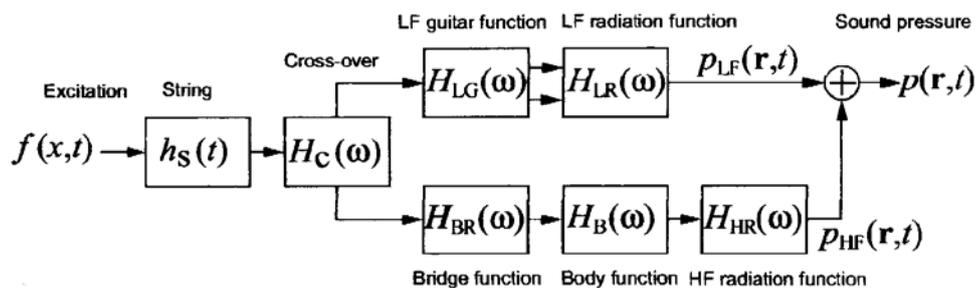
Ένα έγχορδο νυκτό μουσικό όργανο όπως είναι το ούτι, ακουστικά είναι ένα συνεχές σύστημα συζευγμένων ταλαντούμενων τμημάτων. Αυτό σημαίνει ότι κάθε μέρος του συστήματος αλληλεπιδρά με όλα τα υπόλοιπα μέρη, γεγονός που καθιστά την ακουστική περιγραφή του συστήματος αρκετά δύσκολη[8].

Προς το παρόν κρίνεται σκόπιμο να θεωρηθούν ως ένα ταλαντούμενο σύστημα A οι χορδές του οργάνου, και ως ένα άλλο ταλαντούμενο σύστημα B το σώμα του οργάνου. Όταν το ταλαντούμενο σύστημα A συνδέεται με το ταλαντούμενο σύστημα B έτσι, ώστε κατά την κίνησή του συστήματος A να ασκούνται δυνάμεις επί του συστήματος B, τότε λέμε ότι μεταξύ αυτών των δύο συστημάτων υπάρχει σύζευξη. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα A αποτελεί τον διεγέρτη (exciter) του συνολικού συστήματος (AB) και το σύστημα B τον συντονιστή (resonator). Στη σύζευξη τους παρατηρείται μεταφορά ενέργειας από το ένα ταλαντούμενο σύστημα στο άλλο, το ένα εκ των οποίων διαδοχικά καθίσταται διεγέρτης και συντονιστής. Επίσης όσο ισχυρότερη είναι η σύζευξη μεταξύ των δύο ταλαντούμενων συστημάτων, τόσο ταχύτερη είναι η μεταφορά ενέργειας από τον διεγέρτη στο συντονιστή. Στην περίπτωση δε που τα ταλαντούμενα αυτά συστήματα βρίσκονται σε συντονισμό,¹² τότε ολόκληρη η ποσότητα ενέργειας του διεγέρτη μεταφέρεται στο συντονιστή[1]. Μια εύκολη προσέγγιση για να προχωρήσουμε παρακάτω είναι να διαχωρίσουμε τα μέρη του συστήματος και να προσεγγίσουμε χωριστά το μηχανισμό του κάθε μέρους. Ένα ταλαντούμενο σύστημα μπορεί να εκτελέσει εξαναγκασμένες ταλαντώσεις, όταν ένας διεγέρτης του προσφέρει την απαιτούμενη ενέργεια. Μια απλοποιημένη λειτουργία του οργάνου ως σύστημα έχει ως εξής: ο οργανοπαίκτης διεγείρει το σύστημα επιβάλλοντας μια διανεμητική δύναμη πάνω στη χορδή, η οποία κάνει τη χορδή να δονείται. Η ενέργεια δόνησης της χορδής μερικώς διασκορπίζεται και διαβιβάζεται μέσω της γέφυρας στο σώμα του οργάνου. Το σώμα,

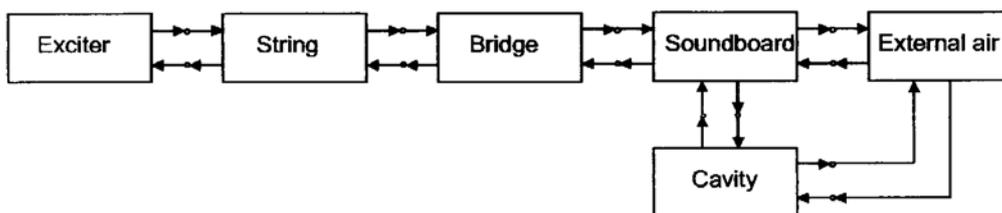
¹² Το φαινόμενο του συντονισμού προκύπτει όταν η συχνότητα ταλάντωσης ενός συστήματος στην προκειμένη περίπτωση του συστήματος A, συμπίπτει με την συχνότητα ταλάντωσης του συστήματος B.

ως σύνολο του αντηχείου και του καπακιού, αντιδρά σε αυτή τη διαβίβαση ενέργειας και επιδίδεται σε συντονισμούς[8]. Ο ήχος λοιπόν που φτάνει στα αυτιά μας από ένα έγχορδο μουσικό όργανο, δεν προέρχεται άμεσα από την ταλαντωτική κίνηση της χορδής αυτής καθεαυτής, αλλά από τις εξαναγκασμένες ταλαντώσεις των μερών του σώματός του, εξαιτίας της ταλαντωτικής κίνησης της χορδής[2]. Συνεπώς ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας από την ταλάντωση της χορδής, μετατρέπεται σε ενέργεια ταλαντώσεις του καπακιού του εγχόρδου οργάνου, που λόγω του μεγάλου εμβαδού του ταλαντούμενου μέρους του, καθίσταται ικανοποιητική πηγή εκπομπής ήχου, εκείνου που τελικά γίνεται αντιληπτός. Οπότε το σώμα του εγχόρδου μουσικού οργάνου δρα ως ένας ενισχυτής του ασθενούς ήχου των χορδών[1].

Η απλοποιημένη αυτή λειτουργία του οργάνου όπως περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να παρασταθεί σε ένα διάγραμμα όπως αυτό που ακολουθεί:



όπου με $f(x,t)$ συμβολίζεται η διανεμητική δύναμη (excitation) που ασκείται πάνω στη χορδή και με $h_s(t)$ η χορδή (string) που δονείται. Η $H_B(\omega)$ αναφέρεται στο σώμα του οργάνου (body function) και η $H_{BR}(\omega)$ στον καβαλάρη του (bridge function). Το $H_{HR}(\omega)$ που ακολουθεί είναι η εκπεμπτική λειτουργία του οργάνου (radiation function) που φιλτράρει τις δονήσεις και το $P(r,t)$ είναι η πίεση του ήχου (sound pressure)[8]. Πιο απλά και χωρίς την χρήση μαθηματικών συμβολισμών το συζευγμένο αυτό σύστημα μπορεί να παρασταθεί και ως εξής:



Όπως γίνεται κατανοητό οι παράγοντες αυτού του συστήματος είναι οι χορδές, το καπάκι, το αντηχείο και ο αέρας που βρίσκεται μέσα στο σώμα. Οι χορδές συζευγμένες με το καπάκι αλληλεπιδρούν. Το καπάκι αλληλεπιδρά με τον αέρα που είναι “κλεισμένος” μέσα στο αντηχείο και ταυτόχρονα με το σώμα του οργάνου. Η διαδικασία αυτή λειτουργεί φυσικά και αντίστροφα. Το κάθε μέρος ξεχωριστά λοιπόν έχει τους δικούς του τρόπους δόνησης (modes) που μπορούν να ανιχνευθούν με διάφορες μετρήσεις όπως θα δούμε παρακάτω. Στην πραγματικότητα βέβαια τα πράγματα είναι πολύ πιο πολύπλοκα αφού τα modes δόνησης για παράδειγμα του καπακιού επηρεάζονται από την σύζευξή του με το σκάφος του οργάνου και αντίστροφα τα modes του σκάφους του οργάνου επηρεάζονται από τα modes του καπακιού. Κατά συνέπεια, η ακριβής περιγραφή του συστήματος προϋποθέτει την μελέτη των μερών ενός μουσικού οργάνου κατά την σύζευξη τους. Μια αναλυτική παρουσίαση του φαινομένου όπως περιγράφηκε παραπάνω βέβαια, είναι έξω από τους στόχους της εργασίας αυτής. Στο επόμενο υποκεφάλαιο θα προσπαθήσουμε να παρουσιάσουμε απλοποιημένα αυτή τη θέση με σκοπό να εστιάσουμε στους τρόπους με τους οποίους δονείται το καπάκι ενός εγχόρδου μουσικού οργάνου, και συγκεκριμένα το καπάκι του ουτιού.

2.3.Τρόποι ταλαντώσεως των μερών και σύζευξη τους

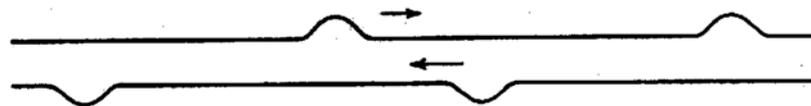
2.3.1 Οι χορδές

Η χορδή ενός έγχορδου μουσικού οργάνου είναι ένα κυλινδρικό και ελαστικό στέρεο σώμα, με μικρή διάμετρο σε σχέση με το μήκος του. Στην περίπτωση των μουσικών οργάνων τα δύο άκρα της χορδής, το ένα στην γέφυρα (καβαλάρης) και το άλλο σε κλειδί, είναι ακλόνητα στερεωμένα, έτσι ώστε η χορδή να είναι καλά τεντωμένη.

Διεγείροντας μια χορδή, η οποία βρίσκεται στερεωμένη σε δύο στέρεα υποστηρίγματα, μπορούμε να διαπιστώσουμε πως δεν εκπέμπει ήχο (τουλάχιστον αισθητά αντιληπτό από τον ανθρώπινο μηχανισμό ακοής). Ο λόγος είναι ότι η κίνηση αυτής της χορδής επηρεάζει ελαχιστότατη μάζα αέρα[2]. Παρόλο που η κίνηση της

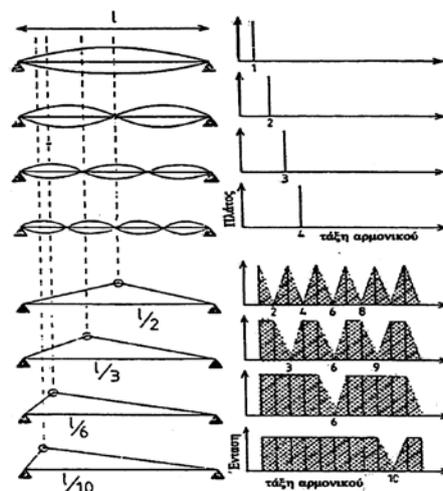
δημιουργεί πυκνώματα και αραιώματα στα μέρη του αέρα, η πολύ μικρή ακτίνα της σε σχέση με το μήκος κύματος των κυμάτων που παράγονται, έχει ως αποτέλεσμα τα κύματα αυτά να αλληλοαναιρούνται.

Θεωρώντας μια ιδανική χορδή¹³ και απομακρύνοντας ένα σημείο αυτής από την θέση ισορροπίας του, παρατηρείται ότι εξαιτίας των ελαστικών δυνάμεων, που επιδρούν επάνω του, τείνει να επανέλθει στην αρχική του θέση, γεγονός που προκαλεί την δημιουργία φθίνουσων ταλαντώσεων¹⁴[1,2]. Επάνω στην χορδή διαδίδονται κύματα, τα οποία ανακλώνται στα σημεία που η χορδή είναι στερεωμένη. Όπως είναι φανερό στο σχήμα 10, τα κύματα αυτά έχουν αντίθετη φορά κίνησης και σχηματίζουν στάσιμα κύματα. Τα άκρα της τεντωμένης αυτής χορδής είναι πάντοτε κόμβοι.



(Σχ.10)Στάσιμα κύματα.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 1.2.5, ανάλογα με την θέση του σημείου διέγερσης μιας τεντωμένης χορδής, η χορδή πάλλεται με διαφορετικό τρόπο (mode). Η διαδικασία αυτή είναι πάρα πολύ σημαντική αν αναλογιστούμε ότι άμεσα επηρεάζεται το ηχόχρωμα του οργάνου. Στο παρακάτω σχήμα (Σχ.11) παρουσιάζονται οι τρόποι ταλάντωσης της χορδής σε σχέση με τα σημεία διέγερσής της.



(Σχ.11)Τρόποι δόνησης μιας τεντωμένης χορδής.

¹³ Δηλαδή μια χορδή με τέλεια ομοιογένεια και τέλεια εύκαμπτη, χωρίς αντίσταση στην κάμψη.

¹⁴ Αυτό λόγω και της αλληλεπίδρασης της χορδής με τον αέρα. Η ροή του αέρα γύρω από την κινούμενη χορδή προκαλεί απόσβεση των ταλαντώσεών της.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι διεγείροντας την χορδή στο μέσον της, ενισχύεται η πρώτη και η τρίτη αρμονική, ενώ δεν παράγεται η δεύτερη και η τέταρτη αρμονική. Αυτό γιατί το σημείο διέγερσης της χορδής συμπίπτει με κομβικά σημεία της δεύτερης και τέταρτης αρμονικής[4]. Ανάλογα συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν και για τα υπόλοιπα σημεία διέγερσης. Στην περίπτωση του ουτιού ο οργανοπαίκτης διεγείρει την χορδή περίπου στο 1/5 της, δηλαδή σε απόσταση 9.8 εκατοστά περίπου από τον καβαλάρη που βρίσκεται πάνω στο καπάκι.¹⁵ Αυτό σημαίνει ότι δεν παράγεται ο πέμπτος αρμονικός, καθώς στο σημείο που λαμβάνει χώρα η διέγερση, παρουσιάζει κομβικό σημείο.

2.3.2. Το αντηχείο (σκάφος)

Τα δύο έγχορδα μουσικά όργανα που έχουν μελετηθεί από επιστήμονες ως προς την ακουστική τους είναι η κλασική κιθάρα και το βιολί. Πληθώρα ερευνών είναι σε θέση να μας παρέχουν ασφαλή συμπεράσματα για την ακουστική λειτουργία αυτών των οργάνων, αλλά στην προσπάθεια συσχετισμού της κλασικής κιθάρας ή του βιολιού με το ούτι προκύπτουν ορισμένες διαφορές. Αναφερόμενοι κυρίως στις μελέτες που έχουν γίνει για την κλασική κιθάρα¹⁶, παρ'όλο που και τα δύο όργανα είναι νυκτά έγχορδα, έχουν κοντινό εύρος παραγωγής συχνοτήτων και λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο εν τούτοις στην προκειμένη περίπτωση (όσο αφορά δηλαδή το αντηχείο των δύο αυτών μουσικών οργάνων) παρουσιάζουν διαφορές. Το γεγονός αυτό προκύπτει λόγω του ότι το αντηχείο της κλασικής κιθάρας ουσιαστικά αποτελείται από ένα δεύτερο καπάκι (δηλαδή την πλάτη) το οποίο άμεσα επιδρά στην παραγωγή του ήχου, αφού έχει τη δυνατότητα να πάλλεται και να δημιουργεί ηχητικά κύματα, στην επίδραση του με τον αέρα. Στην περίπτωση του ουτιού όμως δεν είμαστε σε θέση να αναφέρουμε αυτή την τόσο ενεργή συνεισφορά του αντηχείου που παρατηρείται κατά την μελέτη της κλασικής κιθάρας. Και αυτό διότι το αντηχείο του οργάνου αποτελείται ουσιαστικά από μια ξύλινη επιφάνεια που

¹⁵ Αυτό βέβαια δεν είναι απόλυτο, αν αναλογιστούμε ότι ο κάθε οργανοπαίκτης έχει την ευχέρεια να διεγείρει την χορδή είτε πιο μπροστά είτε πιο πίσω από την απόσταση που αναφέρεται, ανάλογα με το χρωματισμό που θέλει να επιτύχει.

¹⁶ Συσχετισμός μπορεί να υπάρξει μόνο με το παράδειγμα της κλασικής κιθάρας, λόγω του ότι η λειτουργία του βιολιού διαφοροποιείται από αυτή που ισχύει στο ούτι, τόσο στο σημείο ότι οι χορδές στο βιολί πατάνε ουσιαστικά στον καβαλάρη, ενώ αντίθετα στο ούτι και στην κιθάρα τραβάνε τον καβαλάρη, όσο στο ότι το βιολί είναι ένα τοξωτό έγχορδο μουσικό όργανο (δηλ. οι χορδές διεγείρονται με την χρήση δοξαριού).

βρίσκεται διαρκώς υπό τάση. Δηλαδή δεν καθίσταται εφικτή η ανίχνευση ταλαντωτικών κινήσεων. Συμπερασματικά λοιπόν μιλώντας για το αντηχείο του ουτιού, είμαστε απλά σε θέση να ασχοληθούμε αποκλειστικά με τον όγκο του αέρα που αυτό περικλείει.

Χρησιμοποιώντας όρους της επιστήμης της φυσικής θεωρούμε ότι το αντηχείο ενός εγχόρδου μουσικού οργάνου αποτελεί έναν συντονιστή Helmholtz[1,2]. Ειδικότερα αναφερόμαστε σε έναν συντονιστή Helmholtz χωρίς λαιμό γεγονός που διαφοροποιεί κάπως τα πράγματα. Ως δεδομένο λοιπόν έχουμε ένα “κουτί”, αν θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε τον όρο, με μία οπή όπως το αντηχείο του ουτιού. Ουσιαστικά γίνεται προσπάθεια μελέτης της συχνότητας συντονισμού του αέρα που βρίσκεται “εγκλεισμένος” μέσα στον όγκο του αντηχείου. Η συχνότητα συντονισμού του αντηχείου Helmholtz με μεγάλη μετωπική επιφάνεια (όπως είναι το καπάκι του ουτιού) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f = \frac{U_s}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha}{Vl}} \quad (2)$$

Όπου με f συμβολίζεται η συχνότητα συντονισμού του αντηχείου, με U η ταχύτητα του ήχου, με R η ακτίνα της οπής του αντηχείου και με V ο όγκος του αντηχείου. ($\pi=3,14$)[4].

Η παραπάνω αναφορά στους συντονιστές Helmholtz κρίνεται απαραίτητη λόγω του ότι με αυτά τα δεδομένα είμαστε σε θέση να επιλέξουμε την ιδιοσυχνότητα (δηλαδή, συχνότητα συντονισμού) που θέλουμε να έχει το αντηχείο ενός ουτιού και επιπλέον μέσω της αντίστροφης διαδικασίας, υπολογίζοντας τον όγκο του αντηχείου ενός ήδη κατασκευασμένου ουτιού, να γίνει δυνατός ο προσδιορισμός της ιδιοσυχνότητας του ή αλλιώς της συχνότητας συντονισμού Helmholtz[1,2].

Από τη μέχρι τώρα μελέτη και παρουσίαση των μερών που αποτελούν το ούτι καθώς και της συνεισφοράς του κάθε μέρους στο τελικό ηχητικό αποτέλεσμα του μουσικού οργάνου, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι το καπάκι ενός εγχόρδου μουσικού οργάνου είναι ο παράγοντας εκείνος που εμφανίζει την ουσιαστικότερη δυνατότητα επίδρασης στον ήχο ενός τέτοιου τύπου οργάνου. Αυτή η θέση μπορεί να ενισχυθεί επιπρόσθετα αν κανείς αναλογιστεί ότι κατά μέσο όρο οι παράγοντες: χορδές (συμπεριλαμβανομένου του μήκους τους, του κουρδίσματος τους και του υλικού τους), καθώς και οι διαστάσεις του αντηχείου του οργάνου κυμαίνονται σε σταθερές τιμές. Σίγουρα δεν είναι δυνατόν να αγνοηθούν και άλλοι παράγοντες όπως τα υλικά

που χρησιμοποιούνται (τύποι ξύλων) αλλά ακόμα και η προσεγμένη κατασκευή του οργάνου. Σκόπιμα όμως επιλέγεται να μην ενταχθούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

2.3.3. Το καπάκι.

Όπως ήδη έχει γίνει αντιληπτό η επίδραση του καπακιού στην παραγωγή ήχου στο ούτι, καθιστά αναγκαία μια πιο λεπτομερή προσέγγιση του φαινομένου. Το καπάκι εξαιτίας του ότι είναι άμεσα συνδεδεμένο με τις χορδές του οργάνου αποτελεί το πρώτο μέρος του σώματός του ουτιού που αντιδρά στην διέγερση των χορδών. Επιπλέον είναι το στοιχείο εκείνο του οργάνου που αλληλεπιδρά σε μεγαλύτερο βαθμό με τα μόρια του αέρα προκειμένου να παραχθεί ήχος¹⁷[1]. Θα μπορούσαμε να αναλύσουμε τη διαδικασία παραγωγής του ήχου από το ταλαντούμενο καπάκι στα ακόλουθα στάδια [1]:

- α) η διέγερση του καπακιού
- β) η απόκριση του καπακιού στην διέγερση
- γ) η εκπομπή ήχου από το καπάκι.

Στο σημείο αυτό απαραίτητη προκύπτει η περιληπτική αναφορά στη δομή ενός καπακιού και στις επικρατούσες διαστάσεις του. Με τον όρο καπάκι εννοούμε μια ξύλινη πλάκα συνήθως από έλατο πάχους 1.7-2 χιλιοστά.¹⁸ Το μήκος αυτής της ξύλινης πλάκας είναι περίπου 48-49 εκατοστά και το μέγιστο πλάτος της 36-36.5 εκατοστά. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε στο σχήμα 12, στο καπάκι ανοίγονται τρεις οπές. Μια μεγαλύτερης διαμέτρου από τις άλλες δύο. Η μεγάλη οπή ακτίνας περίπου 4 εκατοστών ανοίγεται σε απόσταση 19.5 εκατοστών από το πάνω άκρο του καπακιού. Οι δύο μικρότερες οπές, ανοίγονται 8 εκατοστά κάτω από την μεγάλη οπή του οργάνου και απέχουν μεταξύ τους 16.5 εκατοστά.¹⁹ Η ακτίνα των δύο μικρότερων οπών είναι 2 εκατοστά. Το καπάκι είναι πάντα ξύλο ακτινικής κοπής, όπως είναι φανερό στο σχήμα 13. Αποτελείται από δύο κομμάτια ξύλου καλά εφαρμοσμένα και στερεωμένα στη μια πλευρά τους. Τα δύο αυτά κομμάτια ξύλου ουσιαστικά είναι μια ξύλινη σανίδα σχισμένη στα δύο, ώστε να επιτευχθεί η ομοιομορφία στα νερά της αριστερής και της δεξιάς πλευράς του καπακιού.

¹⁷ Αυτό λόγω της μεγάλης ταλαντούμενης επιφάνειάς του.

¹⁸ Το πάχος, το μήκος και το πλάτος που αναφέρεται εδώ το συναντάμε σε καπάκια για ούτι. Σε άλλα έγχορδα όργανα οι τιμές των διαστάσεων που έχει το καπάκι διαφέρουν.

¹⁹ Οι αποστάσεις έχουν ως σημείο αναφοράς το κέντρο των οπών.

ΕΔΩ ΘΑ ΒΑΛΩ ΕΝΑ ΣΧΗΜΑ ΤΟΥ ΚΑΠΑΚΙΟΥ ΣΕ ΚΛΙΜΑΚΑ 1/2



(Σχ.12) Ξύλινη ελάτινη πλάκα ακτινικής κοπής.

Οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρεί το καπάκι του ουτιού είναι: α) να έχει τη μέγιστη ικανότητα να πάλλεται και β) να έχει αντοχή στην τάση των χορδών. Ουσιαστικά δηλαδή πρέπει να επιτευχθεί η χρυσή τομή ανάμεσα στην ενίσχυση του καπακιού για αντοχή και στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ελευθερία δόνησης. Τα κάθετα νερά του καπακιού (ως προς την κατεύθυνση των χορδών του οργάνου) συμβάλλουν στην αντοχή του. Βέβαια για περισσότερη ενίσχυση, λόγω του ότι το καπάκι μόνο του δεν αρκεί ώστε να αντισταθμίσει την τάση των χορδών, κολούνται εσωτερικά πάνω στο καπάκι υποστηρίγματα (καμάρια) όπως θα δούμε αναλυτικότερα παρακάτω.

Κάθε καπάκι αποτελεί ένα πολλαπλό-συντονιστικό σύστημα με ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων συντονισμού. Αυτό σημαίνει αυτόματα ότι το καπάκι δονείται με έναν διαφορετικό τρόπο για κάθε συντονισμό. Έτσι σε διάφορες συχνότητες συντονισμού διαφορετικά σημεία του καπακιού δονούνται με διαφορετικά μεγέθη, ποικίλλοντας μεταξύ μέγιστων και μηδενικών δονήσεων[9]. Αυτά τα δονητικά «πρότυπα» αποτελούν τα mode δόνησης του καπακιού. Τους τρόπους δηλαδή δόνησης του καπακιού σε διάφορες συχνότητες διέγερσης. Η μη λοιπόν ισότιμη διέγερση των διαφορετικών μερών του καπακιού ευθύνεται για την ύπαρξη διαφοροποιητικών χαρακτηριστικών στον ήχο που παράγεται από οποιοδήποτε έγχορδο όργανο[9]. Έτσι ενώ ένα όργανο έχει τη δυνατότητα να συντονίζεται σε ένα ευρύ φάσμα αρμονικών, ένα άλλο έχει μικρότερη ευαισθησία, στις συχνότητες διέγερσης.

Ο τρόπος που αντιδρά το καπάκι στις διάφορες συχνότητες διέγερσης στην ουσία αποτελεί ένα “φυσικό” σχέδιο συντονισμών. Η διάταξη αυτού του σχεδίου διαμορφώνεται από το σχήμα του καπακιού, από τη θέση των οπών πάνω στο καπάκι, από την δομή του ξύλου και το πάχος του[9]. Σκόπιμο κρίνεται να αναφερθεί ότι οι μηχανικές ιδιότητες χαρακτηρίζουν μια ξύλινη πλάκα, όπως είναι το καπάκι ενός έγχορδο οργάνου, καθορίζουν τις δονητικές και ακουστικές ιδιότητες του καπακιού[4]. Μια ξύλινη πλάκα έχει την τάση να ξεδιπλωθεί όταν αυτή διπλώνεται, δηλαδή περιέχει ένα ελατήριο, έχει συγκεκριμένη μάζα (βάρος) και εσωτερική τριβή[10,11]. Συμπερασματικά λοιπόν ένας έλεγχος των μηχανικών ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν μια ξύλινη επιφάνεια είναι σε θέση να μας παρέχει πληροφορίες για τις δονητικές ιδιότητές της. Το ερώτημα που προκύπτει είναι με ποιο τρόπο αλλάζουν τα ακουστικά μεγέθη μιας ξύλινης επιφάνειας αν ένα από τα μηχανικά μεγέθη αλλάξει. Στο σημείο αυτό είναι αναγκαία η αναφορά του μαθηματικού τύπου που μας βοηθάει να υπολογίσουμε την συχνότητα συντονισμού μιας ξύλινης πλάκας :

$$f = h \frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

Το F συμβολίζει την συχνότητα συντονισμού, το h αναφέρεται στο ύψος της ξύλινης πλάκας, το E στον συντελεστή ελαστικότητας της και το ρ στην πυκνότητα της. Επίσης η πυκνότητα ρ υπολογίζεται από την μαθηματική σχέση:

$$\rho = \frac{M}{blh} \quad (4)$$

όπου το M συμβολίζει την μάζα της ξύλινης πλάκας, το b το πλάτος της, με l συμβολίζεται το μήκος της ξύλινης πλάκας και με h το ύψος της ξύλινης πλάκας[4]. Αντικαθιστώντας τώρα στη μαθηματική σχέση υπολογισμού της συχνότητας συντονισμού, την σχέση υπολογισμού της πυκνότητας του υλικού προκύπτει :

$$f = h \frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\frac{M}{blh}}} = h \sqrt{\frac{Eblh}{Ml^4}} = h \sqrt{\frac{Ebh}{Ml^3}} \quad (5)$$

Από την παραπάνω ανάλυση είναι δυνατόν έστω και θεωρητικά να καταλήξουμε σε ορισμένα συμπεράσματα. Βάσει της παραπάνω μαθηματικής σχέσης μια αύξηση της μάζας (m) του υλικού αυτόματα προκαλεί μείωση της συχνότητας συντονισμού του υλικού και ανάλογα μια μείωση της μάζας προκαλεί αύξηση της συχνότητας συντονισμού. Επίσης αύξηση του ύψους (h) της ξύλινης επιφάνειας σημαίνει αύξηση της συχνότητας συντονισμού ενώ αύξηση του μήκους (l) προκαλεί μείωση της συχνότητας και αντίστροφα.

Ένας ισχυρισμός που δύναται να γίνει στο σημείο αυτό είναι αυτός ανάμεσα στην μάζα και στον συντελεστή κάμψης μιας ξύλινης πλάκας. Η αφαίρεση μάζας από μια ξύλινη επιφάνεια σημαίνει μείωση της ακαμψίας της συγκεκριμένης επιφάνειας και αντίστροφα. Το μέγεθος της ακαμψίας προκαλεί τα αντίστροφα αποτέλεσμα από αυτά της μάζας στις δονητικές ιδιότητες μιας επιφάνειας[12]. Δηλαδή ενώ μειώνοντας την μάζα μιας επιφάνειας αυξάνεται η συχνότητα συντονισμού, η μείωση στην ακαμψία που προκύπτει, συμβάλει με την σειρά της στην μείωση της συχνότητας συντονισμού και μάλιστα ισότιμα. Κλείνοντας προς το παρόν αυτό τον συλλογισμό πρέπει να αναφέρουμε ότι η ισότιμα αντίστροφη αυτή συμβολή των δύο μεγεθών (μάζα, ακαμψία,) δεν παρατηρείται για όλες τις περιοχές συχνοτήτων[12]. Θα επιστρέψουμε σε αυτήν την κατεύθυνση αφού πρώτα επισημάνουμε περισσότερα δεδομένα για την ακουστική φύση μιας ξύλινης επιφάνειας.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, μια ξύλινη επιφάνεια όπως είναι το καπάκι του ουτιού, αντιδράει (ακουστικά και δονητικά) με διαφορετικό τρόπο σε διάφορες συχνότητες συντονισμού. Για μια συχνότητα συντονισμού δηλαδή, το καπάκι παρουσιάζει ένα mode δόνησης με σημεία μέγιστης και μηδενικής ταλάντωσης όπως συμβαίνει και σε μία τεντωμένη χορδή. Και στο καπάκι λοιπόν μπορούμε να διακρίνουμε κόμβους και κοιλίες σε δεδομένες συχνότητες διέγερσης. Επομένως από τη στιγμή που τα antinodes σημεία για μια δεδομένη συχνότητα συντονισμού είναι σημεία μέγιστης δόνησης, μπορούμε να καταλάβουμε ότι μια αφαίρεση μάζας σε αυτά τα σημεία έχει ισχυρότερο αποτέλεσμα, όπως περιγράφηκε παραπάνω, απ' ότι αφαίρεση μάζας μιας ξύλινης επιφάνειας σε ένα κομβικό σημείο για μια συχνότητα συντονισμού. Δηλαδή μειώνοντας τη μάζα μιας ξύλινης επιφάνειας σε ένα κομβικό σημείο για μια συχνότητα συντονισμού, η αύξηση της συχνότητας που θα προκύψει θα είναι μικρότερη από ότι αν αφαιρούσαμε μάζα σε ένα σημείο που αποτελεί κοιλία για αυτή τη συχνότητα συντονισμού. Κάτι ανάλογο προκύπτει αν προσπαθήσουμε να αυξήσουμε μάζα ή ακαμψία σε μια ξύλινη επιφάνεια.

Η περίπτωση αυτή θεωρούμε ότι προσεγγίζει πιο άμεσα αυτό που συμβαίνει στο καπάκι ενός ουτιού. Αυτό λόγω του ότι τα υποστηρίγματα (καμάρια) που τοποθετούνται εσωτερικά στο καπάκι για την αύξηση της αντοχής του στην τάση των χορδών, ουσιαστικά αυξάνουν τη μάζα του καπακιού και την ακαμψία στα σημεία που κολλιούνται. Ο οπλισμός αυτός του καπακιού επηρεάζει τα modes δόνησης του σε βαθμό ανάλογο με τη θέση τοποθέτησης των καμαριών πάνω στο καπάκι. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως δηλαδή, στο αν τα σημεία στήριξης συμπίπτουν με σημεία μέγιστης ή μηδενικής ταλάντωσης του καπακιού στους διάφορους τρόπους δόνησης του.

Επιστρέφοντας τώρα στα μηχανικά μεγέθη της μάζας και της ακαμψίας που εντοπίζουμε σε μια με ξύλινη επιφάνεια, οφείλουμε να επισημάνουμε ότι η επίδραση της αλλαγής αυτών των δύο μηχανικών ιδιοτήτων στις δονητικές-ακουστικές ιδιότητές τις, παρουσιάζουν μια ουσιαστική διαφορά. Με την αύξηση της μάζας μειώνεται η δονητική ευαισθησία²⁰ και η συχνότητα συντονισμού όπως ήδη έχουμε αναφέρει. Η επίδραση αυτή όμως αξίζει να σημειωθεί ότι συμβαίνει μόνο στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων. Αντίθετα η μείωση της ακαμψίας που περιγράφηκε ότι επιδρά ισότιμα και με αντίστροφη συμβολή από αυτή της αλλαγής της μάζας, αυξάνει την δονητική ευαισθησία και την συχνότητα συντονισμού μόνο στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων[12].

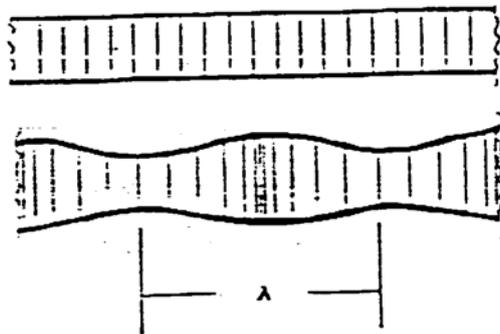
Αφού έγινε μια περιγραφή των μηχανικών ιδιοτήτων μιας ξύλινης επιφάνειας και έγινε αντιληπτή η συμβολή τους στις ακουστικές και δονητικές ιδιότητες αυτής, σκόπιμη κρίνεται μια σύντομη ενασχόληση με τα ηχητικά κύματα και τον τρόπο διάδοσης τους στα στέρεα μέσα.

Μέχρι στιγμής έχει γίνει αναφορά στην διάδοση των ηχητικών κυμάτων στον αέρα. Ενώ τα ηχητικά κύματα στον αέρα είναι άμεσα αντιληπτά από το ανθρώπινο αισθητήριο ακοής, δεν συμβαίνει κάτι ανάλογο με τα κύματα που διαδίδονται σε στερεά. Οι ταλαντώσεις σε ένα στέρεο μέσο δεν αποτελούν ήχο άμεσα αλλά έμμεσα λόγω του ότι διεγείρουν τον αέρα που βρίσκεται σε επαφή με αυτά[1]. Μια επιπλέον σημαντική διαφορά που μπορούμε να παρατηρήσουμε στη διάδοση των ηχητικών κυμάτων σε αέρια μέσα και στα στερεά είναι ότι τα στερεά εξαιτίας της δομής τους επιδέχονται διαφορετικού είδους παραμορφώσεις από ότι τα αέρια. Στην προσπάθειά μας να καταστήσουμε πιο κατανοητή την παραπάνω θέση καλό είναι να

²⁰ Το πόσο εύκολα δηλαδή μπορούμε να επιτύχουμε την δόνηση μιας ξύλινης επιφάνειας.

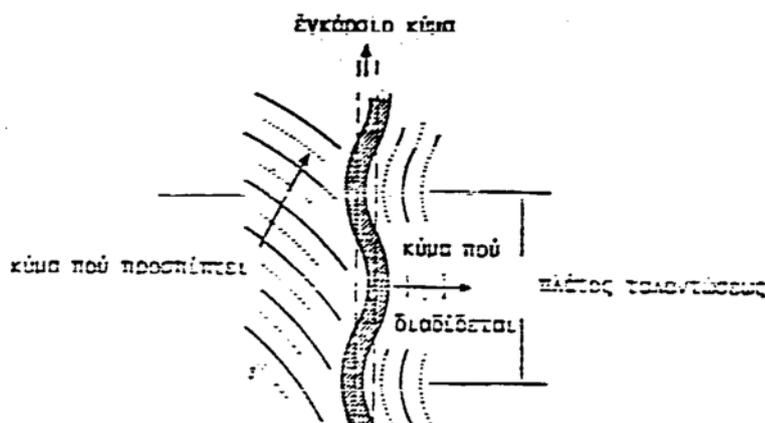
παρουσιάσουμε τα δύο είδη ηχητικών κυμάτων που εμφανίζονται στα στέρεα μέσα. Πρόκειται ουσιαστικά για τα διαμήκη και τα εγκάρσια ηχητικά κύματα που αποτελούν την αιτία εκπομπής ήχου στέρεων μέσων που διεγείρονται.

Τα διαμήκη ηχητικά κύματα εμφανίζονται στα στερεά μέσα όπως είναι για παράδειγμα μια ξύλινη επιφάνεια ή μια ράβδος και παρουσιάζουν ομοιότητες με τα ηχητικά κύματα στον αέρα. Η διεύθυνση διάδοσης των διαμηκών ηχητικών κυμάτων συμπίπτει με τη διεύθυνση των ταλαντώσεων[1] (Σχ.14).



(Σχ.14) Διαμήκη ηχητικό κύμα.

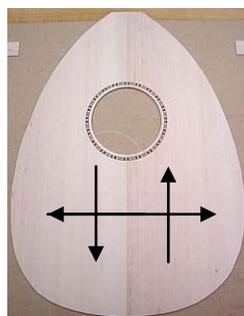
Στην πράξη όμως τον σπουδαιότερο τύπο κυμάτων στον οποίο οφείλεται η διάδοση του ήχου στα στέρεα σώματα αποτελούν τα εγκάρσια ηχητικά κύματα (Σχ.15)[1,2].



(Σχ.15) Εγκάρσιο ηχητικό κύμα.

Σε αντίθεση με τα διαμήκη κύματα η διεύθυνση διάδοσης των εγκάρσιων ηχητικών κυμάτων είναι κάθετη στην διεύθυνση ταλάντωσης. Καταλήγουμε λοιπόν

ότι σε ένα καπάκι από ένα έγχορδο μουσικό όργανο παρατηρείται η ύπαρξη και των δύο αυτών ηχητικών κυμάτων(Σχ.16).



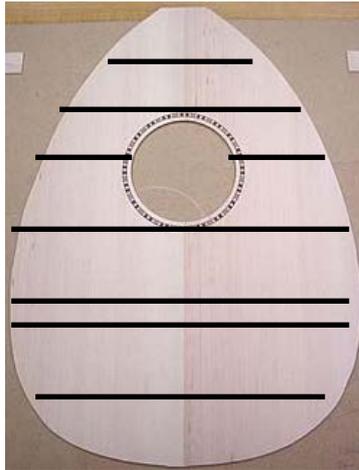
(Σχ.16) Εγκάρσια και διαμήκη κύματα στο καπάκι.

Όπως σε όλα τα κύματα έτσι και σε αυτή την περίπτωση διακρίνονται κόμβοι και κοιλίες κατά την διεύθυνση τους. Επόμενο είναι λοιπόν να προκύπτουν σημεία μέγιστης και μηδενικής ταλάντωσης. Η τελευταία διαπίστωση καθιστά τους τρόπους ταλάντωσης του καπακιού αρκετά πολύπλοκους. Στο συγκεκριμένο προβληματισμό θα επιστρέψουμε σε επόμενο κεφάλαιο κι αφού πρώτα αναφερθούμε στα καμάρια (υποστηρίγματα) του καπακιού.

2.3.4.Τα καμάρια.

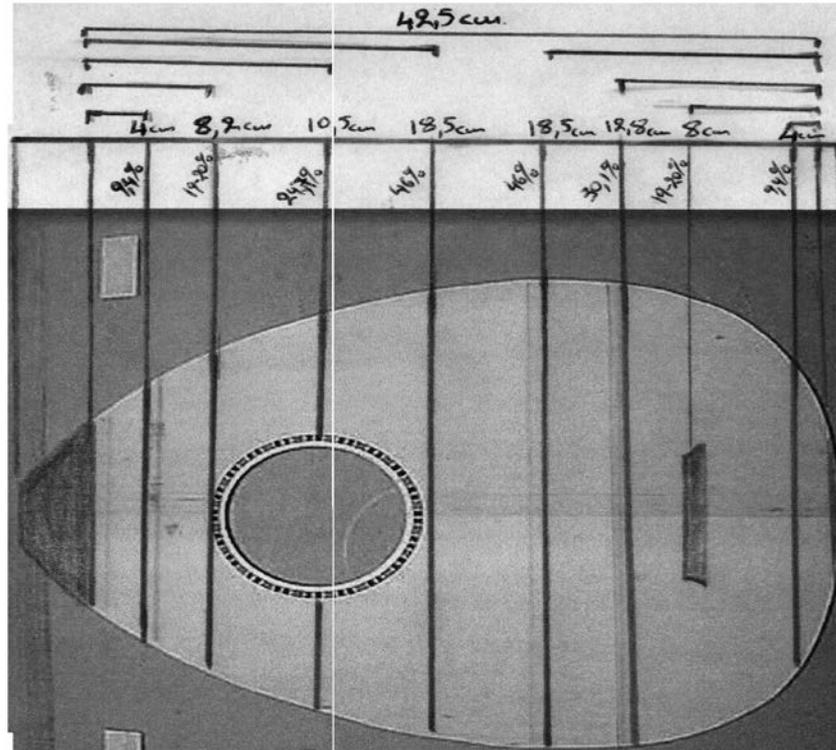
Αυτό που αρχικά πρέπει να τονίσουμε είναι ότι όλη η θεωρία των μηχανικών και ακουστικών-δονητικών ιδιοτήτων μιας ξύλινης πλάκας, ισχύει και στην προκειμένη περίπτωση σε μια ξύλινη ράβδο, όπως είναι ένα καμάρι. Ίσως μάλιστα στην περίπτωση της ξύλινης ράβδου να καταστούν και πιο σαφή τα παραπάνω, λόγω της κοντινής συμπεριφοράς της ξύλινης ράβδου με μια τεντωμένη χορδή. Προς την ίδια κατεύθυνση συμβάλει και το γεγονός ότι μια ξύλινη μπάρα όπως είναι ένα καμάρι μπορεί κατά κάποιο τρόπο να θεωρηθεί ως μια πιο σταθερά καθορισμένη ξύλινη επιφάνεια απ' ότι το καπάκι του ουτιού λόγω του ιδιόρρυθμου σχήματος του.

Όπως ήδη έχει σημειωθεί ο ρόλος των καμαριών πάνω στην επιφάνεια του καπακιού, είναι η ενίσχυση του ώστε αυτό να δύναται να αντισταθεί στην τάση των χορδών. Ο κλασικός οπλισμός που εφαρμόζεται στο καπάκι που προορίζεται για ένα ούτι, είναι μια διάταξη από 7 καμάρια όπως φαίνεται στο σχήμα 17.



(Σχ. 17). Η διάταξη των καμαριών στο καπάκι του ουτιού.

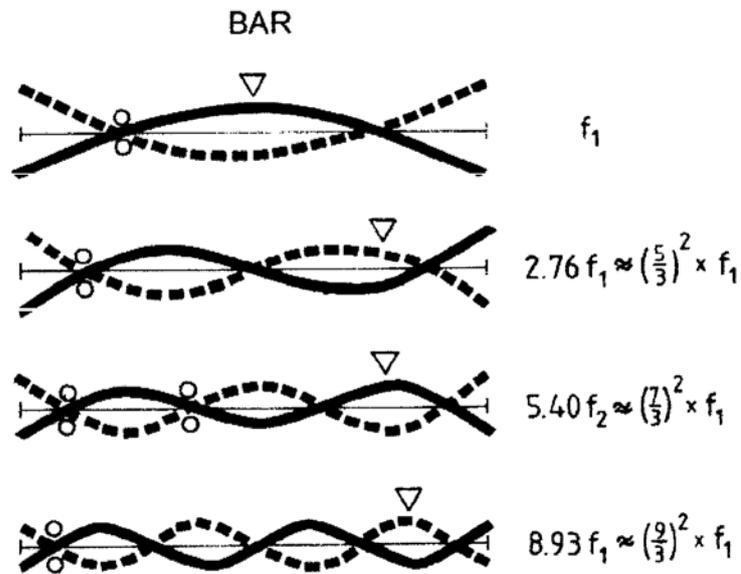
Ουσιαστικά λοιπόν πρόκειται για ξύλινες μπάρες με μήκος που ορίζεται από τα πλάτη, στα διάφορα σημεία τοποθέτησης των καμαριών, του καπακιού, πάχος περίπου 5 χιλιοστών και ύψους ανάλογα με την θέση του κάθε καμαριού πάνω στο καπάκι. Συνηθίζεται το ξύλο από το οποίο κατασκευάζονται τα καμάρια να συμπίπτει με αυτό του καπακιού και τα νερά των καμαριών να είναι κάθετα προς την ξύλινη επιφάνεια του καπακιού. Η λογική βάσει της οποίας προκύπτει η συγκεκριμένη διάταξη των καμαριών που αναφέρθηκε προηγουμένως γίνεται πιο εύκολα κατανοητή, αν θεωρήσουμε ότι υπάρχει η δυνατότητα συσχετισμού μεταξύ ενός τοποθετημένου στο σκάφος του οργάνου καπακιού, και μιας τεντωμένης χορδής. Η διάταξη αυτή παρουσιάζει μια συμμετρία ως προς την επιλογή των σημείων τοποθέτησης των καμαριών. Με δεδομένο ότι ο ντάκος του σκάφους (ο επάνω) έχει μήκος 6 εκατοστά και ο κάτω ντάκος 1 εκατοστό, το συνολικό μήκος του καπακιού που μένει ελεύθερο να δονείται μειώνεται από 49.5 εκατοστά σε 42.5 εκατοστά. Μετρώντας τώρα από το τέλος του πάνω ντάκου μέχρι το σημείο τοποθέτησης του 1ου καμαριού υπολογίζεται απόσταση περίπου 4 εκατοστά. Ίδια ακριβώς απόσταση υπολογίζεται και μετρώντας από το τέλος του κάτω ντάκου μέχρι το πρώτο καμάρια (από κάτω). Ανάλογες μετρήσεις μπορούν να γίνουν και για τα υπόλοιπα καμάρια με αποτελέσματα που εμφανίζονται στο σχήμα



(Σχ.18) Ο κλασικός οπλισμός στο καπάκι του ουτιού.

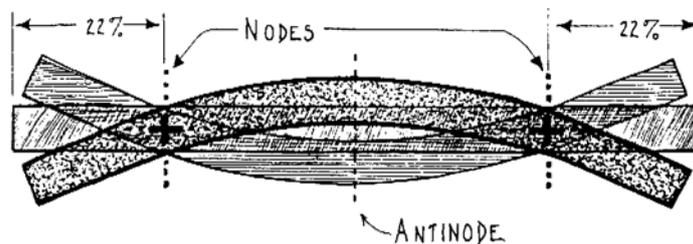
Όπως το καπάκι έτσι και ένα καμάρι έχει τις μηχανικές ιδιότητες της μάζας, τις τριβές του συντελεστή ελαστικότητας και ακαμψίας που και σε αυτή την περίπτωση καθορίζουν τις δονητικές-ακουστικές ιδιότητες του καμαριού.

Οι τρόποι δόνησης ενός καμαριού είναι δυνατόν να συσχετιστούν με αυτούς της τεντωμένης χορδής, γεγονός ιδιαίτερα χρήσιμο στην προσπάθεια για τον εντοπισμό των κομβικών και αντικομβικών σημείων που εμφανίζονται σε μια ξύλινη μπάρα[11]. Όπως παρατηρούμε λοιπόν στο σχήμα 19 αρχικά αναπαρίσταται ο τρόπος δόνησής της ξύλινης μπάρας στη θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού και στη συνέχεια οι τρόποι δόνησης στις αρμονικές παράγωγες συχνότητες. Τα βέλη μας υποδεικνύουν τα antinodes σημεία κατά την ταλάντωση της μπάρας, ενώ οι κύκλοι τα nodes σημεία.



(Σχ.19) Τρόποι ταλάντωσης μιας μπάρας

Κατά την διαδικασία ελεύθερης δόνησης μιας τέτοιας μπάρας, το mode δόνησης της θεμελιώδους συχνότητας είναι πιο ηχηρό, έτσι ώστε το ανθρώπινο αφτί να δίνει έμφαση σ' αυτό το mode. Αναλύοντας την ταλαντωτική κίνηση αυτού του θεμελιώδους mode παρατηρείται ότι: η μπάρα κινείται στο κέντρο καθώς και στα άκρα. Επίσης ανιχνεύονται δύο σημεία μηδενικής ταλάντωσης που βρίσκονται σε μια απόσταση περίπου 22% του συνολικού μήκους από κάθε άκρο(Σχ.20).



(Σχ.20) Δόνηση μπάρας με ελεύθερα άκρα.

Είναι αναγκαίο λοιπόν να καταστεί σαφές ότι όταν μια ξύλινη μπάρα ενεργοποιηθεί από μία συχνότητα ίση με την ιδιοσυχνότητα αυτής της μπάρας θα συντονιστεί, εκτελώντας το θεμελιώδες mode δόνησης[12].

Όλα τα παραπάνω ισχύουν όμως στην περίπτωση που μια ξύλινη μπάρα είναι σε θέση να δονείται ελεύθερα. Δεν είναι γνωστό όμως το τι συμβαίνει όταν αυτή η μπάρα τοποθετηθεί πάνω σε μια ξύλινη επιφάνεια όπως στην περίπτωση των καμαριών πάνω στο καπάκι στο ούτι. Η μόνη αναφορά που έχουμε πάνω στον συγκεκριμένο προβληματισμό είναι αυτή του τούρκου κατασκευαστή ουτιών Faruk Turunz. Η άποψή του πάνω στο συγκεκριμένο θέμα είναι ότι “η ιδιοσυχνότητα ενός καμαριού συνδυάζεται με την ιδιοσυχνότητα του καπακιού σ’ αυτή την περιοχή”, καθώς και ότι “η σύνθετη αυτή συχνότητα μπορεί να προσεγγιστεί σε μία ιδιαίτερα επιθυμητή συχνότητα”.²¹ Επιπρόσθετα εισάγει μια μαθηματική φόρμουλα²² για τον υπολογισμό της σύνθετης αυτής συχνότητας όπως φαίνεται παρακάτω:

$$F_c = \sqrt{\frac{F_n f}{3.333}} \quad (6)$$

Όπου με F_c συμβολίζεται η σύνθετη συχνότητα στο συγκεκριμένο σημείο, με F_n η συχνότητα του καπακιού στο συγκεκριμένο σημείο²³ και με f η συχνότητα του καμαριού. Όπως μπορεί να γίνει κατανοητό μια τέτοια παραδοχή είναι δύσκολο να γίνει αποδεκτή χωρίς πρώτα να ερευνηθεί η αξιοπιστία της.

Χρήσιμη προκύπτει στο σημείο αυτό η πρόταση και του ίδιου του Faruk Turunz σύμφωνα με την οποία τα υποστηρίγματα δηλαδή τα καμάρια πρέπει να τοποθετηθούν σε κομβικά σημεία πάνω στο καπάκι, ούτως ώστε η συνεισφορά της αντοχής που προσδίδουν να μην λειτουργεί απαγορευτικά στην δυνατότητα ταλάντωσης του καπακιού. Η παραδοχή αυτή στηρίζεται στη λογική ότι αφού ένας κόμβος είναι σημείο μηδενικής ταλάντωσης, τοποθετώντας στο σημείο αυτό ένα καμάρι ουσιαστικά ελαχιστοποιείται η επίδραση του καμαριού στον τρόπο που δονείται το καπάκι. Με αφετηρία αυτό το συλλογισμό προκύπτουν ερωτήματα όπως: πώς μπορούν να ανιχνευθούν τα κομβικά σημεία πάνω σε μια ξύλινη επιφάνεια όπως είναι το καπάκι, αλλά και επιπρόσθετα και έχοντας ως δεδομένο ότι ένα καπάκι δεν έχει έναν μόνο τρόπο δόνησης για όλες τις συχνότητες διέγερσης, ποιά κομβικά σημεία θα επιλεγούν ως σημεία τοποθέτησης των καμαριών.

²¹ Βλ. στην ηλεκτρονική διεύθυνση www.oudmaster.com.

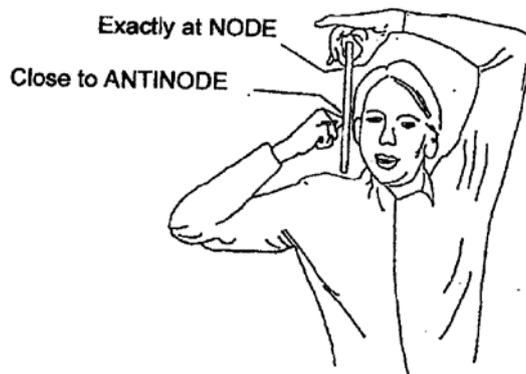
²² Η φόρμουλα αυτή προέκυψε μετά από πειραματισμού του ίδιου σε καπάκια που προορίζονταν για ούτι.

²³ Οι συχνότητες του καπακιού στις οποίες αναφέρεται είναι συχνότητες στα κεντρικά σημεία σε κάθε θέση τοποθέτησης των καμαριών.

2.4. Η μέθοδος tap tone και το “κούρδισμα” μιας ξύλινης μπάρας.

Η μέθοδος tap tone είναι μια διαδικασία που εφαρμόζεται από πολλούς κατασκευαστές κατά τη διάρκεια κατασκευής ενός μουσικού οργάνου. Ουσιαστικά δεν είναι τίποτε άλλο από το χτύπημα μιας ξύλινης επιφάνειας και την ανίχνευση με την βοήθεια της ακοής της παραγόμενης συχνότητας (του τελικού ύψους δηλαδή)[13]. Παρ' όλα αυτά όσο απλή και αν παρουσιάζεται αυτή η μέθοδος η χρησιμότητα της προκύπτει σημαντική. Αυτό όχι μόνο λόγω του ότι αποτελεί έναν σχετικά απλό τρόπο για την προσέγγιση της συχνότητας συντονισμού μιας ξύλινης επιφάνειας, αλλά επιπρόσθετα γιατί είναι σε θέση να μας υποδείξει τα κομβικά και αντικομβικά σημεία αυτής της επιφάνειας στη θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού.

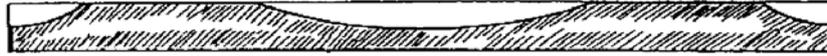
Εφαρμόζοντας τη μέθοδο tap tone σε μια ξύλινη μπάρα με σκοπό να ανιχνεύσουμε τα nodes και antinodes σημεία πάνω σ' αυτή, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα εξής. Το πιο καθαρό-ηχηρό τονικό ύψος μιας ξύλινης μπάρας μπορεί να επιτευχθεί όταν κρατήσουμε την μπάρα σε ένα node σημείο και τη χτυπήσουμε σε ένα antinode σημείο[12,13]. Με το πρώτο αυτό βήμα έχει βρεθεί ένα node σημείο (το σημείο στο οποίο κρατάμε την μπάρα) και ένα antinode σημείο (το σημείο στο οποίο χτυπάμε την μπάρα). Στην συνέχεια κρατώντας σταθερό το σημείο που κτυπάμε την μπάρα και χρησιμοποιώντας διάφορα σημεία από τα οποία κρατάμε τη μπάρα, μπορούμε να εντοπίσουμε και άλλα node σημεία εκεί που το τονικό ύψος θα ακουστεί δυνατά και καθαρά[4]. Σημειώνοντας τα σημεία αυτά και ενώνοντας τα, μπορούν να αναγνωριστούν οι κομβικές γραμμές. Αντίστροφα κρατώντας σταθερό το σημείο που κρατάμε την μπάρα και εναλλάσσοντας τα σημεία που χτυπάμε μπορούμε να εντοπίσουμε node σημεία εκεί που το τονικό ύψος χάνεται[12]. Όπως φαίνεται στο σχήμα 21 μια στάση ιδιαίτερα βολική στη εφαρμογή της διαδικασίας του tap tone, είναι να σταθεροποιείται η ξύλινη μπάρα με τον αντίχειρα και τον μέσο του αριστερού χεριού και να χτυπιέται με το μέσο του δεξιού χεριού.



(Σχ.21) Η μέθοδος tap tone.

Προτού προσπαθήσουμε να συσχετίσουμε την μέθοδο tap tone με το κούρδισμα μιας ξύλινης μπάρας σκόπιμο είναι να αποσαφηνίσουμε την έννοια του κούρδισματος. Όταν κάποιος τροποποιεί μια ξύλινη μπάρα σε ορισμένες διαστάσεις ουσιαστικά προσδιορίζει στην μπάρα αυτή τη συχνότητα συντονισμού της. Δηλαδή κάθε κατασκευαστής ο οποίος έστω και οπτικά διαμορφώνει τα καμάρια ενός μουσικού οργάνου ή το σχήμα και τις διαστάσεις του καπακιού, προσαρμόζει με αυτό τον τρόπο τη συχνότητα συντονισμού της κάθε ξύλινης επιφάνειας, ή αλλιώς την κούρδίζει. Όπως είδαμε παραπάνω το τονικό ύψος μιας ξύλινης μπάρας επηρεάζεται άμεσα από τη μάζα της και τον συντελεστή ακαμψίας της. Ας σταθούμε στην περίπτωση μιας ξύλινης ράβδου, ώστε τα πράγματα να γίνουν πιο κατανοητά.

Έστω ότι έχουμε μια ξύλινη ράβδο με συγκεκριμένο μήκος, πλάτος και ύψος. Η ράβδος αυτή έχει μια ορισμένη συχνότητα συντονισμού. Αν για οποιοδήποτε λόγο θέλουμε να επιτύχουμε μια συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού πρέπει να προσαρμοστούν ανάλογα και οι διαστάσεις. Στην περίπτωση που η ιδιοσυχνότητα του συγκεκριμένου καμαριού είναι υψηλότερη από τη συχνότητα που θέλουμε να επιτύχουμε, πρέπει να μειωθεί η ακαμψία σε antinodes σημεία, για τον θεμελιώδη τρόπο δόνησης του καμαριού. Τα σημεία αυτά για τον θεμελιώδη τρόπο δόνησης στο καμάρι βρίσκονται στο κέντρο και στις άκρες[12]. Το αποτέλεσμα που προκύπτει πλησιάζει στη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 22. Αυτή τη μορφή της ξύλινης μπάρας τη συναντάμε στα καμάρια των μουσικών οργάνων.



(Σχ.22)

Ανάλογα στοιχεία συναντάμε και κατά την διαδικασία κατασκευής του καπακιού ενός βιολιού. Δηλαδή μπορούμε σε ένα τελειοποιημένο καπάκι για βιολί να ανιχνεύσουμε διαφορετικά πάχη σε ορισμένα σημεία πάνω στο καπάκι. Στην περίπτωση του βιολιού όμως δεν τοποθετούνται καμάρια πάνω στο καπάκι, οπότε η διαδικασία κουρδίσματος του καπακιού είναι αποκλειστικά υπόθεση της επεξεργασίας της ξύλινης επιφάνειας που αποτελεί το καπάκι. Στο ούτι το πάχος που έχει το καπάκι είναι ίδιο σε όλη την επιφάνεια του. Η μοναδική διέξοδος λοιπόν, αν υποθέσουμε ότι το πάχος του καπακιού κυμαίνεται μεταξύ σταθερών τιμών από 1.7-2 χιλιοστά, για την επίτευξη της διαδικασίας του κουρδίσματος είναι ο ορισμός των θέσεων τοποθέτησης των καμαριών πάνω στο καπάκι καθώς και η επιλογή της μάζας που θα προσθέσουν αυτά στα διάφορα σημεία του καπακιού. Η όλη διαδικασία έχει ως στόχο την ενίσχυση συγκεκριμένων modes δόνησης που σχετίζονται με ορισμένες συχνότητες συντονισμού ή πιο σωστά την καταστολή ορισμένων mode δόνησης που δεν επιλέγονται από τον κατασκευαστή. Υπάρχει έτσι η δυνατότητα του ελέγχου των συντονισμών του καπακιού και κατ' επέκταση της διαμόρφωσης του ηχοχρώματος του οργάνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΫΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΓΙΑ MODAL ΑΝΑΛΥΣΗ.

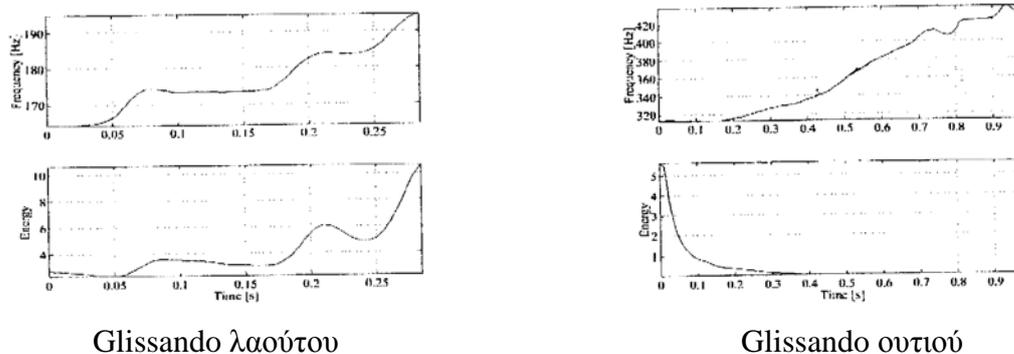
3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο βασικό αντικείμενο θα αποτελέσει η παρουσίαση μελετών που διαπραγματεύονται την ακουστική προσέγγιση του ουτιού. Με αφορμή την παρούσα μελέτη κρίθηκε αναγκαίος ο εντοπισμός σχετικής βιβλιογραφίας με αντικείμενο μελέτης την ακουστική προσέγγιση έγχορδων μουσικών οργάνων. Σε αντίθεση με το βιολί και την κιθάρα, το ούτι αποτελεί αντικείμενο μελέτης σε ελάχιστες ξενόγλωσσες εργασίες. Όσον αφορά βέβαια τη μελέτη του τρόπου που δονείται το καπάκι του ουτιού, η εύρεθείσα σχετική βιβλιογραφία είναι ελλιπής. Η παρουσίαση των εργασιών που προϋπάρχουν της παρούσας μελέτης, έχει ως στόχο την προβολή των μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί και των δεδομένων που έχουν προκύψει πάνω στην ακουστική προσέγγιση του ουτιού. Επιπρόσθετα με αυτόν τον τρόπο καθίσταται πιο κατανοητή η ζωοποιός αιτία της παρούσας μελέτης και η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή και την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Προς αυτή την κατεύθυνση θα κινηθεί και το δεύτερο μέρος αυτού του κεφαλαίου. Το περιεχόμενο του οποίου θα αποτελέσει η παρουσίαση των διαφόρων μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη του τρόπου με τον οποίο δονείται το καπάκι των έγχορδων μουσικών οργάνων κυρίως του βιολιού και της κιθάρας.

3.2 Προϋπάρχουσες μελέτες

Μια από τις εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί με στόχο την ακουστική μελέτη του ουτιού είναι αυτοί των Mikael Laurson, Mika Kuuskankare, Vesa Valimaki και Cumhur Erkut. Σε αυτήν την εργασία με τίτλο Model-based Synthesis of the Ud and the Renaissance Lute που εκδόθηκε το Σεπτέμβριο του 2001 περιγράφονται τεχνικές για τη σύνθεση ήχου του ουτιού και του αναγεννησιακού λαούτου με τη χρήση των φυσικών μοντέλων[14]. Δηλαδή γίνεται προσπάθεια

εξομοίωσης των μηχανισμών παραγωγής του ήχου αυτών των εγχόρδων οργάνων. Σε μια πρώτη φάση ανιχνεύονται όλοι οι παράγοντες που επιδρούν στον ήχο και κατ' επέκταση στο ηχόχρωμα του οργάνου (κυρίαρχα mode σώματος, ακόμη ειδικές επιδράσεις όπως παραδείγματος χάριν της πέννας στη νύξη των χορδών) και στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια επανασύνθεσης του ήχου αφού πρώτα έχει δημιουργηθεί το κατάλληλο μοντέλο σύνθεσης. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται στο τρίτο κεφάλαιο αυτής της μελέτης διεξήχθησαν με σειρά ακουστικών μετρήσεων πάνω στα σώματα του τουρκικού ουτιού και του λαούτου και αναγνωρίστηκαν τα πιο κυρίαρχα mode σώματος που είναι $f(1)=113$ Hz για το ούτι και $f(1)=144$ Hz για το λαούτο²⁴. Κλείνοντας αυτή την περιληπτική παρουσίαση της συγκεκριμένης εργασίας μπορούμε να αναφέρουμε επίσης τη συγκριτική μελέτη που παρουσιάζεται για την εκτέλεση ενός glissando από το ούτι και του λαούτο. Αναφέρεται ότι λόγω της διαφορετικής δομής των δύο οργάνων που προκύπτει από την ύπαρξη των τάστων (μπερντέδων) στην περίπτωση του λαούτου ανιχνεύεται και διαφορά κατά την εκτέλεση ενός glissando. Στο κεφαλαίο 3.3 της εν λόγω μελέτης παρουσιάζονται δύο σχετικά διαγράμματα για την κάθε περίπτωση του λαούτου και του ουτιού αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 23 σε κάθε διάγραμμα εμφανίζονται πάνω οι συχνότητες του glissando και από κάτω η ενέργεια που καταναλώνεται²⁵.



(Σχ.23)

Έτσι για το μεν λαούτο η ενέργεια έχει μια ανοδική τάση πάντα σε σχέση με τον χρόνο ενώ αντίθετα εξετάζοντας τα δεδομένα του διαγράμματος για το ούτι η ενέργεια εμφανίζει μια πτωτική τάση που καταλήγει σε μηδενισμό σχετικά γρήγορα.

²⁴ Βλ. Model-based synthesis of the Ud and the Renaissance Lute, κεφ.3.1Resynthesis of the Body Mode, σελ2.

²⁵ Βλ. Model-based synthesis of the Ud and the Renaissance Lute, κεφ.3.3Glissandi, σελ. 3-4.

Στην εργασία του Cumhur Erkut με τίτλο “Aspects in analysis and model-based sound of plucked string instruments” έχουμε επίσης αναφορά στο τούρκικο ούτι. Παρ’ όλο που και σε αυτή την εργασία κύριο θέμα αποτελεί η δημιουργία και η χρήση φυσικών μοντέλων, ταυτόχρονα παρουσιάζονται αποτελέσματα ακουστικών μετρήσεων για ορισμένα παραδοσιακά νυκτά έγχορδα μουσικά όργανα. Ανάμεσα σε αποτελέσματα για την κιθάρα, το λαούτο, το kantele και το tambur, συγκαταλέγεται και το τούρκικο ούτι. Τα δεδομένα που μας παρουσιάζει αναφέρονται στο κυρίαρχο mode δόνησης του εγκλεισμένου αέρα (αναφερόμενος στη συχνότητα Helmholtz) και στο κυρίαρχο mode δόνησης του καπακιού. Για το ούτι υπολογίστηκε στα 113 Hz η συχνότητα που συνδέεται με τον Helmholtz συντονισμό και στα 182 Hz η συχνότητα που συνδέεται με το χαμηλότερο κυρίαρχο mode του καπακιού²⁶[8].

Οι συγκεκριμένες εργασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω προσεγγίζουν το αντικείμενο της ακουστικής μελέτης του ουτιού με διαφορετικό τρόπο από την παρούσα μελέτη. Αυτές οι λιγοστές πηγές έχουν ως αντικείμενο μετρήσεις ολοκληρωμένων οργάνων λόγω του ότι έχουν στόχο να δημιουργήσουν ξανά με τη χρήση των μοντέλων τους ήχους των συγκεκριμένων μουσικών οργάνων. Σε άλλες εργασίες γίνεται αναφορά για τη χρήση μοντέλων με στόχο την επανασύνθεση-εξομοίωση ήχων από παραδοσιακά όργανα για τη δημιουργία των συνθεσάιζερ[15].

Τέλος μια ακόμη πηγή που έχει ως αντικείμενό της την ακουστική μελέτη του τουρκικού ουτιού αλλά με στόχο τη χρησιμοποίησή της στην κατασκευή του μουσικού οργάνου αποτελεί η έρευνα του Faruk Turunz. Στην έρευνά του που έχει δημοσιοποιήσει στο site του²⁷ καθώς και σε διάφορα συνέδρια αναφέρεται κυρίως στο καπάκι του ουτιού. Χρησιμοποιώντας τη λογική των κομβικών και αντίκομβικών σημείων στο καπάκι του οργάνου επιτυγχάνει σύμφωνα με την άποψή του το κούρδισμα των καμαριών και γενικότερα όλου του καπακιού. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί είναι η tap tone μέθοδος. Αυτή εφαρμόζει τόσο πάνω στο καπάκι (στα σημεία που θα τοποθετήσει τα καμάρια) όσο και στα καμάρια. Ο στόχος είναι η ανίχνευση των συχνοτήτων συντονισμού του καπακιού και των καμαριών και στη συνέχεια το “πάντρεμα” αυτών των συχνοτήτων σε κάθε σημείο σύζευξης του καπακιού με τα καμάρια[9]. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο ο ίδιος υποστηρίζει ότι “από τις μελέτες του μέσω πολυάριθμων πειραμάτων έχει

²⁶ Βλ. Aspects in analysis and model-based sound of plucked string instruments, κεφ.3.1 Acoustics of traditional plucked string instruments, σελ.24-25.

²⁷ Βλ. www.oudmaster.com, farukturunz@yahoo.com

ανακαλύψει μια φόρμουλα” ώστε να συνδυάζει τις δύο αυτές συχνότητες (καπακιού και καμαριών)²⁸. Όπως εύκολα γίνεται κατανοητό η έρευνά του αυτή χρήζει επιστημονικής τεκμηρίωσης στο σημείο όπου δεν μας παρουσιάζει τον ακριβή πειραματισμό του, ούτε τη μέθοδο που χρησιμοποιεί καθώς και στοιχεία για τον πειραματισμό του. Παρ’ όλα αυτά είναι η μοναδική αναφορά που έχουμε πάνω στη μελέτη του τρόπου δόνησης του καπακιού του ουτιού και από τις λίγες περιπτώσεις κατασκευαστών μουσικών οργάνων που αντιμετωπίζουν το ζήτημα από αυτή την οπτική γωνία.

Αφού ολοκληρώθηκε αυτή η περιληπτική παρουσίαση ερευνών και εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί για το τούρκικο ούτι, προκύπτει αναγκαία η παρουσίαση διάφορων μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς, με σκοπό την ανίχνευση του τρόπου δόνησης του καπακιού ενός έγχορδου μουσικού οργάνου. Στόχος είναι η χρησιμοποίηση τέτοιων μεθόδων στην περίπτωση του ουτιού όπως θα δούμε στο πειραματικό μέρος αυτής της εργασίας σε επόμενο κεφάλαιο.

3.3 Μέθοδοι μέτρησης για modal ανάλυση

Στο πέρασμα του χρόνου πολλές μέθοδοι μέτρησης έχουν χρησιμοποιηθεί για την modal ανάλυση²⁹ εγχόρδων μουσικών οργάνων όπως το βιολί και η κιθάρα. Η αντίδραση στις συχνότητες ενός οργάνου χαρακτηρίζεται ουσιαστικά από μια σειρά συντονισμών. Για να καθορίσουμε τη δονητική διάταξη του οργάνου σε καθέναν από τους μεγάλους του συντονισμούς, συνήθως το διεγείρουμε ημιτονοειδώς, σε ένα η περισσότερα σημεία και η κίνηση του παρατηρείται οπτικά, ακουστικά, ηλεκτρικά η μηχανικά³⁰. Ο στόχος μας είναι να μελετήσουμε την αντίδραση του κάθε οργάνου στις διάφορες συχνότητες και να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για τον τρόπο λειτουργίας του αλλά και για μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή του.

Οι τεχνικές οπτικής παρακολούθησης συμπεριλαμβάνουν την ολογραφική συμβολομετρία (holographic interferometer)[16] καθώς επίσης και μετρητές

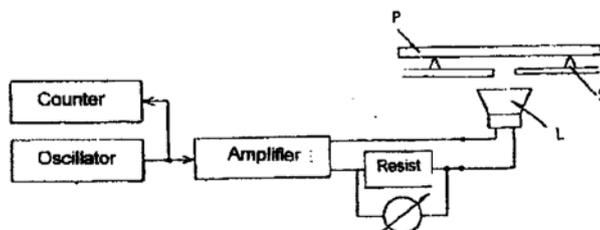
²⁸ βλ. www.oudmaster.com, farukturunz@yahoo.com

²⁹ Modal ανάλυση καλείται η ανάλυση των modes δόνησης του σώματος ενός έγχορδου μουσικού οργάνου. Αναφερόμαστε τόσο στα modes δόνησης του καπακιού όσο του αέρα και του πίσω καπακιού (πλάτη) όπου αυτά υφίστανται (π.χ. στην κιθάρα και στο βιολί).

³⁰ Βλ. H. Fletcher, Thomas D. Rossing, *The Physics of Musical instruments*, κεφ. 9.7 Resonances of a guitar Body, σελ. 251.

ταχύτητας με λέιζερ (laser velocimetry)[17]. Τεχνικές ακουστικής ανίχνευσης συμπεριλαμβάνουν τη χρήση μιας διάταξης μικροφώνων[18] καθώς και την σάρωση με ένα μικρόφωνο[19]. Η παρατήρηση της κίνησης ηλεκτρικά πραγματοποιείται με τη βοήθεια μιας ηλεκτρικής συσκευής εγγραφής η οποία καταγράφει τις μεταβολές της χωρητικότητας του οργάνου καθώς αυτό δονείται. Η παρατήρηση της κίνησης μηχανικά γίνεται με την χρήση μιας μηχανική συσκευής εγγραφής που αποτελείται άλλοτε από ένα επιταχυνσιόμετρο (accelerometer) και άλλοτε από ένα μετατροπέα ταχύτητας (velocity transducer) μικρής μάζας³¹.

Προτού αναλύσουμε περισσότερο τις τεχνικές ανίχνευσης που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των έγχορδων μουσικών οργάνων, πρέπει να αναφερθούμε στις μεθόδους διέγερσης των οργάνων που βρίσκονται στο επίκεντρο της μελέτης. Οι δύο τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι αυτή που στηρίζεται στην ακουστική διέγερση και αυτή που στηρίζεται στη μηχανική διέγερση[20]. Η πρώτη τεχνική (αυτή της ακουστικής διέγερσης) αποτελεί την αρχική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε από τους μελετητές. Εφαρμόστηκε κυρίως σε ελεύθερα³² καπάκια βιολιών. Σε αυτή την τεχνική χρησιμοποιείται ένα ηχείο το οποίο τοποθετείται σταθερά σε έναν πάγκο. Το καπάκι του οργάνου αιωρείται πάνω από το ηχείο στερεωμένο σε μικρά υποστήριγμα (Σχ.24).



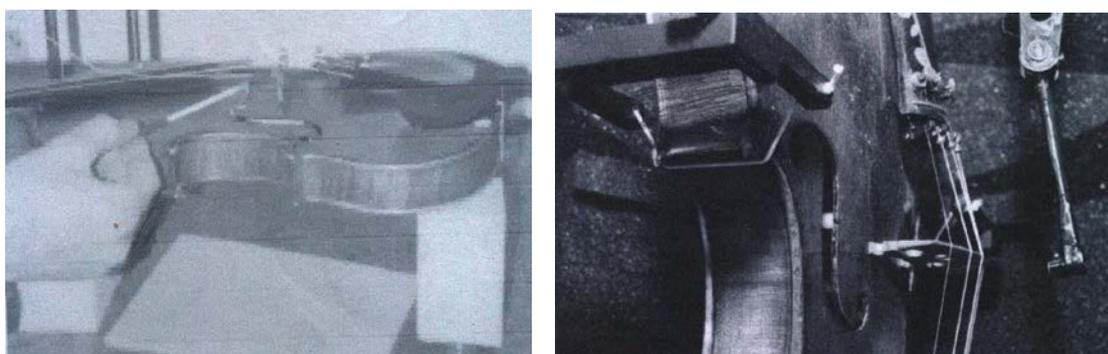
(Σχ. 24)

Μια γεννήτρια συχνοτήτων εκπέμπει μέσω του ηχείου συχνότητες οι οποίες οδηγούνται στο καπάκι και προκαλούν τη διέγερσή του[4]. Η δεύτερη τεχνική στηρίζεται στη μηχανική διέγερση του καπακιού με τη χρήση ενός σφυριού. Η κρούση του σφυριού πάνω στο καπάκι είναι αυτή που διεγείρει το όργανο ώστε να δονηθεί. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως σε όργανα συναρμολογημένα. Η

³¹ Βλ. H. Neville Fletcher, Thomas D. Rossing, The Physics of Musical instruments, κεφ. 9.7 Resonances of a guitar Body, σελ. 252

³² Δηλαδή σε καπάκια έτοιμα αλλά πριν κολληθούν στο σκάφος του οργάνου.

κίνηση του σφυριού γίνεται δια χειρός, πράγμα που προκαλεί πολλά προβλήματα (όπως το κατά πόσο ο χτύπος επιτυγχάνεται στο ίδιο σημείο κάθε φορά ή πόση είναι η δύναμη που κινεί το σφυρί) και πιο συχνά με αυτόματο μηχανισμό χτυπήματος (Σχ. 25) [21].



(Σχ.25)

Οι επιστημονικές μετρήσεις των δονητικών ιδιοτήτων του βιολιού ξεκίνησαν στις αρχές του 18^{ου} αιώνα (1840) όταν ο Felix Savart³³ άρχισε να παρατηρεί τα πρότυπα Chaldni, (καλυμμένα με σκόνη πάνω και πίσω καπάκια βιολιού, διεγερμένα σε διαφορετικά μέρη για να διεγερθούν διαφορετικά φυσικά modes)³⁴. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας σχεδιάστηκαν τα κατάλληλα ηχεία, οι ηχητικές γεννήτριες και οι ενισχυτές που επαρκούσαν ώστε να διεγείρουν τα καπάκια των οργάνων που μελετούνταν, με αποτέλεσμα η τεχνική των προτύπων Chaldni να επανέλθει με μια μοντέρνα εκδοχή στο δεύτερο μέρος του 20^{ου} αιώνα[20]. Μέχρι το 1981 οι συχνότητες συντονισμού και τα σχήματα mode που κατακτήθηκαν από την τεχνική των προτύπων Chaldni ήταν επαρκώς κατανοητά και διάσημα από την Hutchins³⁵. Ταυτόχρονα σημειώνεται η άφιξη των λείζερ που σε συνδυασμό με τις τεχνικές της ολογραφίας προσέδωσαν νέα δεδομένα στις μελέτες των ελεύθερων καπακιών καθώς και τη δυνατότητα παροχής πληροφοριών για τα δονητικά modes συναρμολογημένων πλέον οργάνων. Ο Jansson E. το 1971 ήταν ο πρώτος που

³³ Για περισσότερα βλ. Savart, F. "On Musical Instruments" L' Institut, 8 (1840), reprinted translated portions in Musical Acoustics Part 2.

³⁴ Για περισσότερα βλ. Joe Wolfe, Chaldni patterns for violin plates, <http://wwwphys.unsw.edu.au/~jw/chaldni.html>.

³⁵ G. Bissinger, *Modern vibration measurement techniques for bowed instruments*, Feature, testing of Acoustic Stringed Musical Instruments: Part 4, Experimental techniques, July/August 2001, κεφ. Chaldni or nodal line patterns, σελ. 43-44.

δημοσίευσε ολογραφήματα κάποιων από τα modes του καπακιού της κιθάρας[22]. Ενώ ένα χρόνο πριν το 1970 ο ίδιος δημοσίευσε ένα άρθρο σχετικά με την ολογραφική συμβολομετρία στο σώμα του βιολιού[23]. Ο Mollar, J.A και ο Jansson, E το 1982 οπτικοποίησαν τα modes του σώματος τεσσάρων βιολιών χρησιμοποιώντας μια TV ολογραφήματος[24]. Ενώ ο Meyer την ίδια χρονιά ήταν ο πρώτος που παρείχε πειραματικά αποτελέσματα που έδειχναν ότι οι χαμηλότερες συχνότητες συντονισμού στην αντίδραση της κιθάρας οφείλονται στο ταίριασμα των θεμελιωδών modes του καπακιού και του αέρα μέσα στο σώμα του οργάνου[25]. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν εφαρμόζοντας την μέθοδο ακουστικής ανίχνευσης χρησιμοποιώντας μια διάταξη έξι μικροφώνων³⁶. Ο Muller το 1984 μαζί με τον Geissler, P. δημοσίευσαν μια modal ανάλυση για την οικογένεια του βιολιού[26]. Το 1985 ο Marshall, K.D πραγματοποίησε και δημοσίευσε μια ολοκληρωμένη ανάλυση modal ενός βιολιού[27].

Χρήσιμη προκύπτει σε αυτό το σημείο η αναλυτικότερη παρουσίαση των τεχνικών μέτρησης που έχουν εφαρμοστεί στην modal ανάλυση των μουσικών οργάνων. Από τη βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε δεν ήταν δυνατόν να αντλήσουμε επαρκή στοιχεία για τη μέθοδο της ηλεκτρικής παρατήρησης. Για το λόγο αυτό θα εστιάσουμε κυρίως στις μεθόδους της οπτικής, της ακουστικής και της μηχανικής παρατήρησης.

Η οπτική παρακολούθηση στηρίζεται στο γεγονός ότι το αποτέλεσμα που θα προκύψει είναι οπτικοποιημένο. Δηλαδή μπορούμε να το δούμε είτε ζωντανά είτε ως φωτογραφικό υλικό είτε στην οθόνη ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η πρώτη και πιο απλή (και οικονομική) μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε πρώτα από τον Chaldni και αργότερα από την Hutchins είναι η μέθοδος της οπτικοποίησης των modes δόνησης του καπακιού ενός έγχορδου οργάνου με σκόνη πούδρας, τσαγιού ή οποιουδήποτε άλλου παρόμοιας φύσης υλικού με τα προαναφερθέντα. Τα καπάκια προς έρευνα καλύπτονται με πούδρα ή τσάι σε όλη την επιφάνειά τους. Είτε μηχανικά δηλαδή χτυπώντας το καπάκι είτε ακουστικά με τη χρήση μιας ηχητικής γεννήτριας και ενός ηχείου το καπάκι διεγείρεται ώστε το τσάι να επιδοθεί σε διάφορους σχηματισμούς. Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατόν να καταγραφούν η συχνότητα συντονισμού, καθώς και τα σχήματα mode του καπακιού που έχουν δημιουργηθεί από τον σχηματισμό του τσαγιού. Τα σημεία που συγκεντρώνουν τσάι αποτελούν τα κομβικά σημεία πάνω στο

³⁶ Βλ. Howard Wright, THE ACOUSTICS AND PSYCHOACOUSTICS OF THE GUITAR. κεφ. 2.2 Coupling between top plate and air cavity.σελ. 25.

καπάκι, δηλαδή τα σημεία στα οποία παρατηρήθηκε ελάχιστη ή μηδενική κίνηση. Τα σημεία τα οποία έχουν αδειάσει από το τσάι αποτελούν τα αντί-κομβικά σημεία, δηλαδή τα σημάδια που παρατηρήθηκε ορισμένη ή επαρκής κίνηση στο καπάκι. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μπορούν να φωτογραφηθούν ώστε να αποτελέσουν τα ολογραφήματα των modes δόνησης του καπακιού ή να βιντεοσκοπηθούν ζωντανά με τη χρήση κάμερας. Η μέθοδος αυτή πραγματοποιήθηκε από την Hutchins με τη χρήση μιας ηχητικής γεννήτριας η οποία ήταν συνδεδεμένη με ένα μετρητή συχνοτήτων (ώστε να της δείχνει την συχνότητα που εξέπεμπε η γεννήτρια), με έναν ενισχυτή (ώστε να της ενισχύει το ασθενές σήμα που εξέπεμπε η γεννήτρια) και με ένα επιτραπέζιο ηχείο[28]. Η έρευνα της αφορούσε ελεύθερα καπάκια τα οποία κάλυπτε με πούδρα και τα τοποθετούσε πάνω από το ηχείο αφού τα στήριζε με μικρά υποστηρίγματα³⁷. Σημαντικό ρόλο σε αυτή τη μέθοδο όπως και στις υπόλοιπες που θα δούμε παρακάτω παίζει ο τρόπος στήριξης του προς μελέτη καπακιού. Τόσο από την πλευρά του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για τη στήριξη, όσο κυρίως από τα σημεία στήριξης που θα επιλεγούν. Ο τρόπος που επιλέχθηκε από την Hutchins για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου ήταν υποστηρίγματα αφρού ή λαστιχένια και στήριξη σε κομβικά σημεία πάνω στο καπάκι.

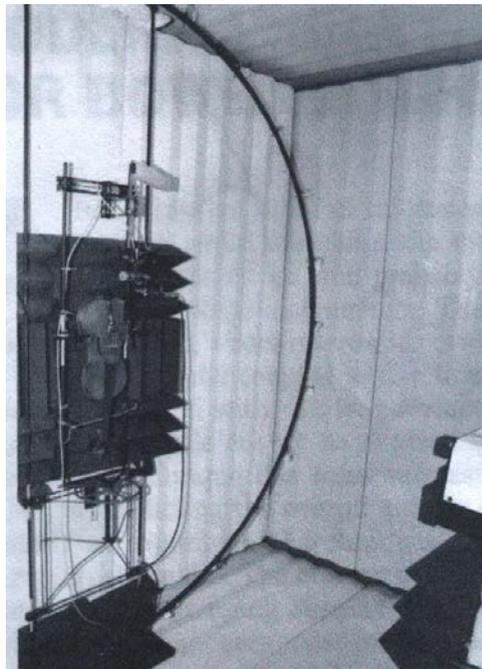
Στις οπτικές μεθόδους παρατήρησης των modes δόνησης του καπακιού εντάσσεται και η ολογραφική συμβολομετρία με χρήση λέιζερ. Στη μέθοδο αυτή το όργανο διεγείρετε μηχανικά σε διάφορα σημεία και σαρώνεται η επιφάνεια του καπακιού με το λέιζερ. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι δυνατόν να φωτογραφηθούν ώστε να εμφανιστούν τα ολογραφήματα. Η ηλεκτρονική TV ολογραφία προσφέρει έναν εύχρηστο τρόπο για να δούμε τα σχήματα modes του καπακιού σε πραγματικό χρόνο και να τα καταγράψουμε³⁸. Σε αυτήν την τεχνική χρησιμοποιείται μια κάμερα για να καταγράψει τις εικόνες του φωτισμένου με λέιζερ αντικειμένου. Ένας συνδεδεμένος ηλεκτρονικός επεξεργαστής εικόνας δημιουργεί ολογραφήματα τα οποία μπορούν να προβληθούν σε μια οθόνη³⁹(Σχ.26). Αποφεύγεται με αυτή τη μέθοδο η δυσχέρεια στην επεξεργασία του φωτογραφικού φιλμ προκειμένου να προβληθεί το ολογράφημα[29]. Αυτή η μέθοδος καταγράφει την τοποθεσία των κομβικών γραμμών με μεγάλη ακρίβεια και επίσης παρέχει ένα είδος

³⁷ Βλ. Chris Johnson and Roy Courtinall, The art of violin making, κεφ. 12 Plate Tuning, σελ.154.

³⁸ Βλ. H. Neville Fletcher, Thomas D. Rossing, The Physics of Musical instruments κεφ. 10.5.1 Experimental Methods for Modal Analysis, σελ. 290.

³⁹ Για περισσότερα βλ. Stetson (1990) καθώς και Jansson (1994)

περιφερειακού οδηγού εκτοπίσματος του εύρους δόνησης στις antinodal περιοχές⁴⁰. Κάτι ανάλογο μπορούμε να παρατηρήσουμε και στη μέθοδο με τα καλυμμένα καπάκια με πούδρα. Δηλαδή ένα σχετικό εύρος δόνησης στις antinodal περιοχές (περιοχές με σχετική έως έντονη κίνηση) υπολογίζεται από το ύψος της σκόνης όταν αναπηδάει⁴¹. Το μειονέκτημα της μεθόδου με λέιζερ πηγάζει από την αναγκαστική σταθεροποίηση του οργάνου. Το ότι πρέπει δηλαδή να συσφιχτεί σε δύο η περισσότερα σημεία είναι δυνατόν να επηρεάζει τα modes δόνησης του καπακιού και ολόκληρου του οργάνου.



(Σχ. 26)

Η μέθοδος της ακουστικής παρατήρησης ουσιαστικά είναι μια τεχνική άμεσης αντίδρασης της αντίδρασης του οργάνου στις διάφορες συχνότητες. Δηλαδή καταγράφεται η άμεση παρατήρηση του πεδίου του εκπεμπόμενου ήχου. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιείται είτε ένα μικρόφωνο είτε μια διάταξη μικροφώνων για τη σάρωση του κοντινού πεδίου του ήχου. Διεγείροντας επίσης είτε ακουστικά είτε μηχανικά το προς μελέτη όργανο και σαρώνοντας το πεδίο του εκπεμπόμενου ήχου κοντά σε δονητικές επιφάνειες με το μικρόφωνο, μετράται η αντίδραση της πίεσης

⁴⁰ Βλ. H. Neville Fletcher, Thomas D. Rossing, *The Physics of Musical instruments*, κεφ. 10.5.1 Experimental Methods for Modal Analysis, σελ. 290.

⁴¹ Βλ. Chris Johnson and Roy Courtinall, *The art of violin making*, κεφ. 12 Plate Tuning, σελ.154.

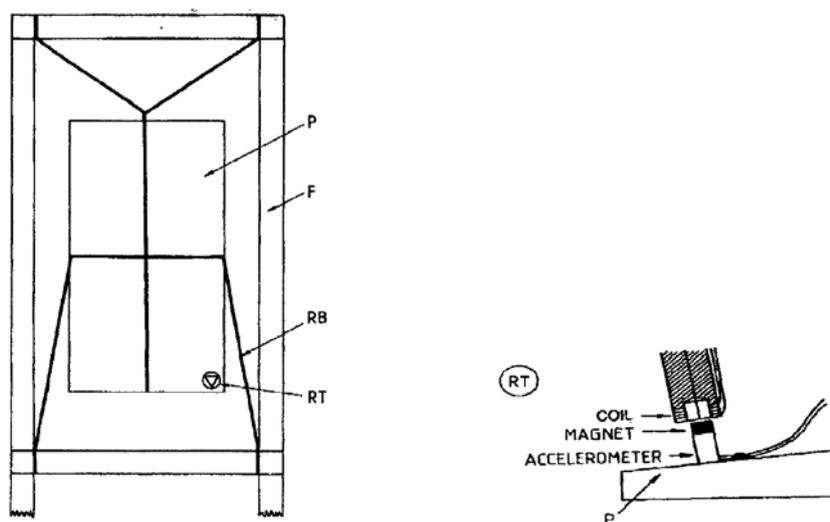
του ήχου⁴². Ο Meyer χρησιμοποίησε τη μέθοδο αυτή προκειμένου να δείξει τον συσχετισμό της δόνησης του εγκλεισμένου αέρα με τα modes δόνησης του καπακιού της κιθάρας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένα δωμάτιο χωρίς ηχώ, χρησιμοποιώντας μια διάταξη έξι μικροφώνων με την κιθάρα να οδηγείται (δηλαδή να διεγείρεται) στο κέντρο του καβαλάρη. Στην προσπάθειά του να απομονώσει το σώμα της κιθάρας από τους συντονισμούς του αέρα γέμισε το σώμα με κύβους αφρού. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι ο χαμηλότερος συντονισμός της κιθάρας εξαφανίστηκε ενώ ο δεύτερος χαμηλότερος συντονισμός μειώθηκε ελάχιστα. Για την απομόνωση του σώματος της κιθάρας, βύθισε την κιθάρα σε άμμο έτσι ώστε να ακινητοποιήσει το αντηχείο και το καπάκι και να αποτραπεί η δόνηση τους. Η αντίδραση του οργάνου τότε έδειξε μόνο τον χαμηλότερο συντονισμό να παραμένει σε λίγο υψηλότερη συχνότητα απ' ότι όταν το σώμα ήταν ελεύθερο να δονείται. Στη συνέχεια ελευθέρωσε το πάνω καπάκι και η αντίδραση έδειξε ότι και η χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού και οι άλλες συχνότητες ήταν περίπου ίδιες όπως στην περίπτωση που όλο το σώμα της κιθάρας ήταν ελεύθερο να δονείται[25]. Ο Jansson το 1971 χρησιμοποίησε την ίδια μέθοδο για τις αντιδράσεις της πίεσης του ήχου της κιθάρας. Σε αυτή την έρευνα πραγματοποίησε μετρήσεις χρησιμοποιώντας μια ποικιλία οδηγητικών θέσεων και με ποικιλία μικροφωνικών θέσεων στο πάνω καπάκι της κιθάρας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είχαν διαφορές μεταξύ τους πράγμα που υπογραμμίζει τη σπουδαιότητα των προσεκτικά διαλεγμένων θέσεων του οδηγητή και του μικροφώνου[22]. Τίθεται βέβαια στο σημείο αυτό ένα πολύ σημαντικό θέμα για το οποίο θα κάνουμε λόγο παρακάτω.

Κλείνοντας την αναλυτική παρουσίαση των μεθόδων μέτρησης που έχουν χρησιμοποιηθεί στην modal ανάλυση πρέπει να αναφέρουμε τη μέθοδο της μηχανικής παρατήρησης. Στην τεχνική αυτή εφαρμόζεται μηχανική διέγερση με την κρούση σφυριού πάνω στο όργανο και σάρωση της δονητικής επιφάνειας με ένα πολύ μικρό επιταχυνσιόμετρο σχεδόν μηδενικής μάζας⁴³(Σχ. 27). Στη δοκιμή modal με κρουστική διέγερση και μηχανική παρατήρηση, ένα επιταχυνσιόμετρο προσκολλάται

⁴² Βλ. H. Neville Fletcher, Thomas D. Rossing, *The Physics of Musical instruments*, κεφ. 10.5.1 *Experimental Methods for Modal Analysis*, σελ. 291.

⁴³ G. Bissinger, *Modern vibration measurement techniques for bowed instruments*, Feature, *testing of Acoustic Stringed Musical Instruments: Part 4, Experimental techniques*, July/August 2001, κεφ. Chaldni or nodal line patterns, σελ. 43-44.

στο όργανο σε κάποιο σημείο κλειδί και το όργανο οδηγείται σε έναν αριθμό σημείων με ένα σφυρί(λαιμό, γέφυρα και ταστιέρα).



(Σχ. 27)

Ο Marshall το 1985 εφάρμοσε αυτή τη μέθοδο σε ένα βιολί. Το όργανο διεγέρθηκε χρησιμοποιώντας ένα κρουστικό σφυρί με λαστιχένια μύτη μέτριας σκληρότητας, το οποίο βρέθηκε να δίνει μια ομοιόμορφη κατανομή ενέργειας μεταξύ 10 Hz και 1800 Hz. Ένα επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιήθηκε για να μετρήσει τις δονήσεις του σώματος. Τα σήματα από το σφυρί και το επιταχυνσιόμετρο μεταφέρθηκαν σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή και κρατήθηκαν για αποθήκευση και ανάλυση. Το βιολί ήταν κρεμασμένο χρησιμοποιώντας λαστιχένιες μπάρες προσκολλημένες σε ένα μεταλλικό πλαίσιο[27]. Και σε αυτή τη μέθοδο πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η θέση οδήγησης του οργάνου και η θέση τοποθέτησης του επιταχυνσιόμετρο. Η θέση του καβαλάρη σε ένα όργανο αποτελεί το κύριο σημείο εισόδου της ενέργειας της χορδής προς το σώμα του οργάνου. Επιπρόσθετα τα modes δόνησης που δεν μπορούν να οδηγηθούν (διεγερθούν) από τη γέφυρα δεν είναι τόσο μεγάλης σπουδαιότητας⁴⁴. Όπως είναι αντιληπτό λοιπόν η γέφυρα καθίσταται ένα εμφανές οδηγητικό σημείο. Παρ' όλα αυτά το σημείο της γέφυρας είναι ένα ευαίσθητο σημείο στο φόρτωμα μάζας. Οπότε οποιαδήποτε τεχνική που προϋποθέτει φόρτωμα μάζας στο σημείο αυτό χρήσιμο είναι να αποφεύγεται. Ταυτόχρονα πολύ σημαντική είναι η επιλογή των

⁴⁴ G. Bissinger, *Modern vibration measurement techniques for bowed instruments*, Feature, testing of Acoustic Stringed Musical Instruments: Part 4, Experimental techniques, July/August 2001, κεφ. Chaldni or nodal line patterns, σελ. 43-44.

σημείων ανίχνευσης καθώς και του τρόπου σταθεροποίησης του οργάνου που μελετάται. Ο Jansson πραγματοποίησε μια μελέτη σχετικά με τη σύγκριση τριών διαφορετικών συστημάτων για την εφαρμογή ημητονοειδούς διέγερσης καθώς και τριών διαφορετικών τρόπων για τη στήριξη του οργάνου κατά την διάρκεια δοκιμής (κρεμασμένα σε λαστιχένιες ταινίες, να σφίγγονται χαλαρά στο λαιμό, να σφίγγονται στο λαιμό και να υποστηρίζονται στο άκρο του σώματος)[30]. Είναι απαραίτητο να τονίσουμε ότι όλες οι πειραματικές μέθοδοι που προαναφέρθηκαν έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η πιο αποδοτική πρακτική για την modal ανάλυση των δονήσεων του σώματος του οργάνου είναι η εφαρμογή συνδυασμού δύο η περισσότερων τεχνικών στο ίδιο όργανο⁴⁵, ώστε να προκύπτει όφελος από τα αθροιστικά πλεονεκτήματα και να περιορίζονται μέσω αλληλοσυμπλήρωσης τα μειονεκτήματα.

⁴⁵ Βλ. H. Neville Fletcher, Thomas D. Rossing, The Physics of Musical instruments, κεφ. 10.5.1 Experimental Methods for Modal Analysis, σελ. 291.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ MODES ΔΟΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΚΙΟΥ.

4.1 ΓΕΝΙΚΑ.

Το κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο στο πειραματικό κομμάτι αυτής της εργασίας. Ο στόχος του συγκεκριμένου πειραματισμού είναι η modal ανάλυση στο καπάκι του ουτιού. Ταυτόχρονα ο σκοπός της γενικότερης αναζήτησης είναι η σύνδεση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την πειραματική μελέτη, με την κατασκευή του ουτιού και πιο συγκεκριμένα με την επιλογή του οπλισμού των καμαριών. Επιπρόσθετα με το πειραματικό αυτό μέρος δίνεται η ευκαιρία να φανούν στην πράξη όλα αυτά για τα οποία έχει γίνει λόγος στην υπόλοιπη εργασία. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε σε αυτόν τον πειραματισμό για την ανάλυση στο καπάκι του ουτιού είναι η τεχνική της οπτικής παρατήρησης, με τη χρήση μιας γεννήτριας συχνοτήτων και ενός ηχείου. Η επιλογή της συγκεκριμένης τεχνικής για την πραγματοποίηση αυτού του πειράματος έγινε για διάφορους λόγους. Καταρχήν είναι μια μέθοδος με χαμηλό κόστος σε σχέση με τον τεχνολογικό εξοπλισμό που απαιτείται για τις υπόλοιπες τεχνικές. Επίσης αποτελεί μια αρκετά εύχρηστη μέθοδο που δεν απαιτεί ιδιαίτερες γνώσεις όπως για παράδειγμα η χρήση της τεχνικής με λέιζερ. Τέλος η τεχνική αυτή αποτελεί μια μέθοδο σχετικά απλή και πιο κατάλληλη ως αφετηρία ενός γενικότερου πειραματισμού πάνω στο συγκεκριμένο θέμα. Στο σημείο αυτό χρήσιμο είναι να τονιστεί ότι στην πράξη η εφαρμογή μιας μεθόδου δεν είναι και τόσο απλή όσο αυτή παρουσιάζεται στις πηγές. Κατά την διαδικασία εφαρμογής της συγκεκριμένης τεχνικής προέκυψαν ορισμένα προβλήματα τα οποία χρειάστηκαν απαραίτητα λύσεις ούτως ώστε να προχωρήσει η πειραματική διαδικασία. Θα επιστρέψουμε σε αυτό αφού πρώτα γίνει η παρουσίαση της μεθόδου και των συσκευών που χρειάστηκαν για την πραγματοποίηση του πειράματος.

4.2 Μέθοδος και συσκευές.

Στην πειραματική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν μια γεννήτρια συχνοτήτων, ένα ηχείο, μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, ένα υγρόμετρο κι ένα θερμόμετρο. Η γεννήτρια συχνοτήτων όπως είναι φανερό από το όνομα της αποτέλεσε την συσκευή για την ημιτονοειδή διέγερση του καπακιού του ουτιού. Η συγκεκριμένη γεννήτρια (Σχ. 28) έχει την δυνατότητα ρύθμισης των συχνοτήτων που παράγει χωρίς να χρειάζεται εξωτερικό συχνόμετρο καθώς και τη δυνατότητα μεταβολής της έντασης με την οποία εξάγει μια συχνότητα. Ουσιαστικά έχει ένα ενσωματωμένο συχνόμετρο, ένα βολτόμετρο που μετράει την τάση του σήματος και ένα αμπερόμετρο που μετράει την ένταση. Το εύρος των συχνοτήτων που είναι σε θέση να παράγει η γεννήτρια κυμαίνεται από 60 Hz μέχρι 2200 Hz. Επίσης παρέχει την δυνατότητα της μεταβολής της έντασης σε τιμές που κυμαίνονται από 1 A μέχρι 5 A. Η τάση ρυθμίζεται αυτόματα. Η γεννήτρια συνδέθηκε με ένα ηχείο τύπου οβάλ τριών δρόμων και ισχύος 30 W. Η γεννήτρια συχνοτήτων συνδεδεμένη με το ηχείο αποτέλεσαν ένα επαρκές σύστημα για τη διέγερση του καπακιού.



(Σχ. 28)

Το ούτι κατά τη διαδικασία του πειράματος ακινητοποιήθηκε πάνω σε έναν σταθερό πάγκο. Πρέπει να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι το καπάκι μετρήθηκε στερεωμένο πάνω στο σκάφος του οργάνου. Στερεώθηκε με κόλλα περιμετρικά του σκάφους και χρησιμοποιήθηκε ταινία διπλής όψης στα σημεία επαφής του καπακιού με τους ντάκους (πάνω και κάτω). Επίσης ήταν ελεύθερο χωρίς υποστηρίγματα-καμάρια τοποθετημένα στην εσωτερική επιφάνεια του. Η οριζόντια θέση στην οποία βρισκόταν μετρήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε το καπάκι του οργάνου να είναι ακριβώς

παράλληλο με την επιφάνεια του πάγκου και κατά συνέπεια με το δάπεδο. Τα δύο μέρη που ερχόταν σε επαφή με δύο λαστιχένια υποστηρίγματα ήταν η πλάτη του οργάνου και το τελειώμά του κεφαλιού.

Το πρώτο πρόβλημα που προέκυψε ήταν ο τρόπος σταθεροποίησης του ηχείου πάνω από το καπάκι. Για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκε μια αυτοσχέδια βάση τύπου (Π) που πρόσφερε την δυνατότητα μετακίνησης του ηχείου σε διάφορα σημεία πάνω από το καπάκι και ταυτόχρονα επέτρεπε τη διατήρηση σταθερής απόστασης μεταξύ του ηχείου και της επιφάνειας του καπακιού. Το ηχείο προσαρμόστηκε πάνω σε αυτή τη βάση με τη μεμβράνη του να έχει κατεύθυνση προς το καπάκι.

Αρχικά απλώθηκε τριμμένο τσάι σε ολόκληρη την επιφάνεια του καπακιού με όσο το δυνατόν ομοιόμορφη κατανομή τσαγιού σε όλα τα σημεία πάνω στο καπάκι. Όταν το καπάκι διεγέρθηκε το τσάι δημιούργησε διάφορους σχηματισμούς. Μετά από καθεμία διέγερση χρησιμοποιήθηκε μια ψηφιακή μηχανή ώστε να αποτυπωθούν τα αποτελέσματα. Ένα πρόβλημα που προέκυψε ανάμεσα στην κάθε μέτρηση ήταν ότι το όργανο έπρεπε να καθαρίζεται από το τσάι (λόγω του ότι το τσάι έπεφτε κάτω ή μέσα στο όργανο) και να επικαλύπτεται ξανά. Η λύση που δόθηκε ήταν μεγαλύτερη ποσότητα τσαγιού ώστε η διαδικασία αυτή να ελαχιστοποιηθεί. Το τσάι που είχε μείνει πάνω στο καπάκι απλωνόταν ξανά και γινόταν κάθε φορά προσθήκη λίγης ακόμα ποσότητας. Ταυτόχρονα μια επιπλέον δυσκολία παρουσιάστηκε στο τρόπο στήριξης της ψηφιακής μηχανής. Το εμπόδιο αυτό προσπεράστηκε χρησιμοποιώντας ένα τρίποδο. Μια αυτοσχέδια δοκός κατασκευάστηκε και προσαρμόστηκε πάνω στο τρίποδο. Η ψηφιακή μηχανή στερεώθηκε πάνω στην δοκό και σταθεροποιήθηκε έτσι ώστε να σχηματίζει κάθετη γωνία με το δάπεδο. Τα αποτελέσματα από τα πειράματα φωτογραφήθηκαν με την ψηφιακή μηχανή και στη συνέχεια μεταφέρθηκαν σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για επεξεργασία και φύλαξη. Χρησιμοποιώντας το Photo shop οι φωτογραφίες μετατράπηκαν σε ασπρόμαυρες και στη συνέχεια τροποποιήθηκαν σε αρνητική μορφή, έτσι ώστε τα μαύρα σημεία πάνω στο καπάκι να φαίνονται άσπρα και αντίστοιχα τα άσπρα να φαίνονται μαύρα. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ένα χώρο χωρίς ηχώ. Χρήσιμο είναι στο σημείο αυτό να παρουσιάσουμε ορισμένα πειραματικά δεδομένα.

Το ούτι που χρησιμοποιήθηκε έχει διαστάσεις καπακιού: μήκος 47 εκατοστά, μέγιστο πλάτος 36.5 εκατοστά. Το πάχος του καπακιού είναι 1.9 χιλιοστά. Η μεγάλη οπή στο καπάκι έχει διάμετρο 8.5 εκατοστά και οι δύο μικρές 4 εκατοστά. Το καπάκι κρίνεται ιδιαίτερα ευλύγιστο με σχετικά αραιά νερά. Το μέγιστο ύψος του σκάφους

είναι 18.5 εκατοστά. Πρέπει να σημειωθεί ότι το καπάκι μετρήθηκε αρχικά χωρίς ροζέτες και χωρίς καβαλάρη. Σε πρώτη φάση οδηγήθηκε (διεγέρθηκε) στο σημείο του καβαλάρη και στην συνέχεια λίγο κάτω από τις δύο μικρές οπές. Έπειτα στερεώθηκαν με κόλλα οι τρεις ροζέτες εσωτερικά των οπών και ο καβαλάρης στην πραγματική του θέση και πραγματοποιήθηκαν τα ανάλογα πειράματα. Στο χώρο η θερμοκρασία βρέθηκε να κυμαίνεται μεταξύ 28 C^o και 30 C^o και το ποσοστό υγρασίας μετρήθηκε μεταξύ 29% και 31%. Τα δεδομένα αυτά είναι σε θέση να μας δείξουν την ελάχιστη επίδραση της θερμοκρασίας και του ποσοστού υγρασίας κατά την διάρκεια των πειραμάτων.

4.3 Πειραματικά αποτελέσματα.

Τα αριθμητικά δεδομένα που προέκυψαν από τα πειράματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 1. Επιλεγμένες συνθήκες διέγερσης

A/A	U (V)	I (A)	P(W)	F(Hz)
α1	15	2	30	82
α2	10	2.5	25	110
α3	10	2.5	25	115
α4	10	2.6	26	123
α5	9	3.3	29.7	140
α6	20	2.1	42	165
α7	10	3.5	35	185
α8	15	2.6	39	220
α9	12	3.6	43.2	260
α10	16	3.2	51.2	294
α11	11	3.6	39.6	300
α12	8	3.5	28	320
α13	20	3.2	64	440
α14	8	3.7	29.6	460
α15	20	3.3	66	525

Πίνακας 2

A/A	U (V)	I (A)	P(W)	F(Hz)
β1	15	2.5	37.5	82
β2	15	2.6	39	110
β3	2	1	2	115
β4	10	2.3	23	123
β5	15	2.7	40.5	140
β6	8	1.6	12.8	165
β7	6	1.5	9	185
β8	15	2.2	33	220
β9	20	2.6	52	260
β10	20	2.8	56	294
β11	20	2.8	56	300
β12	20	2.8	56	320
β13	12	1.8	21.6	440
β14	10	1.8	18	460
β15	12	3.5	42	525

Πίνακας 3.

A/A	U (V)	I (A)	P(W)	F(Hz)
γ1	7	1.6	11.2	82
γ2	16	2.6	41.6	110
γ3	14	2.4	33.6	115
γ4	10	2	20	123
γ5	7	1.6	11.2	140
γ6	12	2	24	165
γ7	11	2	22	185
γ8	13	2.2	28.6	220
γ9	15	2.4	36	260
γ10	18	2.5	45	294

γ_{11}	18	2.6	46.8	320
γ_{12}	19	2.5	47.5	440

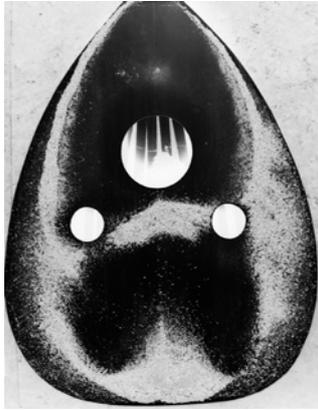
Στους πίνακες 1, 2 και 3 U είναι η τάση που δημιουργεί η γεννήτρια σε Volt, I είναι η ένταση του ηλεκτρικού σήματος που προσδίδει η γεννήτρια σε Ampere, P η υπολογιζόμενη ισχύς σε Watts και F η συχνότητα σε Hertz. Τα δεδομένα της τρίτης στήλης που αντιστοιχούν στην προκύπτουσα ισχύ υπολογίζονται βάσει του τύπου:

$$P=U*I \quad (7)$$

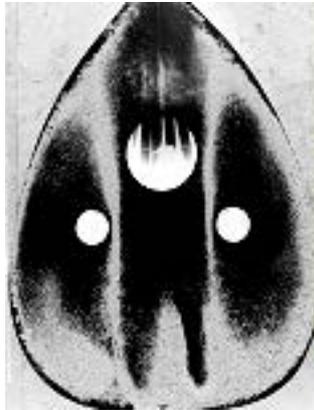
Τα στοιχεία του πίνακα 1 αντιστοιχούν στα πειράματα με διέγερση στο σημείο του καβαλάρη και χωρίς ροζέτες και καβαλάρη στερεωμένα στο καπάκι. Αυτά του πίνακα 2 αντιστοιχούν στα πειράματα με διέγερση στο σημείο λίγο κάτω από τις δύο μικρές οπές στο καπάκι επίσης χωρίς ροζέτες και καβαλάρη πάνω στο καπάκι και τα στοιχεία του πίνακα 3 αντιστοιχούν στα πειράματα με διέγερση στον καβαλάρη με τις ροζέτες και τον καβαλάρη τοποθετημένα με κόλλα πάνω στο καπάκι.

Τα πειράματα που διεξήχθησαν βασιζόμενα στα στοιχεία που συγκεντρώνονται στους πίνακες 1,2 και 3 έδωσαν ως αποτέλεσμα τα ακόλουθα modes δόνησης.

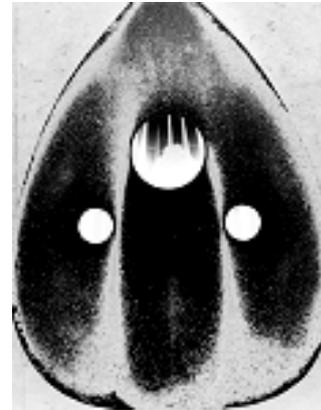
ΜΟΔΕΣ ΔΟΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΚΙΟΥ ΒΑΣΕΙ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 1.



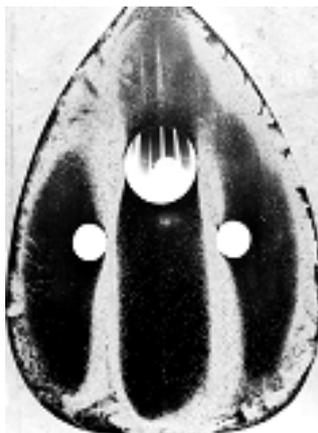
$\alpha 1$ (82Hz)



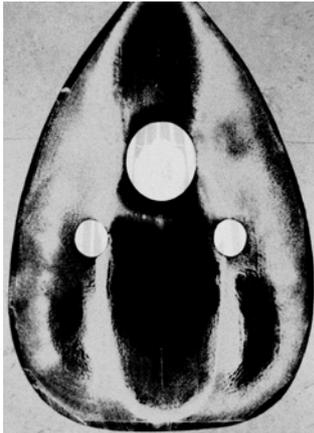
$\alpha 2$ (110Hz)



$\alpha 3$ (115Hz)



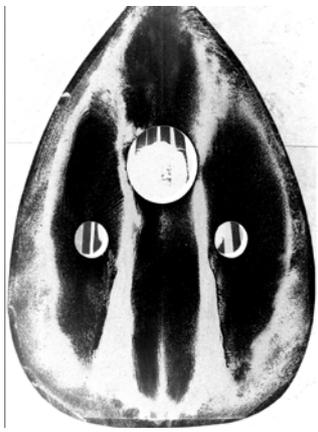
$\alpha 4$ (123Hz)



$\alpha 5$ (140Hz)



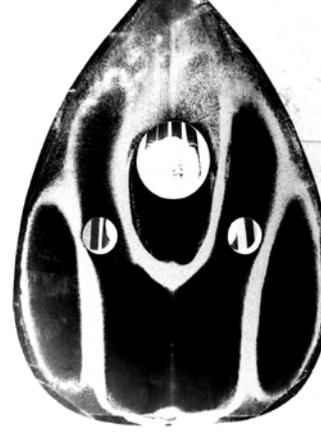
$\alpha 6$ (165Hz)



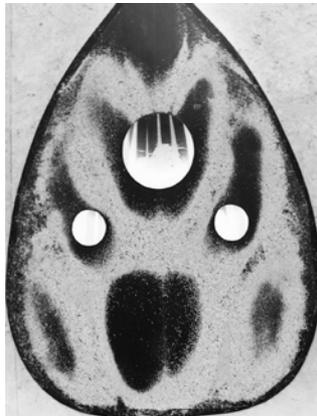
$\alpha 7$ (185Hz)



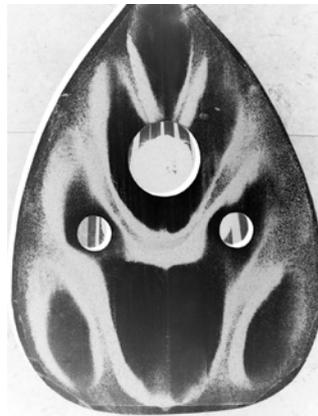
$\alpha 8$ (220Hz)



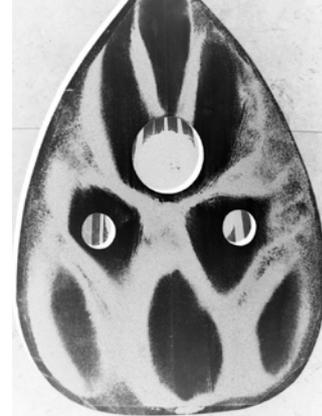
$\alpha 9$ (260Hz)



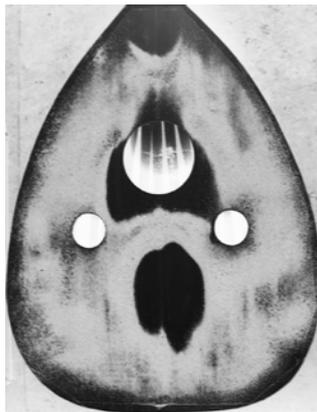
α_{10} (1294Hz)



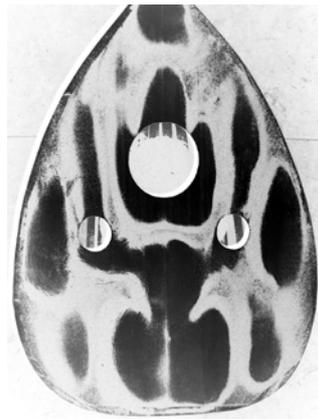
α_{11} (300Hz)



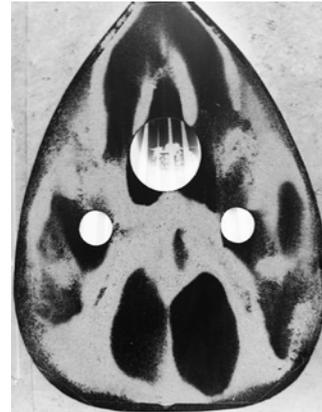
α_{12} (320Hz)



α_{13} (440Hz)



α_{14} (460Hz)



α_{15} (525Hz)

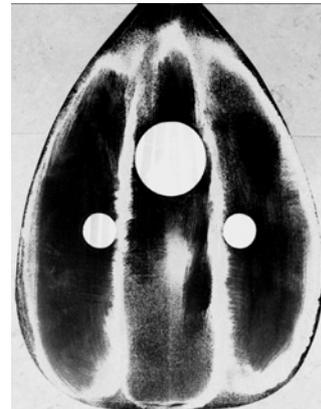
ΜΟΔΕΣ ΔΟΝΗΣΗΣ ΚΑΠΑΚΙΟΥ ΒΑΣΕΙ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 2.



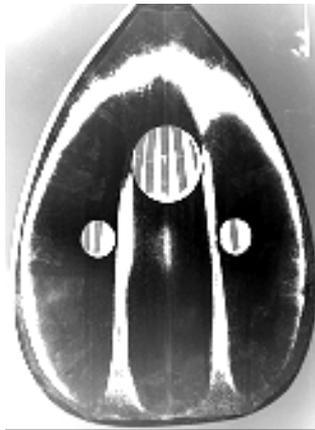
β1 (82Hz)



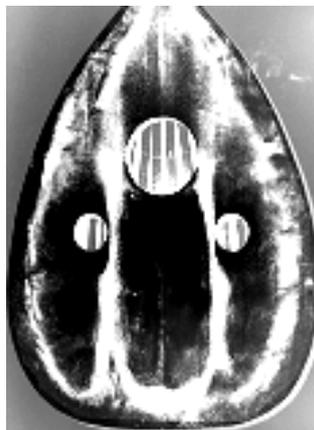
β2 (110Hz)



β3 (115Hz)



β4 (123Hz)



β5 (140Hz)



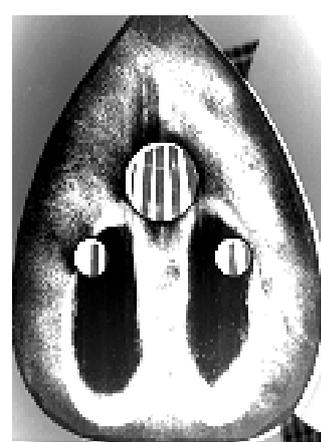
β6 (165Hz)



β7 (185Hz)



β8 (220Hz)



β9 (260Hz)



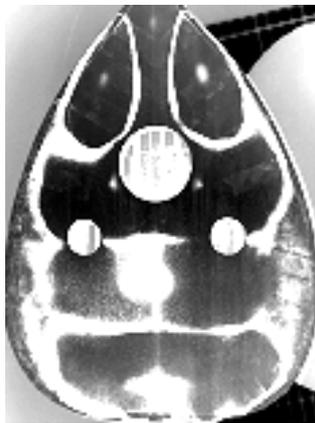
β_{10} (260Hz)



β_{11} (300Hz)



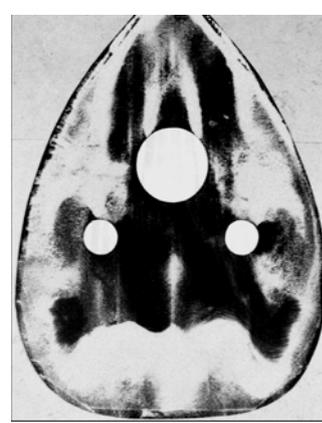
β_{12} (320Hz)



β_{13} (440Hz)

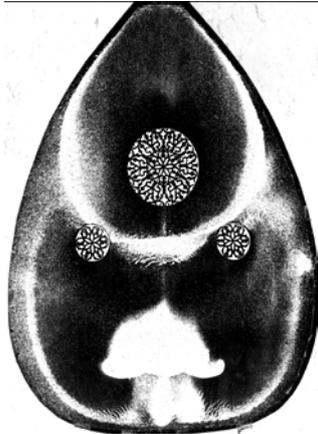


β_{14} (460Hz)



β_{15} (525Hz)

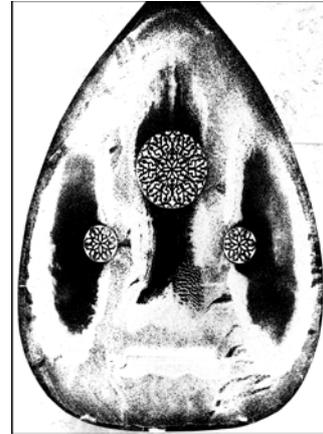
MODES ΔΟΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΚΙΟΥ ΒΑΣΕΙ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ 3.



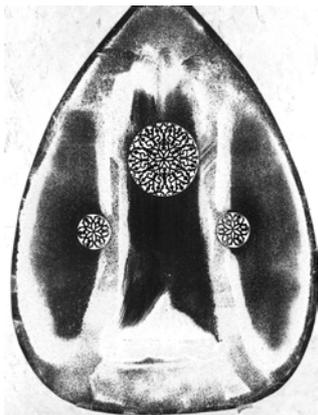
γ1 (82Hz)



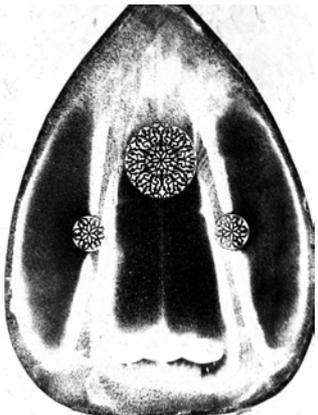
γ2 (110Hz)



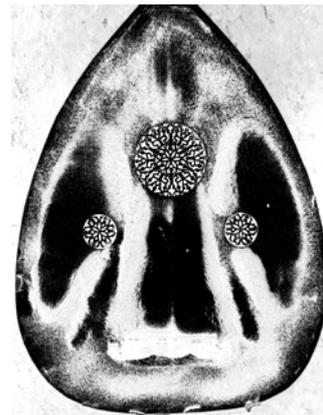
γ3 (115Hz)



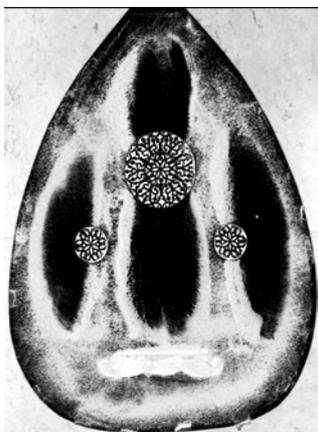
γ4 (123Hz)



γ5 (140Hz)



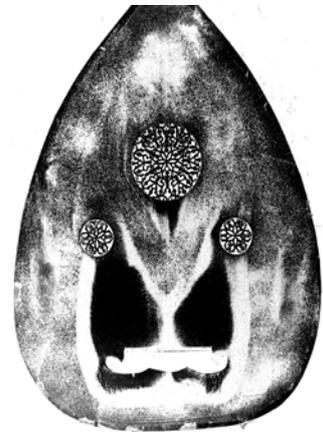
γ6 (165Hz)



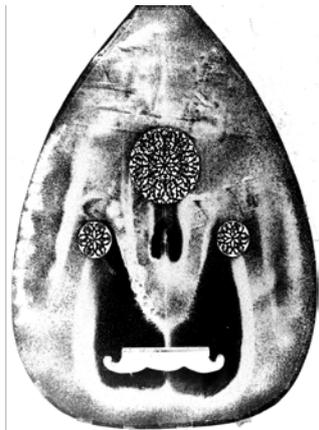
γ7 (185Hz)



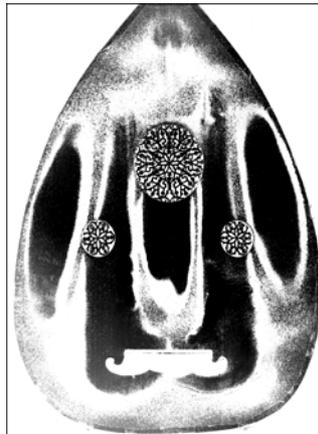
γ8 (220Hz)



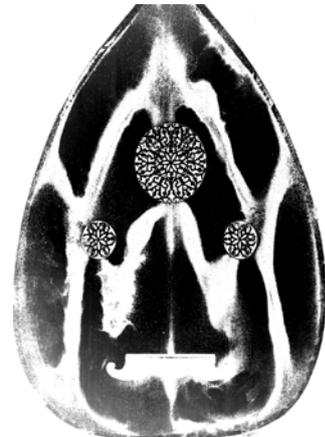
γ9 (260Hz)



γ_{10} (294Hz)



γ_{11} (320Hz)



γ_{12} (440Hz)

Τα παραπάνω σχήματα αποτελούν τα ολογραφήματα των modes δόνησης που μετρήθηκαν στο καπάκι του ουτιού. Το κάθε ολογράφημα αντιστοιχεί σύμφωνα με τον αύξοντα αριθμό που φαίνεται κάτω από κάθε σχήμα στα αριθμητικά δεδομένα μιας γραμμής από τους τρεις πίνακες. Στα ολογραφήματα τα σημεία που έχουν άσπρο χρώμα αποτελούν τα κομβικά σημεία πάνω στο καπάκι. Οι μαύρες επιφάνειες αποτελούν τα αντί-κομβικά σημεία στην κάθε συχνότητα διέγερσης. Επίσης τα γκρι σημεία που φαίνονται στα ολογραφήματα είναι σημεία ελάχιστης κίνησης. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι όταν δονείται το καπάκι, παρατηρείται κίνηση σε ολόκληρη την επιφάνεια του. Δηλαδή τα κομβικά σημεία δεν αποτελούν επιφάνειες με μηδενική κίνηση. Ο λόγος που συσσωρεύεται στα σημεία αυτά το τσάι είναι ότι στα αντί-κομβικά σημεία παρατηρείται έντονη κίνηση, με αποτέλεσμα να μαζεύεται το τσάι σε σημεία με λιγότερη κίνηση. Τα γκρι σημεία αποτελούν την ενδιάμεση κατάσταση. Δηλαδή παρουσιάζουν σχετική κίνηση αλλά όχι τόσο έντονη ώστε να μετακινηθεί εντελώς το τσάι.

4.4 Γενικές παρατηρήσεις.

Οι συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα δεν αποτελούν τυχαίες επιλογές. Τα 82 Hz (E_2) αντιστοιχούν στο κούρδισμα της πρώτης από πάνω χορδής του ουτιού. Τα 110 Hz (A_2) είναι η συχνότητα που κουρδίζεται η δεύτερη από πάνω χορδή. Η συχνότητα των 123 Hz (H_2) αντιστοιχεί στον τόνο που κουρδίζεται η τρίτη από πάνω χορδή. Τα 165 Hz (E_2) αντιστοιχούν στον τόνο κουρδίσματος της τετάρτης από πάνω χορδής. Επίσης τα 220 Hz (A_3) είναι η συχνότητα που κουρδίζεται η πέμπτη από πάνω χορδή και τέλος τα 294 Hz (D_3) αντιστοιχούν στον τόνο κουρδίσματος της έκτης από πάνω χορδής. Οι υπόλοιπες συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν σε ενδιάμεσους τόνους στο εύρος συχνοτήτων που παράγεται από ένα ούτι.

Επίσης λόγος πρέπει να γίνει για την επιλογή των σημείων διέγερσης. Το σημείο που αντιστοιχεί στην θέση τοποθέτησης του καβαλάρη αποτελεί ένα εμφανές σημείο διέγερσης όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Είναι ένα από τα σημεία που έχει επιλεγθεί στις περισσότερες μελέτες που αφορούσαν το βιολί και τη κιθάρα. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη η επιλογή του συγκεκριμένου

σημείου και στην παρούσα μελέτη. Το δεύτερο σημείο που χρησιμοποιήθηκε, αυτό λίγο κάτω από τις δύο μικρές οπές στο καπάκι, αποτελεί ένα σημείο που επίσης επέλεξε ο E. Jansson στην modal ανάλυση της κιθάρας. Η επιλογή ενός δεύτερου σημείου διέγερσης έγινε για να καταστεί εμφανής η διαφορά που προκύπτει στα ολογραφήματα, αλλάζοντας το σημείο διέγερσης. Ταυτόχρονα χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να παρθούν συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

4.5 Σχολιασμός πειραματικών αποτελεσμάτων.

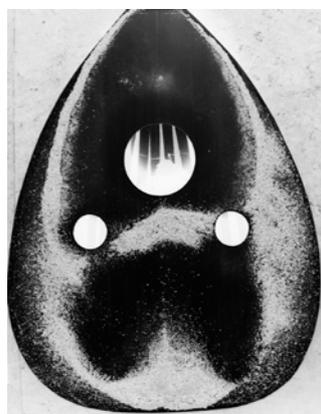
Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στα ολογραφήματα του καπακιού εντοπίζεται κίνηση σε ολόκληρη την επιφάνεια του καπακιού. Στις διάφορες συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν δεν εντοπίστηκε κάποιο σημείο πάνω στο καπάκι που να παραμένει ακίνητο. Επίσης παρατηρήθηκε κίνηση τόσο κατά μήκος των νερών όσο και κάθετα προς αυτά. Χρήσιμο είναι να σημειωθεί ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων καταγράφηκε κίνηση κάθετα προς τα νερά του καπακιού. Σχολιάζοντας γενικά τα ολογραφήματα παρατηρείται μεγαλύτερη απαιτούμενη ισχύς ώστε να δονηθεί το καπάκι όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης. Μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε ότι στην συχνότητα των 115 Hz ανιχνεύθηκε ισχυρή συμμετοχή του αέρα. Αυτό το δεδομένο είναι σε θέση να μας δείξει την ύπαρξη ενός ισχυρού συντονισμού σε αυτή την συχνότητα που πλησιάζει το συντονισμό Helmholtz ο οποίος έχει υπολογιστεί όπως ήδη έχουμε αναφέρει στο τρίτο κεφάλαιο στα 113 Hz για το ούτι.

Ένα ζήτημα που τίθεται από την σύγκριση των ολογραφημάτων είναι αυτό της συμμετρίας που εμφανίζεται στα ολογραφήματα. Μελετώντας τα ολογραφήματα προσεκτικά είναι δυνατόν να εντοπίσουμε σημεία πάνω στο καπάκι που παρεκκλίνουν από τον κανόνα της συμμετρίας. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε αν ήμασταν αυστηροί να θεωρηθεί πειραματικό σφάλμα, το οποίο προκύπτει λόγω ατελειών που υπάρχουν στην κατασκευή του καπακιού, δηλαδή κακοτεχνίες που είναι δυνατόν να έχουν δημιουργήσει διαφορετικά πάχη στο καπάκι σε διάφορα σημεία. Συμπερασματικά λοιπόν τα σημεία που έχουν περισσότερη ποσότητα ξύλου άρα μεγαλύτερη μάζα σε σχέση με τα αντίστοιχα τους στο άλλο μισό καπάκι συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο κατά την διέγερση. Ταυτόχρονα μικρές

ατέλειες στην απόλυτη συμμετρία των ολογραφημάτων μπορεί να προκαλεί η ανομοιόμορφη κατανομή τσαγιού πάνω στο καπάκι. Παρ' όλ' αυτά η συγκεκριμένη διαπίστωση αποτελεί μια κινητήρια δύναμη για ακριβέστερη δουλειά κατά την κατασκευή του καπακιού πριν πειραματιστούμε με τη συγκεκριμένη μέθοδο.

Ολοκληρώνοντας τις γενικότερες παρατηρήσεις που προκύπτουν από τον σχολιασμό των πειραματικών αποτελεσμάτων μπορούμε να αναφέρουμε την ανίχνευση πιο έντονων κομβικών γραμμών στα πειράματα που διεξήχθησαν με τις ροζέτες και τον καβαλάρη τοποθετημένα πάνω στο καπάκι. Σε αυτά τα πειράματα δηλαδή γίνεται εμφανής η διατήρηση της θέσης ορισμένων κομβικών γραμμών, που προέκυψαν και προτού τοποθετηθούν ροζέτες και καβαλάρης, αλλά με πιο έντονη μορφή. Αυτό βέβαια δεν συμβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις.

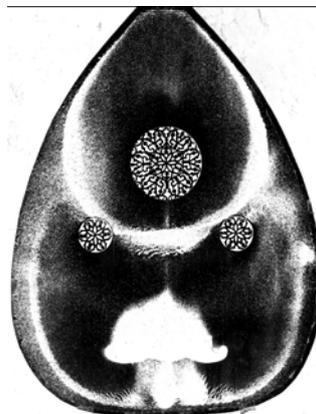
4.6 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων.



α1 (82 Hz)



β1 (82 Hz)



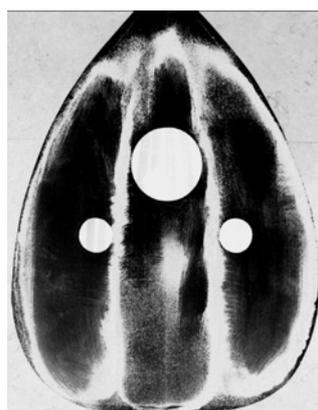
γ1 (82 Hz)

Συγκρίνοντας τα τρία ολογραφήματα που προέκυψαν διεγείροντας το καπάκι με συχνότητα 82 Hz παρατηρούμε κατ' αρχήν συμμετοχή μεγαλύτερης επιφάνειας καπακιού από όλες τις άλλες μετρήσεις. Δηλαδή οι κομβικές γραμμές παρατηρούνται μόνο περιμετρικά στο καπάκι, στο σημείο τοποθέτησης του καβαλάρη και στα ολογραφήματα α1 και γ1 μια κομβική γραμμή ανάμεσα στις δύο μικρές οπές. Αυτή η κομβική γραμμή δεν υπάρχει στο ολογράφημα β1. Η υπόλοιπη επιφάνεια του

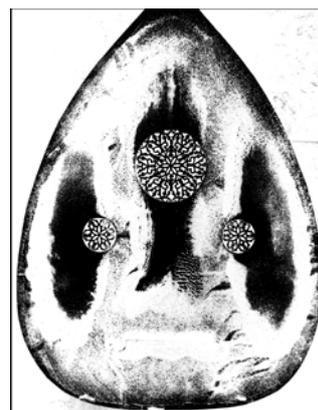
καπακιού εκτός από τα κομβικά σημεία που αναφέρθηκαν αποτελεί κοιλία. Επίσης παρατηρείται σχετική ομοιότητα ανάμεσα στα ολογραφήματα α1 και γ1, με μικρές διαφορές που προκύπτουν λόγω της τοποθέτησης των ροζετών και του καβαλάρη στο ολογράφημα γ1.



α3 (115 Hz)



β3 (115 Hz)

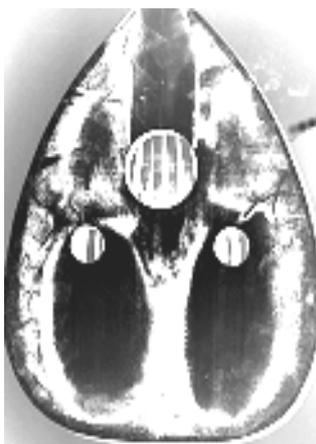


γ3 (115 Hz)

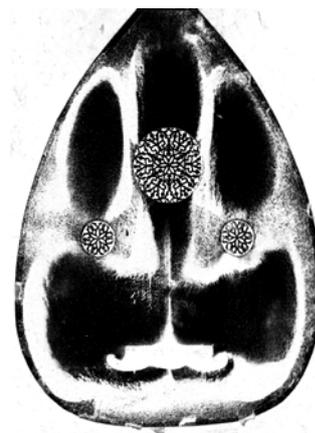
Στα ολογραφήματα α3, β3 και γ3 παρατηρείται ομοιότητα ως προς την διάτάξη των κομβικών και αντί-κομβικών σημείων. Συγκρίνοντας τα ολογραφήματα α3 και β3 παρατηρούμε ένα κομβικό σημείο ανάμεσα στις δύο μικρές οπές στο β3 που δεν υπάρχει στο ολογράφημα α3 καθώς και αντί-κομβικά σημεία πάνω από τη μεγάλη οπή στο β3 που δεν είναι τόσο έντονα στο α3. Στο ολογράφημα γ3 παρατηρούμε πιο έντονες κομβικές γραμμές, με τα αντί-κομβικά σημεία να ανακαλύπτουν μικρότερη επιφάνεια πάνω στο καπάκι. Και στα τρία αυτά ολογραφήματα προκύπτουν δύο κομβικές γραμμές που διέρχονται από τις εσωτερικές πλευρές των δύο μικρών οπών και καταλήγουν στην μεγάλη οπή. Επίσης παρατηρείται κάθετη κυρίως κίνηση του καπακιού προς τα νερά του. Ανάλογη συμπεριφορά προκύπτει εξετάζοντας ολογραφήματα με συχνότητα διέγερσης στα 123 Hz.



α8 (220 Hz)



β8 (220 Hz)



γ8 (220 Hz)

Τα ολογραφήματα α8, β8 και γ8 προέκυψαν μετά από τη διέγερση του καπακιού σε συχνότητα 220 Hz. Ένα βασικό συμπέρασμα που εξάγεται παρατηρώντας τα τρία αυτά ολογραφήματα είναι η ύπαρξη μιας κομβικής γραμμής στον κεντρικό άξονα του καπακιού. Και σε αυτά τα τρία ολογραφήματα παρατηρείται μια κομβική γραμμή περιμετρικά του καπακιού. Επίσης δυο κομβικές γραμμές ανιχνεύονται στο πάνω μέρος του καπακιού που έχουν αφετηρία την μεγάλη οπή και καταλήγουν στον πάνω ντάκο. Και στα τρία ολογραφήματα παρατηρείται ομοιότητα στην διάταξη των κομβικών γραμμών. Επίσης ανιχνεύεται κίνηση κατά την δόνηση του καπακιού σε αυτή τη συχνότητα τόσο κατά μήκος των νερών όσο και κάθετα προς αυτά.

Παρόμοια είναι τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουμε και από την σύγκριση των υπολοίπων ολογραφημάτων. Ο στόχος της συγκριτικής αυτής μελέτης δεν είναι άλλος από την εξαγωγή ορισμένων γενικών συμπερασμάτων, ως προς τον τρόπο δόνησης του καπακιού του ουτιού στις διάφορες συχνότητες διέγερσης. Μελετώντας κυρίως τα ολογραφήματα που προέκυψαν από την διέγερση του καπακιού με τοποθετημένα τις ροζέτες και τον καβαλάρη, παρατηρούμε δύο κομβικές γραμμές συμμετρικές κατά μήκος των νερών που διέρχονται από τις δύο μικρές οπές και φτάνουν μέχρι τη μεγάλη οπή. Το γεγονός αυτό μας καταδεικνύει ένα εμφανές σημείο πάνω στο καπάκι που επιδέχεται ενίσχυση εσωτερικά. Επίσης σε αρκετές περιπτώσεις ολογραφημάτων παρατηρείται μια κομβική γραμμή κάθετα προς τα νερά του καπακιού που ενώνει τις δύο μικρές οπές. Από την άλλη αντί-κομβικά σημεία

παρατηρούνται στις πλαϊνές επιφάνειες του καπακιού, από τις δύο μικρές οπές και προς τα έξω. Επίσης σε αρκετές περιπτώσεις αντί-κομβικά σημεία ανιχνεύονται στον κεντρικό άξονα του καπακιού. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα δίδεται η δυνατότητα στον κατασκευαστή να εφαρμόσει έναν διαφορετικό οπλισμό καμαριών για την ενίσχυση του καπακιού, από τον κλασικό οπλισμό που μέχρι τώρα εφαρμόζεται. Επιπρόσθετα με τη μέθοδο αυτή είναι σε θέση να αντιληφθεί τον τρόπο δόνησης του καπακιού στις διάφορες συχνότητες διέγερσης και να χρησιμοποιήσει αυτό το δεδομένο στον τρόπο κατασκευής ενός έγχορδου μουσικού οργάνου. Τέλος προκύπτει η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο, εφαρμόζοντας πιο σύγχρονες μεθόδους ώστε να προσεγγιστούν πλησιέστερα οι πραγματικές συνθήκες.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια να αντιμετωπισθεί η κατασκευή εγχόρδων μουσικών οργάνων όχι από την καθαρά τεχνική της οπτική αλλά υπό το πρίσμα της επιστήμης της φυσικής ακουστικής. Εισήχθησαν έννοιες όπως ηχητικό κύμα, συχνότητα, συντονισμός που αποτελούν εργαλεία για τη μελέτη του συγκεκριμένου αντικείμενου προς αυτή την κατεύθυνση. Παρουσιάστηκε το έγχορδο μουσικό όργανο ούτι, τόσο από την τεχνική του πλευρά (κατασκευαστικά) όσο και από την ακουστική του λειτουργία. Επίσης χρησιμοποιήθηκε η modal ανάλυση ώστε να μελετηθούν οι διάφοροι συντονισμοί που συμβαίνουν στο καπάκι του οργάνου. Τέλος προέκυψαν βασικά συμπεράσματα για τη κατασκευή του καπακιού ως προς την επιλογή της διάταξης των ενισχυτικών υποστηριγμάτων και δηλώθηκε η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Χρήσιμο είναι να γίνει κατανοητό ότι σκοπός αυτής της μελέτης δεν είναι να αντιπαρατεθεί η εμπειρική γνώση και πρακτική με την επιστήμη της φυσικής και σε καμιά περίπτωση η μια εκ των δύο εννοιών να υπερισχύσει της άλλης. Στόχος είναι η κοινή πορεία και ο συνδυασμός αυτών των δύο προσεγγίσεων προς την κατανόηση και την δημιουργία μεθόδων στην κατασκευή των μουσικών οργάνων.

Η modal ανάλυση που εφαρμόστηκε στο πειραματικό μέρος έρχεται επιπρόσθετα να τονίσει την παραπάνω θέση. Η χρήση της υιοθετεί μια διαισθητική κατανόηση για την λειτουργία ενός οργάνου, καθώς τα modes δόνησης είναι δυνατόν να προβληθούν ζωντανά. Ο κάθε κατασκευαστής που έχει την δυνατότητα να εφαρμόσει μια τέτοια τεχνική μπορεί να παρακολουθήσει πώς το σώμα του οργάνου λυγίζει και κάμπτεται. Ξεπερνάμε έτσι την μονοδιάστατη προσέγγιση του αντικείμενου σύμφωνα με την οποία ένας κατασκευαστής ακούει μόνο το αποτέλεσμα που δημιουργήσε. Ξαφνικά ξεκινά να βλέπει τι θα συμβεί στο όργανο όταν ένας μουσικός το διεγείρει. Είναι σε θέση λοιπόν να ανακαλύψει την λειτουργία του οργάνου και έπειτα να αναπτύξει μια βαθύτερη κατανόηση για τους συντονισμούς που παράγει η διαδικασία παιξίματος. Με τον παραδοσιακό εμπειρικό τρόπο κατασκευής ένας κατασκευαστής έχει απλά τη δυνατότητα να ακούσει το αποτέλεσμα για το οποίο είναι υπεύθυνοι οι συντονισμοί. Ο συνδυασμός με την

modal ανάλυση του αποκαλύπτει τι έχει δημιουργήσει δηλαδή ένα «γλυπτό συντονισμού». Και κλείνοντας όσο τεχνολογικά άρτιες και να μοιάζουν οι μέθοδοι όπως η modal ανάλυση σε καμία περίπτωση δεν υποδεικνύουν στον κατασκευαστή τον τρόπο δόμησης του οργάνου, απλώς ισχυροποιούν την κατασκευή του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Σπυρίδης Χ. Χ, *Μουσική Ακουστική*, Εκδόσεις Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου, Θεσσαλονίκη, 1996.
- [2] Σπυρίδης Χ. Χ, *Εισαγωγή στη Φυσική και Μουσική Ακουστική*, Αθήνα 2002.
- [3] John M. Eargle, *Μουσική ακουστική τεχνολογία*, Δεύτερη έκδοση, Εκδόσεις Ιων, 1999.
- [4] Jansson E. V, *Acoustics for violin and guitar makers*, Kungl Tekniska Hogskolan, fourth edition, Stockholm 2002.
- [5] Hall Donald, *Musical Acoustics: An introduction*, 2nd edition, Pacific Grove, CA : Brooks-Cole Pub. Co., 1991.
- [6] Τσιαμούλης Χ. Ερευνίδης Π. *Ρωμιοί συνθέτες της Πόλης (17^{ος}-20^{ος} αι.)*, Εκδόσεις Δόμος, Αθήνα 1998.
- [7] Ανωγειανάκης Φοίβος, *Ελληνικά λαϊκά μουσικά όργανα*, Εκδόσεις Μέλισσα, Αθήνα 1991.
- [8] Cumhuri Erkut, *Aspects in analysis and model-based sound synthesis of plucked string instruments*, Helsinki University of technology Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, 29th October 2002.
- [9] www.oudmaster.com, farukturunz@yahoo.com.
- [10] Σιμόπουλος Κ. *Για να καταλάβεις το Ξύλο*, Αθήνα 1985.
- [11] David W. Green, Jerrold E. Winandy, and Davind E. Kretschmann, *Wood handbook, Mechanical Properties of Wood*, 1999.
- [12] Bart Hopkin, *Musical instrument design. Practical information for instrument making*, See sharp Press Tucson, Arizona 1996.

- [13] William R. Cumpiano and Jonathan D. Natelson, *Guitarmaking Tradition and Technology: A Complete Reference & Construction of the Steel-String Folk Guitar & the Classical Guitar*, Chronicle Books, San Francisco, 1993.
- [14] C. Erkut, M. Laurson, M. Kuuskankare and V. Valimaki, *Model-based synthesis of the ud and the renaissance lute*. In Proceeding of the International Computer Music Conference (ICMC 2001), Havana, Cuba, September 17-23, 2001.
- [15] Kristoffer Jensen, *Timbre Models of Musical Sounds. From the model of one sound to the model of one instrument*, Datalogisk Institut, Kobenhavn Universitet Department of Computer Science, University of Copenhagen Universitetsparken 1, DK-2100 Kobenhavn, DIKU
- [16] Stetson K. A, *On modal coupling in string instrument bodies*, J. Guitar Acoustics, No. 3, 23-31, 1981.
- [17] Boullosa R. R, *The use of transient excitation for guitar frequency response testing*, Catgut Acoust. Soc. Newsletter, No. 36, 17, 1981.
- [18] Strong W. Y, Beyer T. B, Bowen D. J, Williams E. G and Maynard J. D, *Studying a guitar's radiation properties with nearfield holography*, J. Guitar Acoustics, No. 6, 59-60, 1982.
- [19] Ross R. E and Rossing T. D, *Plate vibrations and resonances of classical and folk guitars*, J. Acoust. Soc. Am. 65, 72, 1979.
- [20] G. Bissinger, *Modern vibration measurement techniques for bowed instruments*, Feature, Testing of Acoustic Stringed Musical Instruments: Part 4, Experimental techniques, July/August 2001.
- [21] Martin Schleske, *Empirical tools in contemporary violin making: Partrt 1. Analysis of design, Materials, Varnish and normal modes*, CASJ Vol. 4, No. 5 (Series II), May 2002.
- [22] Jansson E. V *A study of acoustical and hologram interferometric measurments on the top plate vibrations of a guitar*, Acoustica 25, 95-100, 1971.
- [23] Jansson E. V, Molin N. E and Sundin H, *Resonances of a violin body studied by hologram interferometrie and acoustical methods*: Physica Scripta, vol. 2, p. 243-256, 1970.

- [24] Moral J. A and Jansson E. V, *Eigenmodes, input admittance, and the function of the violin*: Acoustica, vol. 50, p. 329-337, 1982.
- [25] Meyer J., *Die abstimmung der grundresonanzen von gitarren. Das Musikinstrument* 23, 179-86, English translation in J. Guitar Acoustics, No. 5, 19, 1982.
- [26] Muller H. A. and Geissler P., *Modal analysis applied to instruments of the violin family (abstract)*, J. Catgut Acoust. Soc. Vol. 41, p. 12, 1984.
- [27] Marshall K. D., *Modal analysis of a violin*, J. Acoust. Soc. Amer. Vol. 77, p. 695-709, 1985.
- [28] Chris Johnson and Roy Courtnall, *The art of violin making*, Robert Hale, Great Britain, 1999.
- [29] N. H. Fletcher and T. D. Rossing, *The physics of musical instruments*, New York, U.S.A: Springer-Verlag, second edition, 1998.
- [30] Jansson E. V., Bork I. and Meyer J., *Investigation into the acoustical properties of the violin*, Acoustica 62, 1-15, 1986.