

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

**Μελέτη δονητικών χαρακτηριστικών
παραδοσιακών κρουστών μουσικών οργάνων με
τη χρήση οπτικών συμβολομετρικών τεχνικών**



Σιδηράς Ιωάννης

Επιβλέποντες καθηγητές:

Δρ. Παπαδογιάννης Νεκτάριος

Δρ. Μπακαρέζος Ευθύμιος

Ορφανός Ιωάννης

Ρέθυμνο, 2013

Σιδηράς Ιωάννης

Προπτυχιακός φοιτητής

Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής

A.T.E.I. Κρήτης παράρτημα Ρεθύμνου

**Μελέτη δονητικών χαρακτηριστικών
παραδοσιακών κρουστών μουσικών
οργάνων με τη χρήση οπτικών
συμβολομετρικών τεχνικών**

Επιβλέποντες καθηγητές:

Δρ. Παπαδογιάννης Νεκτάριος

Δρ. Μπακαρέζος Ευθύμιος

Ορφανός Ιωάννης

Επιβλέπων μουσικός/οργανοποιός:

Παπατζανής Ιωάννης

Ρέθυμνο, 2013

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	1
2. Τα κρουστά μουσικά όργανα.....	2
2.1. Ιστορικά και μορφολογικά στοιχεία των κρουστών	
2.2. Τρόπος παραγωγής ήχου των κρουστών.....	5
2.2.1. Θεωρητικά μοντέλα των κρουστών: Μεμβράνης, αέρινης κοιλότητας, πλαισίου.....	5
2.2.1.1. Κυματική εξίσωση ορθογώνιας μεμβράνης.....	6
2.2.1.2. Κυματική εξίσωση κυκλικής μεμβράνης.....	9
2.2.1.3. Τρόποι δόνησης πλαισίου.....	12
2.2.1.4. Η παράμετρος της θερμοκρασίας στα κρουστά....	13
3. Πειραματικές τεχνικές μελέτης κανονικών τρόπων δόνησης κρουστών.....	14
3.1. Οπτικές τεχνικές.....	14
3.1.1. Ολογραφία.....	14
3.1.1.1. Μήκος συμφωνίας.....	18
3.1.2. Ολογραφική συμβολομετρία.....	19
3.1.3. E. S. P. I. (Electronic Speckle Pattern Interferometry).....	20
3.1.3.1. Μαθηματική θεώρηση.....	22
3.1.3.2. Πειραματική διάταξη-διαδικασία μέτρησης.....	24
3.2. Ακουστικές τεχνικές.....	28
3.2.1. Μέθοδος ανάλυσης προ ηχογραφημένου υλικού.....	28
3.2.2. Τεχνική μέτρησης της ταχύτητας του ήχου της μεμβράνης.....	28
3.3. Τεχνική μέτρησης της θερμοκρασίας.....	29
4. Πειραματικά αποτελέσματα και ανάλυση.....	31
4.1. Υπολογισμός της ταχύτητας ήχου της μεμβράνης.....	31
4.2. Θεωρητικές τιμές συχνοτήτων για τις δύο μεμβράνες.....	31

4.3.Σύγκριση αποτελεσμάτων για ίδια μεμβράνη με διαφορετικές τάσεις.....	32
4.3.1. Μέθοδος ανάλυσης προ ηχογραφημένου υλικού.....	32
4.3.2. Μέθοδος ψηφιακής αναπαράστασης ψηφίδων.....	34
4.3.2.1. Μεμβράνη φυσικού δέρματος κατσίκας.....	34
4.3.2.2. Μεμβράνη φυσικού δέρματος αγελάδας.....	38
4.4.Η συμπεριφορά του ξύλου για τις δύο μεμβράνες.....	41
4.5.Η προσθήκη της πίσω μεμβράνης.....	42
4.6.Οι ανομοιομορφίες της λάθος τάσης κουρδίσματος.....	47
4.7.Ο συσχετισμός των διαστάσεων των τυμπάνων.....	50
4.8.Η παράμετρος της θερμοκρασίας.....	53
5. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....	55
6. Παράρτημα (συχνοτική απόκριση του συστήματος).....	58
7. Βιβλιογραφία.....	59

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την αποπεράτωση αυτής της πτυχιακής εργασίας συμμετείχαν αρκετά άτομα, των οποίων η βοήθεια και η υποστήριξη ήταν σημαντική. Επομένως, ευχαρίστηση και τιμή μου είναι να πω ένα ευχαριστώ τους καθηγητές μου Δρ. Παπαδογιάννη Νεκτάριο, Δρ. Μπακαρέζο Ευθύμιο και κ. Ορφανό Ιωάννη οι οποίοι μου ανοίξανε τον δρόμο με την κατάλληλη καθοδήγηση, με τις συμβουλές τους και την υποστήριξή τους στην παρούσα έρευνα από την αρχή ως το τέλος της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον μουσικό/οργανοποιό κ. Παπατζανή Ιωάννη, ο οποίος μας παρείχε αναγκαίο και πολύτιμο μουσικό εξοπλισμό και συνεργάστηκε μαζί μας προσφέροντας γνώσεις και συμβουλές. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν στο studio ηχογράφησης και στο εργαστήριο οπτικής και μουσικής τεχνολογίας για την πολύτιμη υποστήριξή τους.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα παραδοσιακά κρουστά μουσικά όργανα αποτελούνται από ένα κυλινδρικό πλαίσιο με ειδική στεφάνη πάνω στην οποία έχει τεντωθεί μεμβράνη φυσικού δέρματος ζώου ή συμβατική, πλαστική μεμβράνη. Οι κανονικοί τρόποι ταλάντωσης τόσο της μεμβράνης όσο και του πλαισίου παίζουν σημαντικό ρόλο στα ακουστικά χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου ήχου.

Στην παρούσα διπλωματική θα μελετηθούν οι χαρακτηριστικές συχνότητες και οι αντίστοιχοι τρόποι ταλάντωσης, τόσο της μεμβράνης όσο και του πλαισίου, με την χρήση ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (E.S.P.I.) με λέιζερ, αλλάζοντας παραμέτρους όπως τάσεις κουρδίσματος, μεμβράνες, θερμοκρασία και αέρινη κοιλότητα. Τα πειραματικά μοντέλα θα συγκριθούν με βασικά θεωρητικά μοντέλα κυκλικών μεμβρανών και θα γίνει διερεύνηση της σύνδεσής τους με τα χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου ήχου.

2. ΤΑ ΚΡΟΥΣΤΑ ΜΟΥΣΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΚΡΟΥΣΤΩΝ

Τα κρουστά όργανα ίσως είναι τα αρχαιότερα μουσικά όργανα αλλά και τα πιο ενδιαφέρον και διάσημα για μελέτη στην σύγχρονη κοινωνία αφενός στη μουσική και αφετέρου στην επιστήμη. Πολλά νέα είδη κρουστών έχουν εμφανιστεί κατά περιόδους αλλά και πολλά νέα είδη βρίσκονται σε πειραματικό επίπεδο στα ερευνητικά εργαστήρια κατασκευής μουσικών οργάνων.

Ο όρος κρουστό μουσικό όργανο προήλθε από την διαδικασία της κρούσης κατά την οποία η μεμβράνη του οργάνου έρχεται σε επαφή με τα χέρια του οργανοπαίχτη ή με κάποιο είδος μπαγκέτας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του ήχου. Το αποτέλεσμα του ήχου των κρουστών είναι ασυνήθιστο και γι αυτό το λόγο χρησιμοποιείται μέχρι και τις μέρες μας σε διάφορους πολιτισμούς για την μαγική και τελετουργική του σημασία. Διάφορες χρήσεις των κρουστών είναι στην στρατιωτική μουσική για να τονίσει τον ρυθμό του βηματισμού, στην μετάδοση συνθημάτων, στην συνοδεία τραγουδιών και χωρών και στην δημιουργία φαντασμαγορικών εφέ στην τηλεοπτική μουσική.

Όπως σε όλους τους πολιτισμούς έτσι και στην αρχαία Ελλάδα συναντούμε κρουστά όργανα διαφόρων τύπων που χρησίμευαν στην δοξασία των θεών, στη συνοδεία των τραγουδιών και των χορευτών καθώς επίσης και στην εκπαίδευση. Τα κρουστά όργανα που έχουν διασωθεί ως τις μέρες μας είναι:



- **Το τύμπανο:** Το χρησιμοποιούσαν σε τελετές λατρείας της Κυβέλης και του Διονύσου. Είχε κυλινδρικό σχήμα σώματος και στις κυλινδρικές άκρες του είχε προσαρμοσμένες δυο φυσικές μεμβράνες ζώων. Η μεμβράνη διεγειρόταν με το χέρι και συνήθως παιζόταν από γυναίκες.



- **Το σείστρο:** Ήταν ένα όργανο πολύ μικρό σε μέγεθος και με σχήμα πετάλου ή σπιρουνιού αλόγου με λαβή. Πάνω στο πλαίσió του ήταν προσαρμοσμένες μικρές εγκάρσιες ράβδοι ή κουδουνάκια. Είχε μεγάλη απήχηση στην αρχαία Κρήτη και ανακαλύφθηκε στο ταφικό κτήριο 9 του προ ανακτορικού νεκροταφείου, στο Φουρνί

στις Αρχάνες Ηρακλείου.



- **Τα κρόταλα:** Τα κρόταλα χρησιμοποιούνταν για να δώσουν ρυθμό στους χορευτές. Κατασκευαστικά ήταν δύο κοίλα κομμάτια από όστρακο, ξύλο ή μέταλλο.



- **Τα κύμβαλα:** Ήταν δύο ημισφαιρικά μεταλλικά πιάτα.

Στη σύγχρονη Ελλάδα έχουν κρατηθεί κάποια όργανα από την αρχαιότητα κι έχουν εξελιχθεί ανάλογα με τις εποχές και τις επιρροές που είχαμε από τους άλλους πολιτισμούς, κυρίως τούρκικους και αραβικούς, λόγω μακροχρόνιων πολέμων και μετανάστευσης. Τα παραδοσιακά κρουστά μουσικά όργανα που επικρατούν αυτή την εποχή είναι:

Το νταούλι: Είναι ίδιο κατασκευαστικά σαν το αρχαίο ελληνικό τύμπανο. Δηλαδή έχει κυλινδρικό σχήμα σώματος, το οποίο διαφέρει στο μέγεθός του από περιοχή σε περιοχή, με τις σφαιρικές του πλευρές να καλύπτονται από φυσικά δέρματα ζώων. Για την στήριξη των δερμάτων στο ξύλο χρησιμοποιούνται ξύλινα ή μεταλλικά στεφάνια τα οποία δένονται μεταξύ τους με ένα σχοινί. Διεγείρεται συνήθως με την βοήθεια ειδικών μπαγκετών, τα νταουλόξυλα. Τα οποία είναι ένα χοντρό ξύλο, ο κόπανος και μια λεπτή βέργα ξύλου, η βίτσα.

Το ντέφι: Έχει διάφορα μεγέθη και διαμέτρους. Κατασκευάζεται τοποθετώντας σε ένα κυλινδρικό ξύλινο πλαίσιο μια μεμβράνη μόνο από την μία μεριά. Κατά το μήκος του πλαισίου τοποθετούνται σε ίσες αποστάσεις ζήλιες. Διεγείρεται με τα χέρια του οργανοπαίχτη.

Η ζίλια: Είναι μικρά μεταλλικά – μπρούτζινα όργανα, ιδιόφωνα. Έχουν μεγάλη ομοιότητα με τα αρχαία ελληνικά κύμβαλα.

Το μπεντί: Συναντάται σε διάφορα μεγέθη και διαμέτρους. Κατασκευάζεται τοποθετώντας σε ένα κυλινδρικό ξύλινο πλαίσιο μια μεμβράνη (κατά κόρο φυσικά δέρματα ενίοτε και συνθετικά) μόνο από την μία μεριά χωρίς να προστίθενται κάποιες ζήλιες. Προέρχεται από τις αραβικές περιοχές της βόρειας Αφρικής και έχει μουσικές ρίζες από την οθωμανική μουσική παράδοση.

Ακουστικό σετ τυμπάνων: Είναι μια συστοιχία διαφόρων μεγεθών τυμπάνων και κυμβάλων. Είναι αμερικανικής προέλευσης με τις πρώτες εμφανίσεις τους να παίρνουν θέση στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, μετά τον εμφύλιο πόλεμο της Αμερικής. Ένα σύνθετο ακουστικό σετ τυμπάνων απαρτίζεται:

- Από μια μπότα όπου είναι το πιο μεγάλο τύμπανο του σετ το συναντάμε σε διαμέτρους μεμβράνης 18 έως 26 ιντσών και βάθος πλαισίου από 16 έως 20 ίντσες.

Παίζεται με το πόδι μέσω ενός πεντάλ το οποίο κατασκευάστηκε το 1909 από τον William F. Ludwig Sr. μουσικός και ιδρυτής της ομώνυμης εταιρίας και αποτέλεσε την απαρχή όλων των νέων καινοτομιών των τυμπάνων ώστε να μπορούν να παιχτούν τόσα τύμπανα ταυτόχρονα από μόνο ένα άτομο.

- Από ένα ταμπούρο το οποίο ποικίλει σε διαστάσεις από 10 έως 14 ίντσες με προσαρμοσμένη χορδιέρα-strainer στην κάτω μεμβράνη, κατασκευάζεται από διάφορα υλικά όπως το ξύλο (σφεντάμι, σημύδα, μαόνι...), ο μπρούντζος και ο χαλκός. Αρχικά παιζόταν κρεμάμενο με την βοήθεια σχοινιών από το σβέρκο του μουσικού τα οποία αντικαταστάθηκαν από μια ειδική βάση.
- Τα toms, είναι τύμπανα ποικίλων διαστάσεων, από 8 έως 18 ίντσες, και υλικών τα οποία συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν κάποια μουσικότητα μεταξύ τους. Τοποθετούνται με ειδικές βάσεις πάνω στην μπότα ή στις βάσεις των κυμβάλων. Τα μεγάλα τύμπανα της κατηγορίας αυτής ονομάζονται floor toms και στηρίζονται στο πάτωμα με ειδικά ποδαράκια.
- τα hi-hats τα οποία αρχικά είχαν την ονομασία low boy. Ήταν ένας μηχανισμός όχι παραπάνω από 12 ίντσες ύψος ο οποίος έφερνε σε επαφή δυο αντικριστά πιατίνια και παιζόταν με το πόδι. Η εξέλιξη του παραπάνω μηχανισμού έγινε την εποχή του swing και δημιούργησε τα γνωστά hi-hats. Στην ουσία μεγάλωσε το ύψος του μηχανισμού, περίπου 20 ίντσες, ώστε να μπορούν πλέον να συμμετέχουν και τα χέρια στην ενίσχυση του ρυθμού.
- Τα κύμβαλα δεξιά και αριστερά από τον μουσικό τα συναντούμε σε διάφορες διαστάσεις και σχήματα.

Το μεντίρ και το ακουστικό σετ τυμπάνων μελετήθηκαν στην πειραματική διαδικασία της παρούσας πτυχιακής.

Πιο συγκεκριμένα το μεντίρ που χρησιμοποιήσαμε έχει κυλινδρικό ξύλινο πλαίσιο. Κατασκευάστηκε από ξύλο μαόνι με διάμετρο 45.7 cm βάθος 9.4 cm και πάχος 1 cm. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο φυσικά δέρματα ζώων, της κατσίκας η οποία ήταν μέτρια σε πάχος και της αγελάδας πιο λεπτή σε πάχος.

Από το ακουστικό σετ τυμπάνων της εταιρίας Gabriel μελετήθηκε το ταμπούρο με διάμετρο 35.7 cm, βάθος πλαισίου 16.6 cm και 1 cm πάχος το μικρό τομ με διάμετρο 25 cm, βάθος πλαισίου 22.4 cm και 1 cm πάχος και το μεγάλο τομ με διάμετρο 30 cm, 24 cm βάθος πλαισίου και 1 cm πάχος. Σε αυτά τα τύμπανα τοποθετήθηκαν συνθετικές μεμβράνες της εταιρίας evans υλικού mylar μονής

επίστρωσης με πάχος 7 mm για τις πίσω μεμβράνες και διπλής επίστρωσης με πάχος 7.5 mm για τις μπροστά μεμβράνες. Τα ξύλινα πλαίσια αυτών είναι φτιαγμένα από ξύλο σφεντάμι (maple).

2.2. ΤΡΟΠΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΧΟΥ ΤΩΝ ΚΡΟΥΣΤΩΝ

Τα κρουστά μουσικά όργανα έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό ότι οι τρόποι δόνησής τους δεν συνδέονται αρμονικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο ήχος που παράγεται να μην έχει τονικότητα δηλαδή να αποτελείται από τον βασικό τόνο και την αρμονική τους σειρά. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις κρουστών οργάνων όπου έχουμε αισθητή την τονικότητα.

Έτσι μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα κρουστά μουσικά όργανα σε δυο κατηγορίες:

- **Με μη διακριτή τονικότητα.**
- **Με διακριτή ικανότητα.**

Στη κατηγορία της μη διακριτής τονικότητας συναντούμε μεμβρανόφωνα κρουστά. Όπως το τύμπανο, το bendir και το ταμπούρο. Τα οποία δεν έχουν κάποια αίσθηση τονικότητας.

Στη κατηγορία της διακριτής τονικότητας συναντούμε όργανα ιδιόφωνων κρουστών όπως το ξυλόφωνο, τα chimes, τα κύμβαλα αλλά και μεμβρανόφωνων κρουστών όπως το ορχηστρικό τύμπανο, η tabla και το mrdanga, τα οποία έχουν τονικότητα.

Μια άλλη κατηγοριοποίηση η οποία μπορεί να γίνει είναι ως προς το σύστημα δόνησης του οργάνου. Έτσι θα έχουμε τις εξής τρεις κατηγορίες, τα κρουστά:

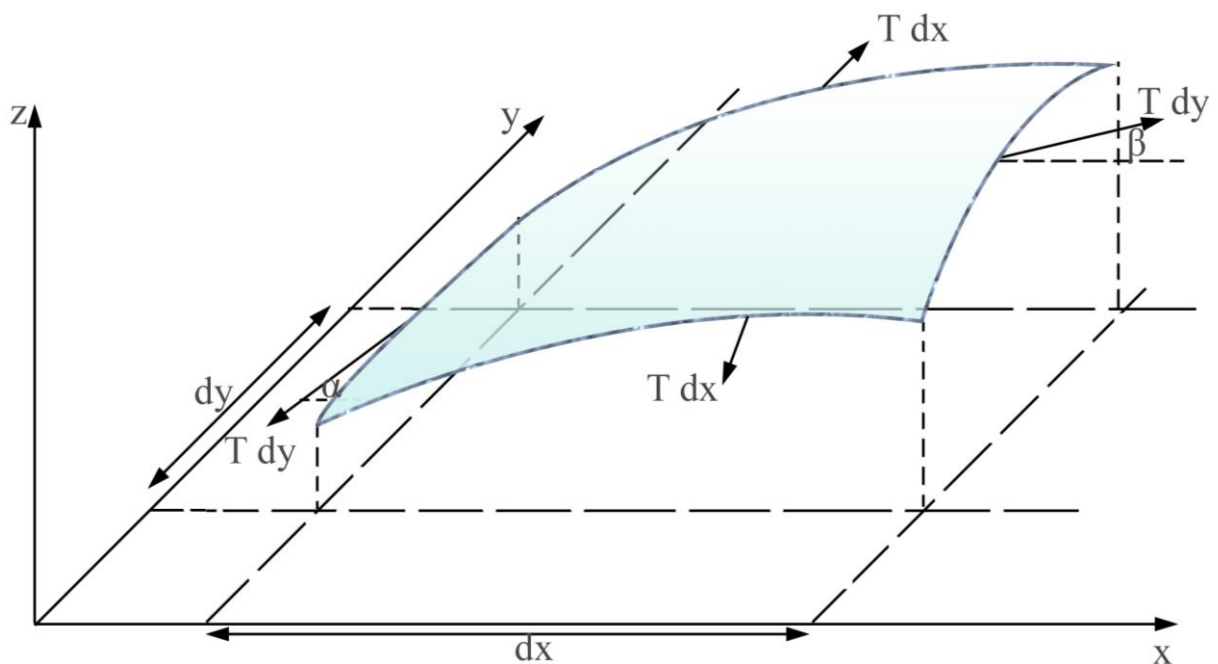
- Που αποτελούνται από μια μεμβράνη προσαρμοσμένη σε σώμα με κλειστή αέρινη κοιλότητα, όπως είναι το ορχηστρικό τύμπανο.
- Που αποτελούνται από μια μεμβράνη προσαρμοσμένη σε σώμα με ανοιχτή αέρινη κοιλότητα, όπως το bendir και τα congas.
- Που αποτελούνται από δυο μεμβράνες προσαρμοσμένες σε σώμα με κλειστή αέρινη κοιλότητα, όπως είναι το νταούλι και το ταμπούρο.

2.2.1. Θεωρητικά μοντέλα των κρουστών: Μεμβράνης, αέρινης κοιλότητας, πλαισίου

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν ένα σύστημα δύο διαστάσεων για την περιγραφή της κυματικής εξίσωσης της ορθογώνιας και παράλληλα της κυκλικής μεμβράνης, κάποια θεωρητικά μοντέλα για την προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν στα κρουστά όργανα όπως η αέρινη κοιλότητα και η θερμοκρασία και μια θεωρητική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του πλαισίου. Δηλαδή το πως δημιουργούνται και κατανέμονται οι κανονικοί τρόποι δόνησης (modes) της μεμβράνης και του πλαισίου.

2.2.1.1. Κυματική εξίσωση ορθογώνιας μεμβράνης

Για την εξήγηση της κυματικής εξίσωσης της μεμβράνης χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα δυο διαστάσεων. Το σύστημα αυτό αναφέρετε στην δυσκαμψία και παράλληλα στην εξάρτηση της ταλάντωσης της μεμβράνης από εξωτερικές δυνάμεις και από την τάση της. Αρχικά γίνεται μια απόδειξη του τύπου της κυματικής εξίσωσης για μια ορθογώνια μεμβράνη με διαστάσεις L_x και L_y με σταθερές τις άκρες της, με μια επιφανειακή τάση T και επιφανειακή πυκνότητα σ .



Όπως βλέπουμε και στην παραπάνω εικόνα, διεγείροντας την μεμβράνη με αποτέλεσμα να μετατοπίζεται σε μια απόσταση dz , η τάση της μεμβράνης αντιδρά και προσπαθεί να την επαναφέρει στην αρχική της θέση ισορροπίας. Οι δυνάμεις που ασκούνται στα άκρα της dx έχουν την τιμή $T dx$ και οι κάθετες συνιστώσες είναι $-T \sin \alpha dx$ και $-T \sin \beta dx$. Για μικρές τιμές του α και β ,

$$\sin a \approx \tan a = \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_{y+dy}$$

και

$$\sin b \approx \tan b = \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_y$$

Έτσι η δύναμη F του στοιχείου στην διάσταση z θα είναι

$$F_y = T dx \left[\left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_{y+dy} - \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_y \right] = T dx \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$$

ή

$$F_x = T dy \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} dx$$

Η συνισταμένη δύναμη της z κατεύθυνσης στα στοιχεία $dx dy$ είναι $F=F_x + F_y$, έτσι η εξίσωση της κίνησης είναι:

$$T dx dy \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) = \sigma dx dy \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$

ή

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{T}{\sigma} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) = c^2 \nabla^2 z.$$

Αυτή είναι μια κυματική εξίσωση των εγκάρσιων κυμάτων με ταχύτητα $c = \sqrt{T/\sigma}$. Γίνεται εύκολα επιλύσιμη γράφοντας την $z(x, y, t)$ ως γινόμενο τριών συναρτήσεων, όπου η κάθε μία θα έχει μία μεταβλητή: $z(x, y, t) = X(x)Y(y)\Phi(t)$. Άρα η δεύτερη παράγωγός του είναι

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{d^2 X}{dx^2} Y\Phi$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{d^2 Y}{dy^2} = X\Phi,$$

και

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{d^2 \Phi}{dt^2} XY,$$

ούτως ώστε η εξίσωση να προκύπτει

$$\frac{1}{\Phi} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \frac{c^2}{X} \frac{d^2 x}{dx^2} + \frac{c^2}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2}.$$

Η εξίσωση μπορεί να είναι αληθείς εάν κάθε άκρο της εξίσωσης είναι μία σταθερά, η οποία αντικαθιστάτε ως $-\omega^2$. Αυτό δίνει δυο εξισώσεις:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \omega^2 \Phi = 0,$$

με λύση $\Phi(t) = E \sin \omega t + F \cos \omega t$, και

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 x}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} = -\frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2}.$$

Πάλι κάθε άκρο πρέπει να ισούται με μια σταθερά, η οποία μπορεί να αντικατασταθεί ως k^2 . Αυτό δίνει

$$\frac{d^2 x}{dx^2} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - k^2 \right) X = 0,$$

με λύσεις $X(x) = A \sin \sqrt{(\omega^2/c^2) - k^2} x + B \cos \sqrt{(\omega^2/c^2) - k^2} x$, και

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} + k^2 Y = 0$$

με λύσεις $Y(y) = C \sin ky + D \cos ky$. Για μία ορθογώνια μεμβράνη με διαστάσεις L_x , L_y , στερεωμένη και στις τέσσερις πλευρές της, οι οριακές συνθήκες απαιτούν ότι $z = 0$ για $x = 0$, $x = L_x$, $y = 0$, και $y = L_y$. Από την πρώτη περίπτωση, παρατηρούμαι ότι $B = 0$, από την δεύτερη,

$$A \sin \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k^2} L_x = 0, \text{ έτσι } \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k^2} L_x = m\pi, \text{ και } X(x) = A \sin \frac{m\pi x}{L_x}, \quad \text{με το } m = 1, 2, \dots$$

Από την τρίτη όπου $D = 0$ και από την τέταρτη όπου $C \sin kL_y = 0$, έχουμε $kL_y = n\pi$ και $Y(y) = C \sin \left(\frac{n\pi}{L_y} \right) y$ με $n=1, 2, \dots$. Επομένως,

$$\begin{aligned} z_{mn} &= A \sin \frac{m\pi x}{L_x} \sin \frac{n\pi y}{L_y} (E \sin \omega t + F \cos \omega t) \\ &= \sin \frac{m\pi x}{L_x} \sin \frac{n\pi y}{L_y} (M \sin \omega t + N \cos \omega t), \\ &\quad m = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Για τον προσδιορισμό της συχνότητας των τρόπων ταλάντωσης, επιλύουμε ως προς ω την εξίσωση $\sqrt{(\omega^2/c^2) - k^2} = \frac{m\pi}{L_x}$ έτσι έχουμε:

$$\omega^2 = \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 c^2 + k^2 c^2 = \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 c^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2 c^2$$

και

$$f_{mn} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \sqrt{\frac{m^2}{L_x^2} + \frac{n^2}{L_y^2}}$$

m, n = 1, 2, ...

2.2.1.2. Κυματική εξίσωση κυκλικής μεμβράνης

Για μία κυκλική μεμβράνη, η κυματική εξίσωση, που περιγράφει το προηγούμενο φαινόμενο της εικόνας **εικ.3.7**, πρέπει να γραφεί σε πολικές συντεταγμένες θέτοντας $x = r \cos \varphi$ και $y = r \sin \varphi$.

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 z}{\partial \varphi^2} \right).$$

Οι λύσεις της μορφής $z(r, \varphi, t) = R(r) \Phi(\varphi) e^{j\omega t}$ μας οδηγούν στις εξισώσεις:

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{m^2}{r^2} \right) R = 0$$

και

$$\frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} + m^2 \Phi = 0$$

Η λύση της δεύτερης εξίσωσης είναι $\Phi(\varphi) = Ae^{\pm jm\varphi}$. Η πρώτη εξίσωση είναι μια Bessel εξίσωση της μορφής $(d^2 y/dx^2) + (1/x)(dy/dx) + [1 - (m^2/x^2)]y = 0$. Αντικαθιστώντας όπου $y=R$ και $x = kr = \omega r/c$. Οι λύσεις αυτών είναι εξισώσεις Bessel της σειράς m ($J_0(x), J_1(x), \dots, J_m(x)$) οι οποίες τείνουν στο μηδέν για πολλές τιμές του x.

Η νιοστή τιμή της $J_m(kr)$ θα μας δώσει την συχνότητα του τρόπου δόνησης $f_{(m,n)}$, η οποία θα έχει m κομβικές διαμέτρους και n κομβικούς κύκλους.

Αυτό το φαινόμενο που περιγράφηκε, συμβαίνει σε ιδανικές συνθήκες όπου η μεμβράνη δε στηρίζεται πάνω σε κάποιο πλαίσιο με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αέρινη κοιλότητα η οποία επιδρά σημαντικά στην χροιά του οργάνου. Για το λόγο αυτό θα δούμε παρακάτω τι συμβαίνει και πως ανταποκρίνεται στις δύο περιπτώσεις όπου ασχοληθήκαμε στη πειραματική μας διαδικασία. Στη περίπτωση όπου έχουμε μια μεμβράνη προσαρμοσμένη σε σώμα με ανοιχτή αέρινη κοιλότητα και στη περίπτωση όπου έχουμε δυο μεμβράνες προσαρμοσμένες σε σώμα με κλειστή αέρινη κοιλότητα.

- Η πρώτη περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ως ένα αντηχείο Helmholtz. Η βασική προϋπόθεση για την δημιουργία του ήχου βασίζεται στις δονήσεις που προκύπτουν λόγω της ελαστικότητας του αερίου. Έτσι σε μια κοιλότητα όπου έχει μόνο ένα άνοιγμα, ένα στόμιο, όπως είναι το μπουκάλι, εάν συμπιέσεις το αέριο του μέσω ενός αερίου πίδακα, τότε θα αυξηθεί η πίεση του και θα προσπαθεί να γυρίσει στην αρχική του θέση. Ο αέριος πίδακας θα εξαναγκάσει την αέρια μάζα να κινηθεί προς τα κάτω κατά το μήκος του λαιμού, με αποτέλεσμα να συμπιέσει το αέριο. Αυτή η πίεση που δημιουργήθηκε θα οδηγήσει αυτή τη αέρια μάζα προς τα έξω δηλαδή προς την αρχική της θέση, λόγω εμπέδησης όμως της ατμοσφαιρικής πίεσης με της πεπιεσμένης πίεσης του εσωτερικού θα δυσκολευτεί να επανέλθει πλήρως και έτσι μέρος του πεπιεσμένου πίεσης αέρα θα γυρίσει ξανά στην κοιλότητα και θα δημιουργήσουν μια αποσβεστική εξαναγκασμένη ταλάντωση όπως ακριβώς συμβαίνει και με ένα σύστημα ελατηρίου μάζας.



Ο τύπος που υπολογίζει την συχνότητα συντονισμού ενός αντηχείου Helmholtz είναι:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha}{Vl}}$$

όπου c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα 343 m/s στους 20 βαθμούς Κελσίου, α η επιφάνεια του λαιμού, V ο όγκος του αντηχείου (m^3) και l το μήκος του λαιμού.

Σημαντική διαφορά μεταξύ του θεωρητικού μοντέλου του αντηχείου Helmholtz με τα κρουστά αυτής της κατηγορίας είναι ότι το αντηχείο του Helmholtz δεν έχει καθόλου ελαστικότητα σε αντίθεση με την μεμβράνη και το πλαίσιο τα οποία έχουν ελαστικότητα.

Μία άλλη προσέγγιση του φαινομένου αυτού είναι η θεώρησή του ως ένα μοντέλο σωλήνα ανοιχτού στο ένα άκρο και κλειστού στο άλλο. Σε αυτή την περίπτωση η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού αντιστοιχεί σε ένα στάσιμο κύμα όπου στο κλειστό άκρο έχουμε δεσμό μετατόπισης και στο ανοιχτό άκρο κοιλία. Η απόσταση μεταξύ ενός δεσμού και μίας κοιλίας είναι $\lambda/4$. Έτσι για την δημιουργία στάσιμων κυμάτων θα πρέπει ο σωλήνας να καλυφθεί με το περιττό πολλαπλάσιο του $\lambda/4$. Δηλαδή $L = (2K + 1)\lambda/4$ όπου $K = 0, 1, 2, \dots$

Δεδομένου ότι η ταχύτητα του ήχου δίνεται από το τύπο $c = \lambda f$ η εξίσωση προκύπτει:

$$L = (2K + 1) \frac{c}{4f}$$

Για την πρώτη αρμονική-θεμελιώδεις συχνότητα η τιμή του $K = 0$ ενώ $K = 1, 2, 3, \dots$ για τις υπόλοιπες αρμονικές του σωλήνα.

Οπότε η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού του σωλήνα θα είναι:

$$f = \frac{c}{4L}$$

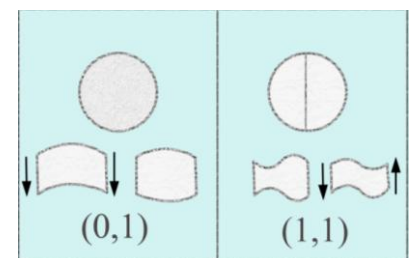
όπου c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα 343 (m/s) και L (m) το μήκος του σωλήνα.

- Για την περιγραφή της δεύτερης περίπτωσης, η οποία είναι πιο περίπλοκη από την πρώτη περίπτωση, μπορεί να προσομοιωθεί ένα σύστημα τριών ελατηρίων και δύο μαζών για την εξήγηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο μεμβρανών.

Στο σύστημα αυτό των δυο μαζών θα έχουμε δυο τρόπους ταλάντωσης όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Στη πρώτη περίπτωση βλέπουμε της μάζες να κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις ενώ στη δεύτερη προς την ίδια κατεύθυνση. Τα δυο εξωτερικά ελατήρια αντιστοιχούν στην τάση των δύο μεμβρανών, ενώ το κεντρικό ελατήριο αντιστοιχεί στην ελαστικότητα της αέρινη κοιλότητας και του πλαισίου όπου στηρίζονται οι δύο μεμβράνες. Για παράδειγμα ο συντονισμός 0,1 και 1,1 σε μια κάθετη οπτική θα είναι όπως στην εικόνα.



Για την εύρεση των συχνοτήτων των τρόπων ταλάντωσης στην περίπτωση αυτή θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο του σωλήνα κλειστός και στα δύο του άκρα. Σε αυτή την περίπτωση στα δύο άκρα του σωλήνα θα έχουμε δεσμούς μετατόπισης. Για την επίτευξη της θεμελιώδους συχνότητας θα πρέπει να έχουμε δύο δεσμούς μετατόπισης στα άκρα του σωλήνα και μία κοιλία στο κέντρο του. Το μήκος κύματος του κανονικού τρόπου ταλάντωσης του αέρα του σωλήνα δίνεται από τον τύπο: $\lambda = 2L/n$ όπου $n = 1, 2, 3, \dots$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της ταχύτητας του ήχου $c = \lambda f$, οι συχνότητες συντονισμού του σωλήνα θα δίνονται από τον τύπο :

$$f = \frac{c n}{2 L}$$

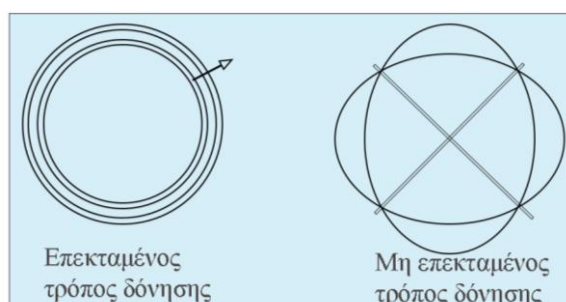
όπου c η ταχύτητα του ήχου στον αέρα 343 (m/s) και L (m) το μήκος του σωλήνα.

2.2.1.3. Τρόποι δόνησης πλαισίου

Τα κυλινδρικά πλαίσια των κρουστών μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως πλαίσια υποστήριξης των μεμβρανών είτε ως αυτόνομα μουσικά όργανα σε διάφορες διαστάσεις όπως είναι τα ορχηστρικά chimes. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα αναφερθούμε μόνο στην πρώτη περίπτωση των πλαισίων.

Όταν το πλαίσιο χρησιμοποιείται ως υποστήριξη των μεμβρανών, παρατηρούνται δυο ειδών τρόποι δόνησης του, όπως θεμελιώθηκαν από τους Love (1888) και Rayleigh (1894).

Η πρώτη περίπτωση είναι οι χαμηλότεροι επεκταμένοι τρόποι δόνησης, στους οποίους υπάρχει μία πρώτης τάξης μετασχηματισμοί του μήκους της γραμμής σχεδίασης της επιφάνειας του πλαισίου οι οποίοι σχετίζονται με τις ελαστικές δυνάμεις του κι έτσι δημιουργούνται δυνάμεις επαναφοράς. Διαμορφώνοντας έτσι το πλαίσιο ως μία ομοιόμορφη ακτινική μετατόπιση των τοιχωμάτων. Επομένως η παράμετρος που κάνει το πλαίσιο πιο δύσκαμπτο σε αυτές τις παραμορφώσεις και κατάλληλο να υποστηρίξει την τάση των μεμβρανών είναι η κυρτότητά του. Άρα η εφαπτόμενη δύναμη συμπίεσης στα τοιχώματα του πλαισίου θα είναι rT , όπου r η ακτίνα του τυμπάνου και T η τάση των μεμβρανών. Με αποτέλεσμα η συμπίεσμένη πίεση στο εσωτερικό ενός μικρού τυμπάνου με μέτριο πάχος πλαισίου να μην προκύπτει μεγάλη.



Η δεύτερη περίπτωση είναι οι μη επεκταμένοι ή καμπτικοί τρόποι δόνησης. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει πρώτη τάξης μετασχηματισμοί του μήκους της γραμμής σχεδίασης της επιφάνειας του πλαισίου και οι δυνάμεις επαναφοράς σχετίζονται μόνο από την καμπτική δυσκαμψία του πλαισίου. Στην περίπτωση των χαμηλών τρόπων δόνησης, το τύμπανο μπορεί να καταστραφεί από μία εξωτερική δύναμη. Για την αποφυγή αυτής της καταστροφής βοηθά η τάση των μεμβρανών. Έτσι όταν η μεμβράνη διεγείρεται προς τα άκρα της, μακριά από το κέντρο, προκύπτουν πιέσεις με γωνιακή εξάρτηση όπως $\cos n\varphi$ στο πλαίσιο, οι οποίες είναι ικανές να διεγείρουν τους μη επεκταμένους τρόπους δόνησης με την ίδιο γωνιακό πρότυπο. Στην περίπτωση των υψηλών τρόπων δόνησης η μετατόπιση είναι της μορφής $\cos(k_n z + \beta) \cos m\varphi$, όπου z η αξονική συντεταγμένη και φ η γωνιακή συντεταγμένη. Γενικά η μη επεκταμένοι τρόποι δόνησης έχουν πολλούς πόλους μερικοί των οποίων κινούνται και σε αντίθετη κατεύθυνση.



Κατά αυτό τον τρόπο οι κανονικοί τρόποι ταλάντωσης του κυλινδρικού πλαισίου δημιουργούνται από m κομβικές γραμμές n κομβικούς κύκλους όπως φαίνονται στην εικόνα.



2.2.1.4. Η παράμετρος της θερμοκρασίας στα κρουστά

Μία άλλη παράμετρος που συντελεί στην τελική χροιά και στην τονικότητα των κρουστών μουσικών οργάνων, είναι η θερμοκρασία. Μια αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας θα αλλάξει της ιδιότητες του υλικού όπως είναι η επιφανειακή πυκνότητα και κατ επέκταση η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο στερεό αυτό υλικό. Γι αυτό το λόγο επηρεάζονται περισσότερο μεμβράνες φυσικών δερμάτων και όχι τόσο συμβατικές (πλαστικές). Στην περίπτωση των μεμβρανών με φυσικά δέρματα ζώων η μεμβράνη έχει κάποια φυσική υγρασία που την βοηθά να προσαρμόζεται με διάφορες θερμοκρασίες χωρίς να καταστρέφεται. Στην περίπτωση όμως των συμβατικών μεμβρανών, αυτή η φυσική υγρασία και η πορώδης επιφάνεια του φυσικού δέρματος λείπει, με αποτέλεσμα η αλλαγές που θα συμβούν θέτοντας υψηλές θερμοκρασίες, να είναι μόνιμες και μη επιστρέψιμες στην αρχική τους κατάσταση. Κάποιο θεωρητικό μοντέλο που να εξηγεί αυτή την αλληλεπίδραση της θερμοκρασίας με τις μεμβράνες των φυσικών δερμάτων δεν έχει θεωρηθεί μέχρι στιγμής σε κάποια βιβλιογραφία, αλλά χρησιμοποιείται πρακτικά από τους μουσικούς για την αύξηση ή μείωση της τονικότητας του κρουστού μουσικού οργάνου.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΔΟΝΗΣΗΣ ΚΡΟΥΣΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση των διάφορων τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη των κανονικών τρόπων δόνησης των κρουστών. Χρησιμοποιήθηκαν οπτικές και ακουστικές τεχνικές μέτρησης για τον εντοπισμό των modes και μια τεχνική μέτρησης της θερμοκρασίας της μεμβράνης του κρουστού. Η οπτική τεχνική μέτρηση που χρησιμοποιήθηκε ανήκει στην οικογένεια της ολογραφίας. Πιο συγκεκριμένα είναι μια υποκατηγορία της ολογραφικής συμβολομετρίας, η ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίων (E. S. P. I.) η οποία θα εξηγηθεί λεπτομερέστερα στην συνέχεια. Οι ακουστικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η ηχογράφηση και η μετέπειτα ανάλυση του κρουστού και η μέτρησης της ταχύτητας του ήχου της μεμβράνης όταν διεγείρεται από ένα σφυράκι κρούσης.

3.1. ΟΠΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Για την ανάλυση των αντικειμένων χρησιμοποιούνται ευρέως διάφορες οπτικές τεχνικές. Ιδιαίτερα χρήσιμες είναι εκείνες οι οποίες δεν προκαλούν καταστρεπτική ανάλυση των αντικειμένων. Για το λόγο αυτό για την επιτυχημένη χρήση της κατάλληλης τεχνικής, η επιλογή θα πρέπει να βασίζεται στα χαρακτηριστικά του αντικειμένου και στο είδος της ζητούμενης πληροφορίας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η χρήση της κατάλληλης τεχνικής θα είναι επιτυχημένη γιατί, με τον τρόπο αυτό θα εξασφαλίσουμε κατάλληλες πληροφορίες για το αντικείμενο χωρίς να αλλάξει η κατάστασή του όταν προσπίπτει ένα οπτικό κύμα πάνω του και ακόμη η πληροφορία που θα μεταφέρεται από το οπτικό κύμα να είναι σε πολύ μικρή χωρική κλίμακα, εξαιτίας του μικρού μήκους κύματος του φωτός.

3.1.1. ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ

Ο Dennis Gabor το 1948 είναι ο πρώτος που επινόησε τον όρο ολογραφία, η οποία προέρχεται από τις λέξεις «όλος» και «γραφή». Η ολογραφία είναι μία τεχνική που δίνει τη δυνατότητα της καταγραφής του πλάτους και της φάσης του ηλεκτρικού πεδίου ενός αντικειμένου αποδίδοντας τη λήψη φωτογραφιών τριών διαστάσεων.

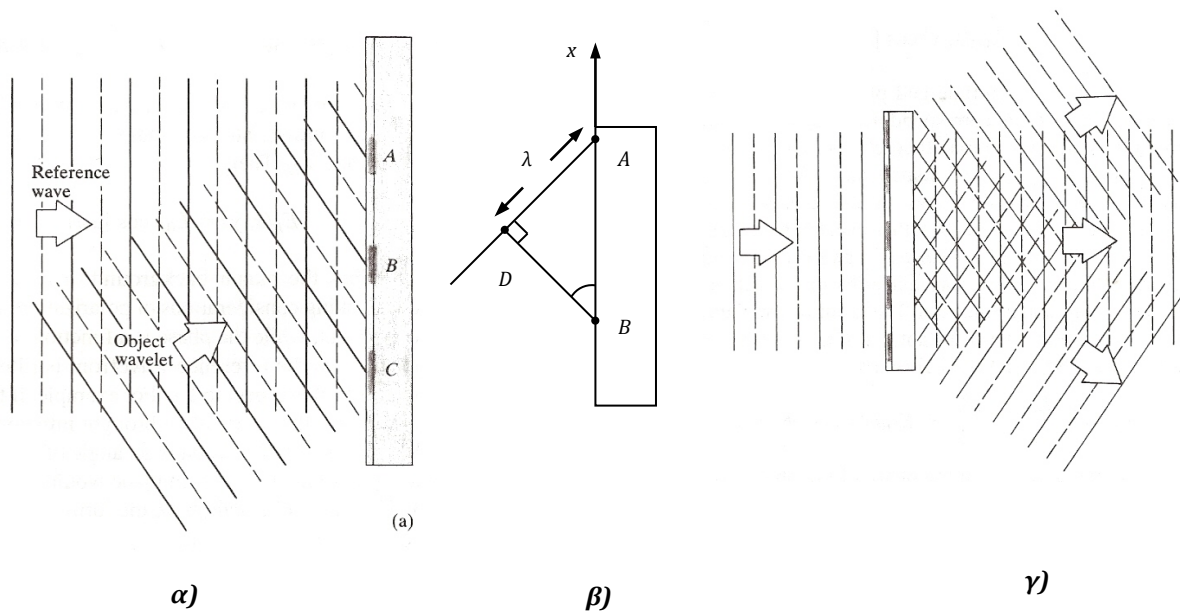
Στην απλή φωτογραφία η κατανομή της φωτεινής έντασης ενός τρισδιάστατου αντικειμένου καταγράφεται σε δύο διαστάσεις με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται

μια απλή χαρτογράφηση της φωτεινής δέσμης από το φωτογραφικό φιλμ. Με αυτόν τον τρόπο ο παρατηρητής δεν είναι σε θέση να δει το αρχικό αντικείμενο σε τρεις διαστάσεις, σαν να είναι εκείνη τη στιγμή μπροστά του, γιατί το αποτέλεσμα που βλέπουμε στην φωτογραφία δεν είναι πιστή αναπαραγωγή του ηλεκτρικού πεδίου που έχει φωτίσει το αντικείμενο, αλλά μόνο του τετραγώνου του πλάτους του ηλεκτρικού πεδίου αυτού. Για το λόγο αυτό η ολογραφία είναι μία τεχνική που επιτρέπει την καταγραφή τόσο του πλάτους όσο και της φάσης του αρχικού ηλεκτρικού πεδίου αποδίδοντας φωτογραφίες σε τρεις διαστάσεις και προτάθηκε ως τρόπος βελτίωσης των ηλεκτρικών μικροσκοπίων, όπου η αξία και οι δυνατότητές της αξιοποιήθηκαν μετά την εφεύρεση του laser.

Με αυτόν τον τρόπο λοιπόν καταγράφεται η συνολική πληροφορία για το αντικείμενο σε αντίθεση με την φωτογραφία. Στην τεχνική της ολογραφία απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη μίας δέσμης σύμφωνης ακτινοβολίας (laser), η οποία διαχωρίζεται με έναν διαχωριστή δέσμης σε δύο μέρη για την ταυτόχρονη καταγραφή της φωτεινής έντασης και της φάσης. Το ένα μέρος, το οποίο αποτελεί τη δέσμη αναφοράς, κατευθύνεται απ' ευθείας στο καταγραφικό υλικό (π.χ. μια φωτογραφική πλάκα), ενώ το άλλο μέρος, το οποίο αποτελεί τη δέσμη αντικειμένου, φωτίζει το αντικείμενο που είναι προς ολογράφηση. Το σκεδαζόμενο φως του αντικειμένου μαζί με την δέσμη αναφοράς συμβάλλουν πάνω στην φωτογραφική πλάκα και δημιουργούν χαρακτηριστικό διάγραμμα συμβολής που αποτελείται από κροσσούς συμβολής, που περιέχουν μία πλήρης καταγραφή του αρχικού αντικειμένου και οι τυχόν παρεκκλίσεις του (π.χ. λόγω κίνησης) να αποδίδονται σε διαφορές φάσης στην δέσμη του αντικειμένου.

Αν η εμφανισμένη πλάκα λάβει την αρχική της θέση, δηλαδή τη θέση όταν εκτέθηκε στο φως, και το αντικείμενο προς ολογράφηση απομακρυνθεί, τότε όταν η πλάκα φωτιστεί με δέσμη ανακατασκευής ίδια με την δέσμη αναφοράς, το αρχικό αντικείμενο ανακατασκευάζεται πλήρως σε ένταση και φάση και το είδωλο εμφανίζεται τρισδιάστατο. Το φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται λόγω της περίθλασης της δέσμης ανακατασκευής από το διάγραμμα συμβολής της φωτογραφικής πλάκας που καταγράφεται, με αποτέλεσμα παρατηρώντας το αντικείμενο από διαφορετικά σημεία να μας δίνει την εντύπωση, ότι το αντικείμενο περιστρέφεται, ακριβώς όπως εάν ήταν ακόμη εκεί.

Θεωρώντας την απλή εκδοχή συμβολής δύο κυμάτων θα καταλάβουμε καλύτερα την ύπαρξη αυτού του φαινομένου και την απλή μαθηματική του ανάλυση. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα (Σχήμα 3.1), η δέσμη αναφοράς έχει κορυφή κατά μήκος του επιπέδου της προσόψεως της φωτογραφικής πλάκας, ενώ το σκεδασμένο από το αντικείμενο φως έχει κορυφές στα σημεία A, B και C και προσπίπτει υπό γωνία θ στην φωτογραφική πλάκα. Καθ' όλη τη διάρκεια που τα κύματα κατευθύνονται προς τα δεξιά, όπως στο σχήμα, θα παραμείνουν σε φάση στα σημεία αυτά, οι κοιλίες του ενός θα επικαλύπτονται από τις κοιλίες του άλλου και τα μέγιστα θα εμφανίζονται στα σημεία A, B και C.



Σχήμα 3.1: α) Συμβολή δύο κυμάτων, β) σχέση φάσης και μετατόπισης, και γ) ανακατασκευή αντικειμένου

Καθώς όμως τα κύματα προχωρούν (με κατεύθυνση προς τα δεξιά στο σχήμα) θα παραμείνουν σε φάση στα σημεία αυτά, οι κοιλίες του ενός θα επικαλύπτονται με τις κοιλίες του άλλου, και τα μέγιστα θα παραμείνουν στα σημεία A, B και C. Παρομοίως, ανάμεσα στα σημεία αυτά, η κοιλία του ενός θα επικαλύπτεται με την κορυφή του άλλου, οπότε θα εμφανιστούν ελάχιστα συμβολής. Η σχετική φάση ϕ των δύο κυμάτων, η οποία μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο πάνω στη φωτογραφική πλάκα, μπορεί να γραφεί ως συνάρτηση του x (σχήμα 3.1.β). Η φάση ϕ

αλλάζει κατά 2π καθώς το x αλλάζει κατά \overline{AB} , οπότε $\varphi/2\pi = x/\overline{AB}$.
Επειδή $\sin\theta = \lambda/\overline{AB}$, η φάση γράφεται

$$\varphi(x) = (2\pi x \sin\theta) / \lambda$$

Θεωρώντας ότι τα δύο κύματα έχουν το ίδιο πλάτος E_0 το ηλεκτρικό πεδίο συμβολής είναι:

$$E = 2E_0 \cos\frac{1}{2}\varphi \sin(\omega t - kx - \frac{1}{2}\varphi)$$

και η κατανομή της έντασης, η οποία είναι ανάλογη του τετραγώνου του ηλεκτρικού πεδίου, είναι της μορφής:

$$I(x) = 2c\varepsilon_0 E_0^2 + 2c\varepsilon_0 E_0^2 \cos\varphi$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται κατανοητή η ύπαρξη μιας συνημιτονοειδούς κατανομή της έντασης κατά μήκος του επιπέδου της φωτογραφικής πλάκας, όπου με την εμφάνιση αυτής της φωτογραφικής πλάκας γίνεται εμφανές το αποτέλεσμα της ύπαρξης ενός συνημιτονοειδούς φράγματος περίθλασης. Με το φωτισμό αυτού του απλού ολογράμματος μέσω ενός επίπεδου κύματος ίδιου με τη δέσμη αναφοράς θα εμφανιστούν τρεις δέσμες: μία δέσμη μηδενικής τάξης και δύο δέσμες πρώτης τάξης. Η μία δέσμη της πρώτης τάξης θα ακολουθεί την πορεία του αρχικού αντικειμένου, η οποία αντιστοιχεί στο ανακατασκευασμένο αντικείμενο.

Για την επίτευξη μιας επιτυχημένης ολογραφίας καθοριστικό ρόλο παίζουν οι παρακάτω παράγοντες:

- Κατά την έκθεση της πλάκας δεν πρέπει να αλλάξουν οι θέσεις του αντικειμένου, της πλάκας και της δέσμης laser, οπότε όλα αυτά θα πρέπει να είναι τοποθετημένα σε μέρος με απουσία δονήσεων. Οι συγκεκριμένες θέσεις μπορούν να αλλάξουν μόνο λιγότερο από το μισό μήκος κύματος του laser, ώστε να αποφύγουμε την αμαύρωση της συμβολής.
- Η φωτογραφική πλάκα είναι σημαντικό να έχει αρκετά μεγάλη διακριτική ικανότητα για να μπορεί να καταγράφει τους κροσσούς συμβολής.
- Η ύπαρξη επαρκούς μήκους συμφωνίας της δέσμης laser για τον σχηματισμό των κροσσών συμβολής στην πλάκα.

3.1.1.1. ΜΗΚΟΣ ΣΥΜΦΩΝΙΑΣ

Το μήκος συμφωνίας είναι η απόσταση διάδοσης του κύματος μέσα στην οποία το κύμα διατηρεί έναν ορισμένο βαθμό συμφωνίας. Για κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα (H/M) ισχύουν οι έννοιες της χρονικής και της χωρικής συμφωνίας.

Η χρονική συμφωνία είναι άμεσα συνδεδεμένη με την μονοχρωματικότητα της πηγής laser. Για τον ορισμό της χρονικής συμφωνία θεωρούμε το ηλεκτρικό πεδίο του H/M κύματος σε δεδομένο σημείο Π για χρόνους t και $t + \tau$. Για διάφορες χρονικές στιγμές συμβαίνουν οι εξής περιπτώσεις. Αν η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο τιμών του πεδίου παρουσιάζεται η ίδια για κάθε χρονική στιγμή t , για δεδομένη χρονική υστέρηση τ , μπορούμε να ισχυριστούμε την ύπαρξη χρονικής συμφωνίας για ένα χρονικό διάστημα τ , και αν αυτό συνεχίζει να συμβαίνει για κάθε τιμή του τ , τότε το H/M κύμα εμφανίζει τέλεια χρονική συμφωνία. Όμως το κύμα μπορεί να παρουσιάζεται και με μερική χρονική συμφωνία με χρόνο συμφωνίας ίσο με τ_0 , αν το παραπάνω συμβαίνει για χρονική υστέρηση τ , τέτοια ώστε $0 < \tau < \tau_0$. Συγκεκριμένα, ένα H/M κύμα με χρόνο συμφωνίας τ_0 έχει εύρος ζώνης $\Delta\nu = 1/\tau_0$.

Στη χωρική συμφωνία θεωρούμε την ύπαρξη δύο σημείων Π1 και Π2, όπου για χρόνο $t=0$ βρίσκονται στο ίδιο κυματομέτωπο, με αντίστοιχα ηλεκτρικά πεδία $E_1(t)$ και $E_2(t)$. Η διαφορά μεταξύ των φάσεων των δύο πεδίων για χρόνο $t=0$ πρέπει να είναι μηδέν. Αν η συγκεκριμένη διαφορά συνεχίζει να παρουσιάζεται με την τιμή μηδέν για κάθε χρονική στιγμή $t > 0$, τότε διαφαίνεται η ύπαρξη της τέλει συμφωνίας μεταξύ των δύο σημείων και αν αυτό εξακολουθεί να εμφανίζεται για κάθε δύο σημεία του H/M κυματομέτρου μπορούμε να ισχυριστούμε ότι το κύμα παρουσιάζει ιδανική χωρική συμφωνία. Εκτός από την ιδανική χωρική συμφωνία το κύμα μπορεί να εμφανίζει μερική χωρική συμφωνία, η οποία κατά την πράξη σημαίνει ότι για κάθε σημείο Π1, το σημείο Π2 πρέπει να βρίσκεται μέσα σε κάποια πεπερασμένη περιοχή γύρω από το Π1 για να έχουμε καλό φασικό συσχετισμό και για κάθε σημείο Π, να μπορούμε να εισαγάγουμε μια κατάλληλα ορισμένη περιοχή συμφωνίας $S_c(\Pi)$.

Για το φαινόμενο της συμβολής έχει ιδιαίτερη σημασία το μήκος συμφωνίας γιατί μπορεί να έχουμε συμβολή μέσα στο μήκος συμφωνίας της πηγής και όχι πέρα από αυτό. Ο ορισμός για το μήκος συμφωνίας μπορεί να αποδοθεί ως η διαφορά δρόμου μιας δέσμης laser που συμβάλλει με το εαυτό της (π.χ σε ένα συμβολόμετρο Michelson) η οποία αντιστοιχεί σε μείωση της ορατότητας των κροσσών συμβολής (fringe visibility) κατά 50%, όπου η ορατότητα κροσσών V , ορίζεται ως :

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

όπου I_{\max} και I_{\min} η μέγιστη και η ελάχιστη ένταση των κροσσών αντίστοιχα.

3.1.2. ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ

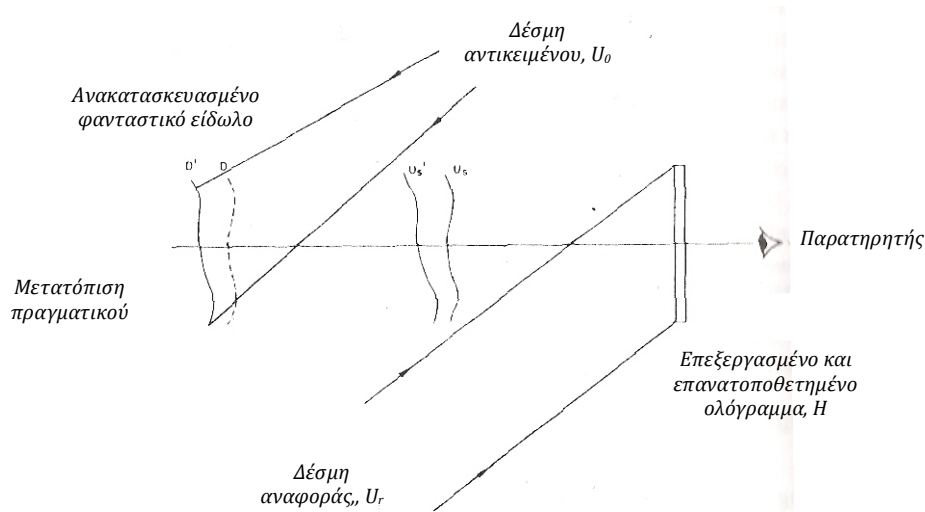
Η τεχνική της ολογραφικής συμβολομετρίας αποτελεί μία από τις σημαντικές τεχνικές μελέτης των αλλαγών της επιφάνειας αντικειμένων, αφού μας δίνει τη δυνατότητα να προβούμε στην συμβολομετρική ανάλυση στατικών και δυναμικών αλλαγών μιας οπτικά ανώμαλης επιφάνειας και αυτό αποτελεί το σημαντικό της πλεονέκτημα έναντι της κλασσικής συμβολομετρίας, η οποία υποστηρίζει ότι η μελέτη των αλλαγών αυτών θα πρέπει να στηρίζεται σε επιφάνεια οπτικά ομαλή.

Η ολογραφική καταγραφή μιας σκεδάζουσας επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της κίνησής της και να εμφανίζεται με τρεις τρόπους. Την τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας απλής έκθεσης, την τεχνική διπλής έκθεσης και την χρονικά ολοκληρωμένη μέθοδο.

Όπως αναφερθήκαμε παραπάνω, το επεξεργασμένο ολόγραμμα δίνει τη δυνατότητα ανακατασκευής ενός φανταστικού ειδώλου του αρχικού αντικείμενου. Αν το αντικείμενο υποστεί μία μικρή στατική μετατόπιση, ικανή να δημιουργήσει μια μικρή διαφορά φάσης μεταξύ των δύο κυματομετώπων, τότε έχουμε την παρουσία κροσσών συμβολής.

Έτσι, σύμφωνα με το σχήμα 3.2, κατά την τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας απλής έκθεσης το αντικείμενο κατέχει την αρχική του θέση σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων και γίνεται η καταγραφή του ολογράμματος H . Έπειτα γίνεται επεξεργασία του ολογράμματος και επανατοποθετείται στην αρχική του θέση, ώστε το φανταστικό είδωλο D , να επικαλύπτεται ακριβώς με το αντικείμενο. Η δέσμη

αναφοράς είναι U_r και το μετατοπισμένο αντικείμενο D' φωτίζεται με την αρχική δέσμη αντικειμένου U_o . Το κυματομέτωπο U_s αποτελεί το κυματομέτωπο του φανταστικού ειδώλου και το U_s' είναι το σκεδασμένο κυματομέτωπο από το μετατοπισμένο αντικείμενο, όπου και τα δύο συμβάλλουν στην απόδοση κροσσών συμβολής, η μορφή των οποίων εξαρτάται από τη γεωμετρία της μετατόπισης και τη θέση παρατήρησης.



Μια άλλη παραλλαγή είναι η τεχνική της *διπλής έκθεσης*, όπου αρχικά καταγράφεται ολόγραμμα του αρχικού αντικειμένου, και στη συνέχεια και πριν την επεξεργασία του ολογράμματος, το ολόγραμμα εκτίθεται στο φως από το μετατοπισμένο αντικείμενο. Το αποτέλεσμα είναι δύο επικαλυπτόμενα ανακατασκευασμένα κύματα, τα οποία δίνουν κροσσούς συμβολής, χαρακτηριστικούς της μετατόπισης του αντικειμένου (δηλαδή της διαφοράς στον οπτικό δρόμο).

Μια τρίτη παραλλαγή, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη γρήγορα ταλαντούμενων αντικειμένων με μικρό πλάτος ταλάντωσης, είναι η *χρονικά ολοκληρωμένη μέθοδος*. Στην τεχνική αυτή η φωτογραφική πλάκα εκτίθεται στο φως για σχετικά μεγάλο χρόνο, κατά τον οποίο το δονούμενο αντικείμενο έχει εκτελέσει έναν αριθμό ταλαντώσεων. Το ολόγραμμα που προκύπτει μπορεί να θεωρηθεί ως η υπέρθεση πολλαπλών εικόνων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός σχήματος στάσιμου κύματος.

3.1.3. E. S. P. I. (Electronic Speckle Pattern Interferometry)

Η ιστορική εξέλιξη της τεχνικής ESPI ξεκινάει έπειτα από ένα χρόνο εισαγωγής της ιδέας της συμβολής δύο σύμφωνων πεδίων τυχαίας φάσης πριν και μετά την παραμόρφωση ενός αντικειμένου, κατά την χρονική περίοδο του 1971. Η συγκεκριμένη τεχνική σημείωσε ιδιαίτερη σημαντικότητα και ανάπτυξη μετά την εισαγωγή της πειραματικής τεχνικής της ελεγχόμενης μετατόπισης φάσης και της ψηφιακής ανάλυσης κροσσών με ηλεκτρονικό υπολογιστή, σημειώνοντας αξιόλογη ερευνητική δραστηριότητα σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Σήμερα αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές συμβολομετρικές τεχνικές στη μελέτη δονήσεων ή παραμορφώσεων αντικειμένων.

Η τεχνική ESPI ανήκει στις τεχνικές ψηφιακής συμβολομετρίας ψηφιδών, η οποία αποτελεί μία σημαντική κατηγορία μέσα από την ύπαρξη πληθώρας μη καταστρεπτικών συμβολομετρικών τεχνικών όπως TV holography, electronic holography, phase-shifting speckle pattern interferometry). Η κατηγορία της συμβολομετρίας ψηφιδών χρησιμοποιείται σαν όρος όταν ένα από τα συμβάλλοντα πεδία είναι ένα πεδίο ψηφιδών, το οποίο προκύπτει από την ανάκλαση φωτός από μια οπτικά ανώμαλη επιφάνεια. Η λέξη «ψηφίδα» περιγράφει την διάστικτη, κοκκιδωτή και τυχαία φύση της κατανομής έντασης του ανακλώμενου φωτός, όπως αυτή παρατηρείται σε κάποια απόσταση από το αντικείμενο.

Η τεχνική ESPI συνδέεται σημαντικά με την ολογραφική συμβολομετρία, αφού και οι δύο τεχνικές παρέχουν την ίδια ευαισθησία, ωστόσο η τεχνική E.S.P.I. απλουστεύει την πειραματική διαδικασία δίχως να απαιτεί την καταγραφή ολογράμματος και με την χρήση της κάμερας ως ψηφιακό καταγραφικό δίνει τη δυνατότητα και το πλεονέκτημα καταγραφής και ταυτόχρονης απεικόνισης των κροσσών σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η καταγραφή των κροσσών με την τεχνική E.S.P.I. είναι λιγότερο ευκρινείς σε σχέση με την ολογραφική συμβολομετρία.

Περιγραφικά, η βασική διάταξη E.S.P.I. περιλαμβάνει την καταγραφή δύο δεσμών laser σε μία CCD κάμερα, από τις οποίες η μία προέρχεται από ανάκλαση στην υπό εξέταση δονούμενη επιφάνεια (δέσμη αντικειμένου) και η άλλη είναι αναπόσπαστο κομμάτι της αρχικής δέσμης laser που οδηγείται απ' ευθείας στην CCD κάμερα (δέσμη αναφοράς). Όλη η τεχνική είναι μία διαδικασία αφαίρεσης ή

πρόσθεσης διαδοχικών εικόνων που καταγράφονται καθώς το αντικείμενο μετακινείται.

Η χρονικά ολοκληρωμένη E.S.P.I. χρησιμοποιείται για την μελέτη περιοδικών αρμονικών παραμορφώσεων, όπου τα δεδομένα λαμβάνονται με την μορφή τηλεοπτικών καρτέ με μεγάλους χρόνους έκθεσης σε σχέση με την περίοδο κίνησης.

Παρακάτω, για την καλύτερη κατανόηση, γίνεται αναφορά στη μαθηματική θεώρηση της τεχνικής E.S.P.I. και περιγράφεται λεπτομερώς η πειραματική διάταξη και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη των κρουστών μουσικών οργάνων.

3.1.3.1. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

Σε αυτό το τμήμα του κεφαλαίου θα γίνει περιγραφή των βασικών μαθηματικών αρχών που αφορούν τα αρμονικά ταλαντευμένα σώματα με την συγκεκριμένη χρονικά ολοκληρωμένη τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των κρουστών μουσικών οργάνων, δηλαδή αυτή της αφαίρεσης διαδοχικών εικόνων.

Θεωρούμε μια εγκάρσια αρμονικά δονούμενη επιφάνεια και ότι η απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας, w , σε κάθε σημείο της επιφάνειας (x,y) για κάθε χρονική στιγμή, t , είναι της μορφής:

$$w(x,y,t) = A(x,y)\cos[\omega t + \phi_0(x,y)] \quad (3.1)$$

όπου $A(x,y)$ είναι η κατανομή του πλάτους ταλάντωσης πάνω στην επιφάνεια, ω η κυκλική συχνότητα της ταλάντωσης και $\phi_0(x,y)$ η κατανομή της φάσης δόνησης πάνω στην επιφάνεια. Η κατανομή φωτεινής έντασης που ανιχνεύει η κάμερα μέσα στο χρόνο έκθεσης, τ , είναι:

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left[I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cdot \cos \left[\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta) A \cos(\omega t + \varphi_0) \right] \right] dt \quad (3.2)$$

όπου I_A και I_B είναι οι κατανομές έντασης των δεσμών αντικειμένου και αναφοράς αντίστοιχα, φ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο παραπάνω δεσμών, λ είναι το μήκος κύματος της πηγής laser, και θ είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης φωτισμού του αντικειμένου και της διεύθυνσης παρατήρησης. Στην περίπτωσή μας.

$\theta \cong 0^\circ$. Θέτοντας $\Gamma = 4\pi/\lambda$ και $t = 2m\pi/\omega$, όπου m είναι ακέραιος, και ολοκληρώνοντας από την εξίσωση (3.2) προκύπτει ότι:

$$I_1 = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} |(\cos \varphi) J_0(\Gamma A)| \quad (3.3)$$

όπου J_0 είναι η συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης πρώτου είδους. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της χρονικής ολοκλήρωσης, στην εξίσωση (3.3) έχει εξαλειφθεί η φάση της δόνησης, φ_0 .

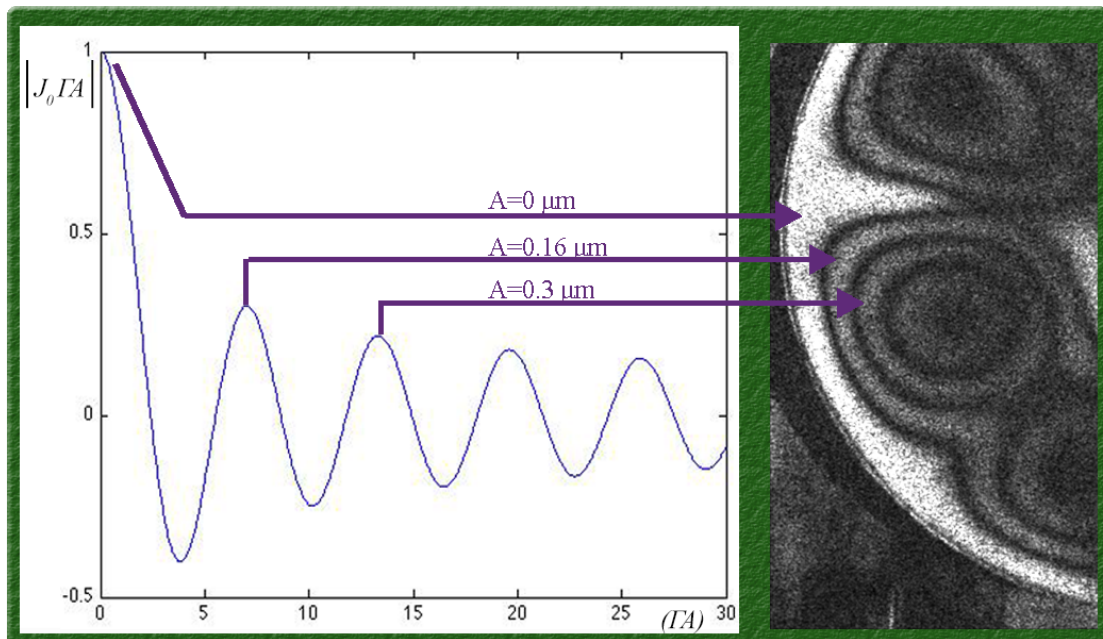
Καθώς η ταλάντωση του αντικειμένου εξακολουθεί, θεωρούμε ότι το πλάτος ταλάντωσης αλλάζει από A σε $A + \Delta A$, λόγω αστάθμητων παραγόντων. Τότε μια δεύτερη εικόνα καταγράφεται, της οποίας η κατανομή φωτεινής έντασης μπορεί παρομοίως να εκφραστεί, μετά από ανάπτυγμα Taylor (υποθέτοντας ΔA πολύ μικρό και κρατώντας μόνο τους δύο πρώτους όρους του αναπτύγματος), ως:

$$I_2 = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} |(\cos \varphi) \left[1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 \right] J_0(\Gamma A)| \quad (3.4)$$

Οι δύο διαδοχικές εικόνες, I_1 και I_2 , αφαιρούνται μέσω κατάλληλου λογισμικού, και το αποτέλεσμα εκφράζεται ως:

$$I = I_1 - I_2 = \frac{\sqrt{I_A I_B}}{2} |(\cos \varphi) \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(\Gamma A)| \quad (3.5)$$

Από την εξίσωση (3.5) είναι προφανές ότι το χρονικά ολοκληρωμένο συμβολόγραμμα, I , είναι διαμορφωμένο από τη συνάρτηση Bessel $|J_0(\Gamma A)|$. Οι εναλλασσόμενοι φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί είναι ουσιαστικά ισούψεις καμπύλες ίδιου πλάτους ταλάντωσης. Οι φωτεινοί κροσσοί αντιστοιχούν στα μέγιστα της $|J_0(\Gamma A)|$, με τον φωτεινότερο κροσσό να αντιστοιχεί σε δεσμό ($A = 0$). Οι υπόλοιποι φωτεινοί κροσσοί, διαδοχικά μειούμενης φωτεινότητας, αντιστοιχούν σε τιμές πλάτους ταλάντωσης 0.3λ , 0.56λ , 0.81λ , 1.07λ ... Στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 3.4**) απεικονίζεται η αντιστοιχία αυτή για την περίπτωση συμβολογράμματος E.S.P.I. του κρουστού οργάνου μπεντίρ όπου φαίνονται οι υπολογισμένες τιμές πλάτους ταλάντωσης ($\lambda = 532nm$).

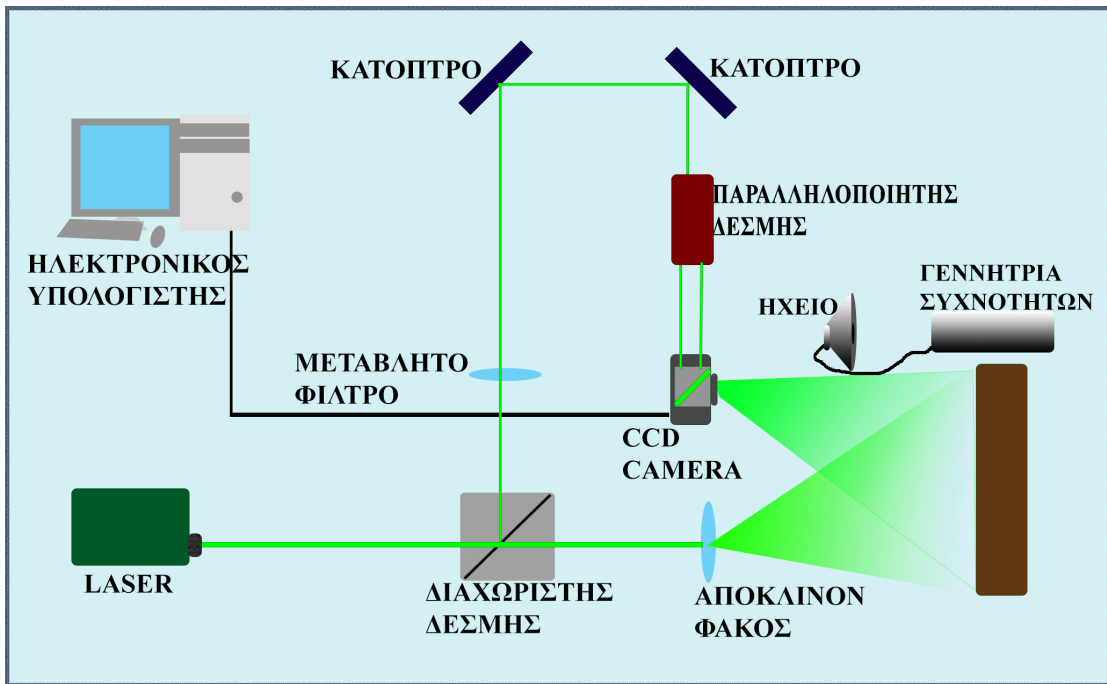


Σχήμα 3.4: Αντιστοιχία μεγίστων συνάρτησης Bessel $|J_0(\Gamma A)|$ και κατανομής πλάτους ταλάντωσης μετρούμενης με την τεχνική E.S.P.I..

Από τα παραπάνω διαφαίνεται το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής ESPI, που είναι ο περιορισμός στη διακριτική ικανότητα που επιβάλλει το γεγονός ότι δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια μετατόπιση που αντιστοιχεί σε λιγότερο από ένα κροσσό. Επιπλέον, λόγω της διαμόρφωσης του συμβολογράμματος με τη συνάρτηση Bessel, δεν μπορούν να μετρηθούν πολύ μεγάλες μετατοπίσεις, αφού σε τέτοια περίπτωση η χωρική πυκνότητα των κροσσών θα είναι τόσο μεγάλη ώστε να καθίστανται πλέον μη ορατοί.

3.1.3.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ - ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

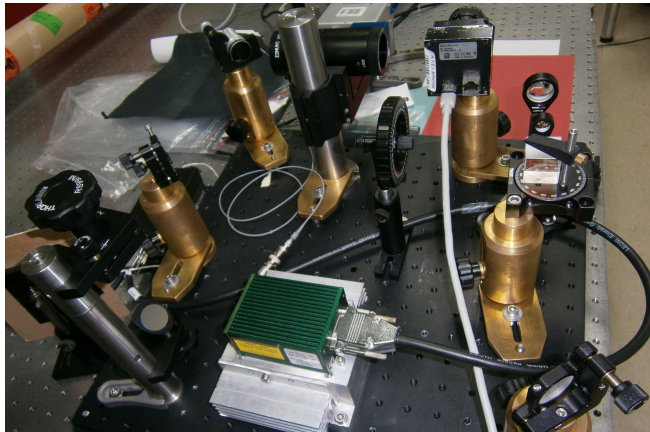
Η τεχνική E.S.P.I. εφαρμόστηκε σε μια πειραματική διάταξη η οποία προϋπήρχε στο εργαστήριο οπτικής και μουσικής τεχνολογίας και παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.5) .



Σχήμα 3.5: Σχηματική περιγραφή της πειραματικής διάταξης E.S.P.I..

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα Mach-Zehnder συμβολόμετρο.

Έτσι πάνω σε μια αντικραδασμική τράπεζα, έχουμε μία πηγή λέιζερ, συνεχούς μήκους κύματος (cw), στερεάς κατάστασης διοδικής άντλησης ενεργού υλικού Nd:YAG, που εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία πράσινου φωτός με μήκος κύματος $\lambda = 532$



Εικ.3.6: Το συμβολόμετρο της πειραματικής διάταξης

nm και μέγιστη ισχύς 150mW πάνω σε ένα διαχωριστή δέσμης 80:20 διαχωρίζοντας την δέσμη ακτινοβολίας σε δύο συνιστώσες, μια με 80% η οποία φέρεται ως δέσμη αντικειμένου και μία με 20% της αρχικής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας η οποία φέρεται ως δέσμη αναφοράς.

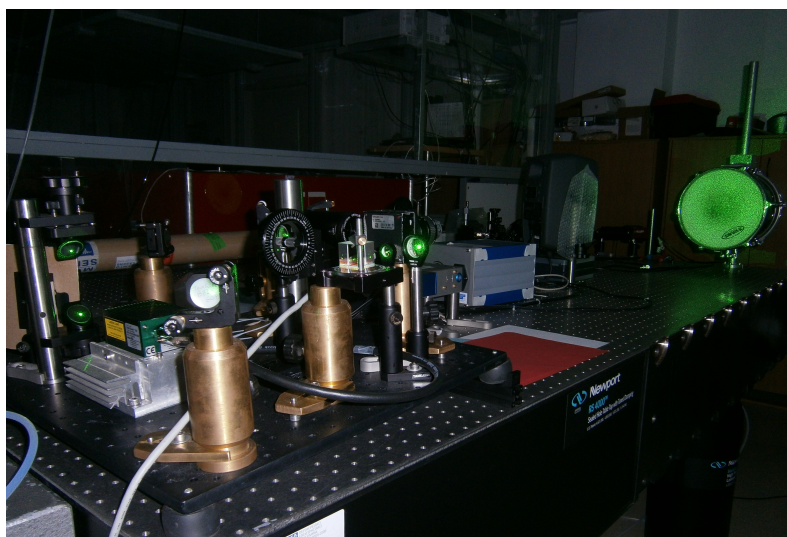
Η δέσμη αντικειμένου με ποσοστό 80% διέρχεται μέσω ενός αποκλίνον φακού με ως απώτερο σκοπό να μεγεθύνει ή σμικρύνει τη δέσμη ακτινοβολίας ώστε καλυφθεί

όλη η υπό μέτρηση επιφάνεια και στη συνέχεια προσπίπτει πάνω στο υπό μέτρηση κρουστό.

Η δέσμη αναφοράς διέρχεται μέσω ενός ουδέτερου φίλτρου μεταβλητής διαπερατότητας, ώστε να έχουμε τον πλήρη έλεγχο της σχετικής του έντασης και μέσω κάποιων κατόπτρων οδηγείται στην CCD camera. Για την ομοιόμορφη κατανομή της έντασης πάνω στον αισθητήρα της CCD camera παρεμβάλλεται ένας παραλληλοποιητής, μεγεθυντής X20.

Η CCD camera που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή έχει μέγεθος αισθητήρα 1392×1040 pixels, μέγεθος pixel $6.45 \times 6.45 \mu\text{m}$ μέγιστο ρυθμό καταγραφής 15frames/sec και διαθέτει ένα κατάλληλο φακό συλλογής φωτός. Η σύνδεσή της με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή γίνεται μέσω καλωδίου firewire. Επειδή η δέσμη αναφοράς έρχεται κάθετη από τον παραλληλοποιητή προς την κάμερα τοποθετήθηκε στο εσωτερικό της, ανάμεσα από τον φακό και τον αισθητήρα, ένας διαχωριστής δέσμης 50:50 ώστε οι δύο δέσμες να προσπίπτουν τελικά ευθυγραμμισμένες και οι δύο μαζί πάνω στον αισθητήρα.

Η διέγερση, των μεμβρανών και των ξύλων, των κρουστών έγινε με ηχοβόλιση. Για την επίτευξή της χρειάστηκε ένα γρήγορο σε μεταβολές,



τόσο της έντασης όσο και της συχνότητας, ηχείο. Έτσι

Εικ.3.7: φωτογραφία πειραματικής διάταξης

χρησιμοποιήθηκε το ηχείο της εταιρίας Genelec μοντέλο 8030 arm. Για την παραγωγή του εκπεμπόμενου ήχου χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια συχνοτήτων η οποία ήταν παράλληλα συνδεδεμένη με το ηχείο και με ένα παλμογράφο. Το εύρος συχνοτήτων περιορίστηκε στα 50 έως 2100 Hz και το πλάτος της τάσης διέγερσης δεν ξεπέρασε τα 2.5V. Αυτοί οι περιορισμοί τέθηκαν γιατί μετά από τα 2100 Hz χρειαζόταν πάνω από 2.5V το οποίο δεν υποστηριζόταν από τα χαρακτηριστικά του ηχείου. Για την καλύτερη απεικόνιση των χαρακτηριστικών του ηχείου έγινε μία

μέτρηση περί της συχνοτικής του απόκρισης σε αυτές τις τάσης διέγερσης (πληροφορίες παράρτημα 1).

Για την στήριξη των κρουστών χρησιμοποιήθηκε ειδικά κατασκευασμένη βάση στήριξης (εικ.3.8). Τα κρουστά στηρίχθηκαν με ειδικό απορροφητικό υλικό (sorbothane) τοποθετημένο στα σημεία στήριξης, ώστε να απομονώνονται τυχόν κραδασμοί από τη βάση στήριξης προς τα κρουστά. Η απουσία ανεπιθύμητων κραδασμών από το περιβάλλον διαπιστώθηκε και πειραματικά, χωρίς διέγερση, καθώς η τεχνική ESPI είναι ευαίσθητη σε πολύ μικρές μετατοπίσεις. Η στήριξη αυτή προσομοιώνει κατά το δυνατόν την στήριξη που έχει ο οργανοπαίκτης όταν εκτελεί κάποιο παραδοσιακό κρουστό όργανο, δηλαδή η πίεση που δέχεται το ξύλο του κρουστού από την στήριξή του στο πόδι και το χέρι του. Στην περίπτωση του ταμπούρου και των τομ απλά σταθεροποιήθηκαν πάνω στη βάση, χωρίς να δέχονται κάποια πίεση.



Εικ.3.8: Βάση στήριξης των κρουστών

Το ηχείο τοποθετήθηκε σε απόσταση 1m από το αντικείμενο μέτρησης, ώστε να μην είμαστε μέσα στο εγγύς πεδίο του ηχείου και με όσο τον δυνατόν μικρότερη γωνία ακτινοβολίας. Επίσης τοποθετήθηκαν σε αντίστοιχο ύψος τα δυο κέντρα, ώστε να συμπίπτουν το ένα κέντρο με το άλλο. Οι τελικές αυτές θέσεις προέκυψαν μετά από επανειλημμένες πειραματικές μετρήσεις.

Η ηλεκτρονική καταγραφή, επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων (εικόνων) γίνεται σε πραγματικό χρόνο, μέσω ειδικού λογισμικού που έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον LabView από το επιστημονικό προσωπικό και συνεργάτες του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής. Το λογισμικό αυτό επίσης παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου των λειτουργιών της CCD κάμερας (φωτεινότητα, χρόνος έκθεσης, ρυθμός καταγραφής κτλ). Τελικά τα δεδομένα (εικόνες) απεικονίζονται στην οθόνη του Η/Υ.

Η πειραματική διαδικασία για την μελέτη των κρουστών με την τεχνική ESPI πραγματοποιήθηκε ως εξής: αρχικά γίνεται οπτική ευθυγράμμιση και ρυθμίζονται οι σχετικές εντάσεις των δεσμών αναφοράς και αντικειμένου στον αισθητήρα της

κάμερας. Η εικόνα $I(x,y)$, που περιγράφεται από την εξίσωση (3.5), καταγράφεται συνεχώς καθώς αλλάζει η συχνότητα διέγερσης. Η συχνότητα διέγερσης μεταβάλλεται κατά μικρά βήματα (τυπικά 0.5Hz), ενώ σε κάθε συχνότητα καταγράφονται αρκετές εικόνες. Όταν η συχνότητα διέγερσης πλησιάζει μια συχνότητα συντονισμού του οργάνου εμφανίζονται κροσσοί, με τον αριθμό τους να μεγιστοποιείται (μέγιστο πλάτος ταλάντωσης) ακριβώς στη συχνότητα συντονισμού. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζονται ακριβώς οι ιδιοσυχνότητες με το αντίστοιχο εύρος ζώνης τους και καταγράφονται οι αντίστοιχες ιδιομορφίες κατανομής του πλάτους ταλάντωσης της επιφάνειας. Τα αποτελέσματα της τεχνικής ESPI παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.

3.2. ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

3.2.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΡΟ ΗΧΟΓΡΑΦΗΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Η μέθοδος ανάλυσης προ ηχογραφημένου υλικού ξεκίνησε ηχογραφώντας τον κ. Παπατζανή σε κάποιους ρυθμούς με διάφορες τεχνικές παιχνιδιού αλλά και δυναμικών, στα τρία κρουδίσματα για την κάθε μεμβράνη στο στούντιο ηχογραφήσεων του τμήματος Μ.Τ.Α του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, με σκοπό να πάρουμε μια πρώτη εικόνα για την συμπεριφορά του οργάνου.

Η ηχογράφηση έγινε στον εργαστηριακό χώρο του ψηφιακού στούντιο ηχογραφήσεων Pro-tools. Χρησιμοποιήθηκε το μικρόφωνο της εταιρίας earthworks, το οποίο ανήκει στην κατηγορία των μετρητικών μικροφώνων. Το μικρόφωνο στήθηκε σε απόσταση 1m από το κρουστό όργανο ώστε να καλύπτεται όλα τα σημεία κατευθυντικότητας του οργάνου.

Στη συνέχεια με την βοήθεια του προγράμματος Praat version 5.3.16 υπολογίστηκε το συχνοτικό περιεχόμενο των προ ηχογραφημένων ήχων και παρουσιάστηκε στο πρόγραμμα Matlab version 7.1.

3.2.2. ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΗΧΟΥ ΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήσαμε μεμβράνες από φυσικά δέρματα ζώων, κατσίκας και αγελάδας στα οποία δεν ήταν γνωστή η πυκνότητά τους.

Όπως έχουμε προαναφέρει στο προηγούμενο κεφάλαιο η ταχύτητα συνδέεται με την πυκνότητα μέσω της κυματική εξίσωση των εγκάρσιων κυμάτων με ταχύτητα $c = \sqrt{T/\sigma}$. Οποτε η θεωρητική κυματική εξίσωση της συχνότητας της μεμβράνης προκύπτει:

$$f = \frac{0.766}{D} c$$

όπου D η διάμετρος της μεμβράνης.



Οπότε για την μελέτη της ταχύτητας του ήχου, του κάθε φυσικού δέρματος και στις τρεις τάσης κουρδίσματος, προβήκαμε στην εξής διαδικασία.

Τοποθετήσαμε τις μεμβράνες πάνω σε ένα μπεντίρ και δημιουργήσαμε τέσσερα σημεία. Κρατήσαμε ένα σημείο σταθερό και σημαδέψαμε τα υπόλοιπα σε διαφορετικές αποστάσεις. Έπειτα με την χρήση



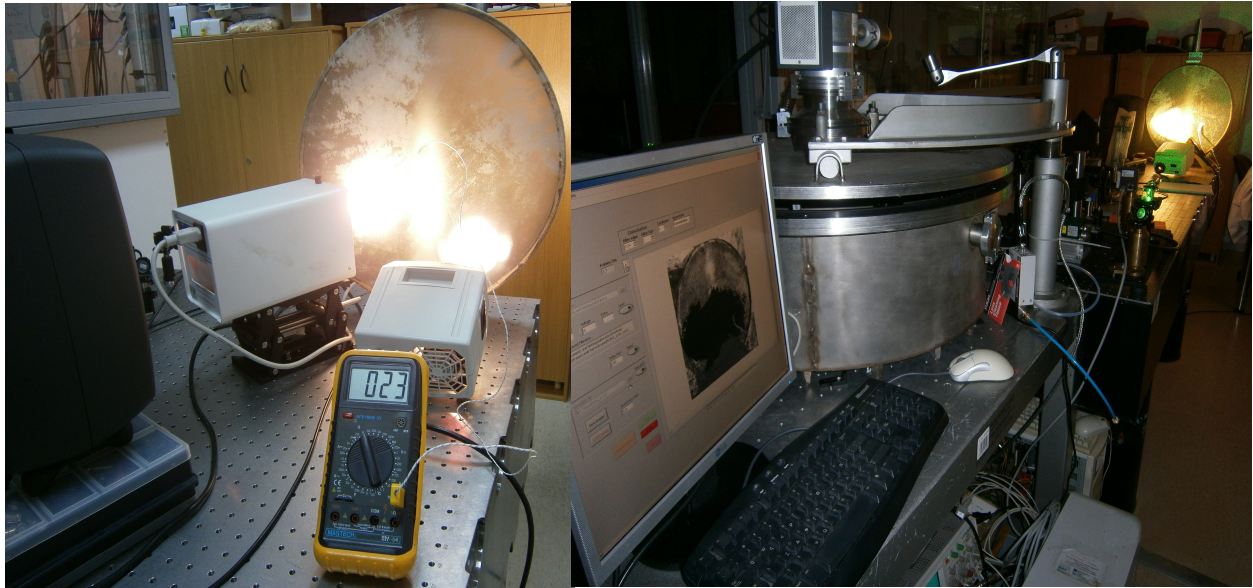
επιταχυνσιόμετρου (εικ.4.1) και με ένα σφυράκι κρούσης (εικ.4.2) μετρούσαμε μέσω ενός ψηφιακού παλμογράφου τον χρόνο που διαρκούσε το κύμα για να διανύσει την απόσταση από το σταθερό σημείο όπου γινόταν η κρούση με το σφυράκι ως το σημείο που είχαμε τοποθετήσει το επιταχυνσιόμετρο.

3.3. ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η σταθερή θερμοκρασία όπως έχει προαναφερθεί ήταν πολύ σημαντική για την σωστή περάτωση των πειραματικών διαδικασιών. Γι αυτό το λόγο σε όλες τις πειραματικές μετρήσεις είχαμε σταθερή θερμοκρασία στους 20°C .

Για την αύξηση της θερμοκρασία στην συγκεκριμένη μέτρηση χρησιμοποιήθηκαν δυο θερμαντικές λάμπες. Επίσης χρησιμοποιήθηκε κι ένα πολύμετρο με αισθητήρα θερμοκρασίας για την αναγνώριση των θερμοκρασιών. Στην εικόνα **εικ.3.3** φαίνεται η πειραματική αυτή διάταξη.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μέτρηση ήταν η εξής. Αρχικά γινόταν εντοπισμός της συχνότητας του υπό μελέτη τρόπου δόνησης στους 20°C . Έπειτα με την βοήθεια των λαμπτήρων η θερμοκρασία αυξανόταν κατά 1°C και γινόταν εκ νέου εντοπισμός για την αντίστοιχη τιμή της συχνότητας στον ίδιο τρόπο δόνησης. Αυτή η διαδικασία συνεχίστηκε για θερμοκρασίες έως 28°C για τέσσερις διαφορετικούς τρόπους δόνησης.



Εικ.3.3: Πειραματική διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1. Υπολογισμός της ταχύτητας ήχου της μεμβράνης.

Οι ταχύτητες ήχου που προέκυψαν για τις δυο μεμβράνες είναι οι εξής:

	Χαμηλό κούρδισμα	Μέτριο κούρδισμα	Ψηλό κούρδισμα
Ταχύτητα ήχου μεμβράνης κατσίκας (m/s)	48.9	59.1	62.3
Ταχύτητα ήχου μεμβράνης αγελάδας (m/s)	26.5	47.1	74.6

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα ταχύτητας ήχου για τις δυο μεμβράνες και στα τρία κούρδισματα

4.2. Θεωρητικές τιμές συχνοτήτων για τις δυο μεμβράνες.

Στο παρακάτω πίνακα βλέπουμε τα αποτελέσματα των θεωρητικών τιμών όπως αυτά προέκυψαν από τις μετρήσεις της ταχύτητας του ήχου του μπεντίρ όπως περιγράψαμε σε προηγούμενη ενότητα.

Modes (m,n)	Μεμβράνη κατσίκας χαμηλό κούρδισμα Συχνότητα (Hz)	Μεμβράνη κατσίκας μέτριο κούρδισμα Συχνότητα (Hz)	Μεμβράνη κατσίκας υψηλό κούρδισμα Συχνότητα (Hz)	Μεμβράνη αγελάδας χαμηλό κούρδισμα Συχνότητα (Hz)	Μεμβράνη αγελάδας μέτριο κούρδισμα Συχνότητα (Hz)	Μεμβράνη αγελάδας υψηλό κούρδισμα Συχνότητα (Hz)
0.1	81.83	99.00	104.23	44.31	78.79	124.87
1.1	130.11	157.41	165.83	70.45	125.27	198.54
2.1	175.12	211.86	223.20	94.82	168.61	267.21
0.2	188.21	227.70	239.88	101.91	181.21	287.19
3.1	216.85	262.35	276.39	117.42	208.79	330.90
1.2	238.94	289.08	304.55	129.39	230.06	364.61
4.1	258.58	312.84	329.58	140.02	248.97	394.58
2.2	286.41	346.50	365.04	155.09	275.76	437.03
0.3	294.59	356.40	375.47	159.52	283.64	449.52
5.1	298.68	361.35	380.69	161.73	287.58	455.76
3.2	332.23	401.94	423.45	179.90	319.88	506.96
6.1	339.59	410.85	432.83	183.89	326.97	518.20
1.3	346.14	418.77	441.18	187.43	333.27	528.19
2.3	395.24	478.17	503.76	214.02	380.55	603.11
0.4	400.97	485.10	511.06	217.12	386.06	611.85
3.3	442.70	535.59	564.25	239.72	426.25	675.53
1.4	453.34	548.46	577.81	245.48	436.49	691.76
2.4	503.25	608.85	641.43	272.51	484.55	767.93
3.4	551.53	667.26	702.97	298.65	531.03	841.60

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα θεωρητικών τιμών για τις δυο μεμβράνες και στα τρία κούρδισματα

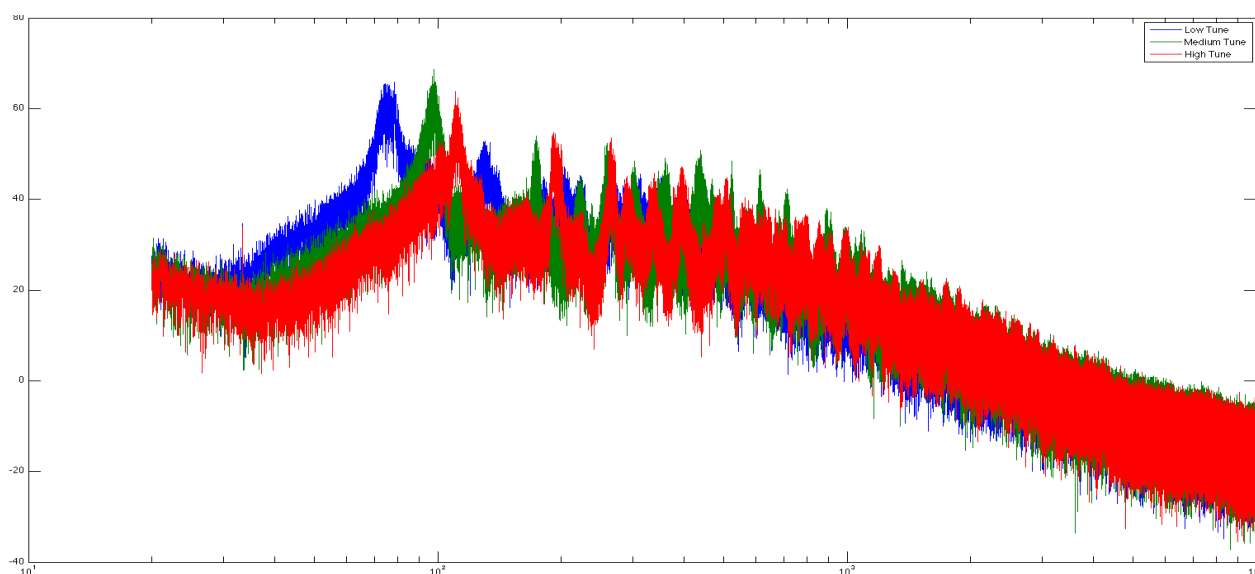
4.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων για ίδια μεμβράνη με διαφορετικές τάσεις.

Σε αυτή την ενότητα θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα τριών διαφορετικών τάσεων κουρδίσματος για δυο διαφορετικές μεμβράνες. Οι τάσεις κουρδίσματος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στην κατάσταση ηρεμίας της μεμβράνης δηλαδή η τάση που είχε κατά την τοποθέτησή της, ένα μέτριο κούρδισμα και ένα πολύ υψηλό.

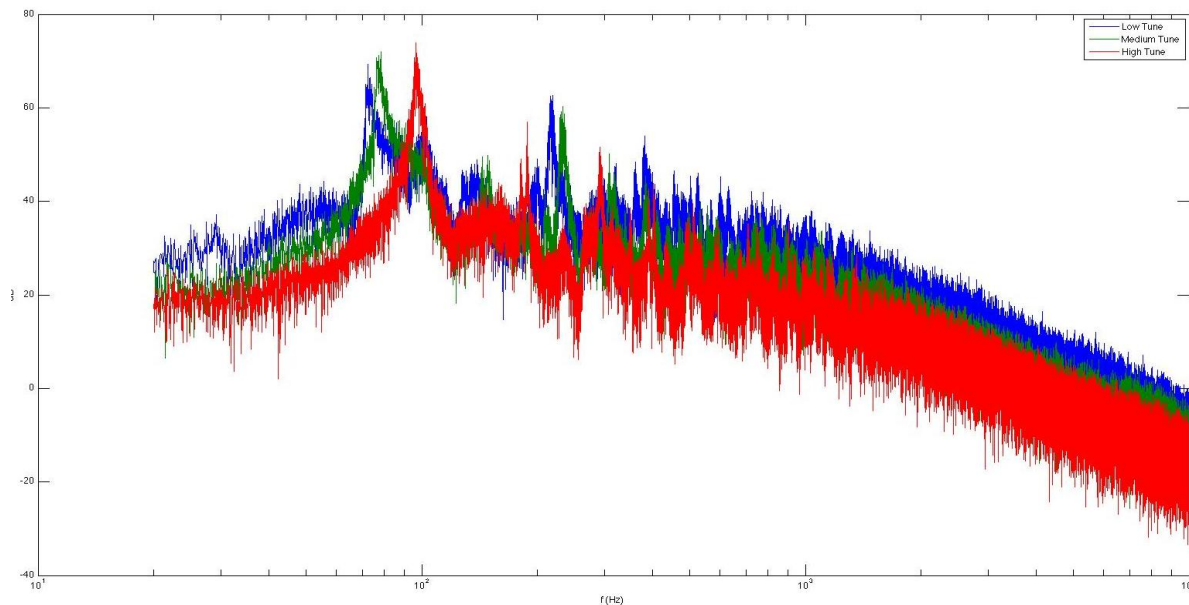
Η πρώτη μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα φυσικό δέρμα κατσίκας, μέτριο σε πάχος και η δεύτερη ήταν ένα φυσικό δέρμα αγελάδας, πολύ λεπτό σε πάχος. Τοποθετήσαμε τις δυο μεμβράνες στο σκάφος ενός ίδιου μπεντίρ για να μελετήσουμε την διαφορά αυτών.

4.3.1. Μέθοδος ανάλυσης προ ηχογραφημένου υλικού.

Η συχνοτική απόκριση του φυσικού δέρματος της κατσίκας καθώς και του φυσικού δέρματος της αγελάδας, με τη μέθοδο ανάλυσης προ ηχογραφημένου υλικού, σε τρεις διαφορετικές τάσεις κουρδίσματος της μεμβράνης φαίνεται στο διάγραμμα 1 και στο διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 1: Συχνοτική απόκριση του φυσικού δέρματος της κατσίκας σε τρεις διαφορετικές τάσεις κουρδίσματος της μεμβράνης.



Διάγραμμα 2: Συχνοτική απόκριση του φυσικού δέρματος της αγελάδας σε τρεις διαφορετικές τάσεις κουρδίσματος της μεμβράνης.

Στα *διαγράμματα 1 και 2* το κόκκινο χρώμα απευθύνεται στην υψηλή τάση κουρδίσματος, το πράσινο χρώμα στην μέτρια τάση κουρδίσματος και το μπλε χρώμα στη χαμηλή τάση κουρδίσματος.

Από τα *διαγράμματα 1 και 2* συμπεραίνεται και στις δυο μεμβράνες μία λογαριθμική μείωση των ντεσιμπέλ όσο αυξάνεται η συχνότητα και στις τρεις τάσεις κουρδίσματος. Επίσης παρατηρήθηκε ότι στην μεμβράνη της κατσίκας υπάρχει μια συχνοτική ολίσθηση προς υψηλότερες συχνότητες όσο αυξάνεται η τάση κουρδίσματος, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει στην μεμβράνη της αγελάδας. Σε αυτή τη μεμβράνη συναντήθηκε διαφορετική χροιά - διαφορετικοί τρόποι ταλάντωσης όσο αυξανόταν η τάση κουρδίσματος. Επίσης παρατηρήθηκε ότι στη μέτρια τάση κουρδίσματος και στις δυο μεμβράνες οι συντονισμοί του οργάνου είναι πιο ισχυροί και ευδιάκριτοι από το υπόλοιπο φάσμα τους σε σχέση με την υψηλή τάση και τη χαμηλή της οποίας οι συντονισμοί είναι πολύ ασθενείς. Στον *πίνακα 4.3* που ακολουθεί βλέπουμε τους δέκα πρώτους συντονισμούς του διαγράμματος για τις τρεις τάσεις κουρδίσματος.

		Συχνότητες πρώτων συντονισμών									
		1 ^{ος} f(Hz)	2 ^{ος} f(Hz)	3 ^{ος} f(Hz)	4 ^{ος} f(Hz)	5 ^{ος} f(Hz)	6 ^{ος} f(Hz)	7 ^{ος} f(Hz)	8 ^{ος} f(Hz)	9 ^{ος} f(Hz)	10 ^{ος} f(Hz)
Φυσικό δέρμα κατσίκας	Χαμηλή τάση	75	130	165	181	204	222	269	286	311	352
	Μέτρια τάση	98	173	224	258	289	301	346	360	438	468
	Ηψηλή τάση	112	192	263	290	337	396	481	508	556	628
Φυσικό δέρμα αγελάδας	Χαμηλή τάση	71	101	137	200	215	298	319	361	379	431
	Μέτρια τάση	79	149	187	234	276	307	318	339	381	411
	Ηψηλή τάση	96	181	187	232	291	312	348	389	402	429

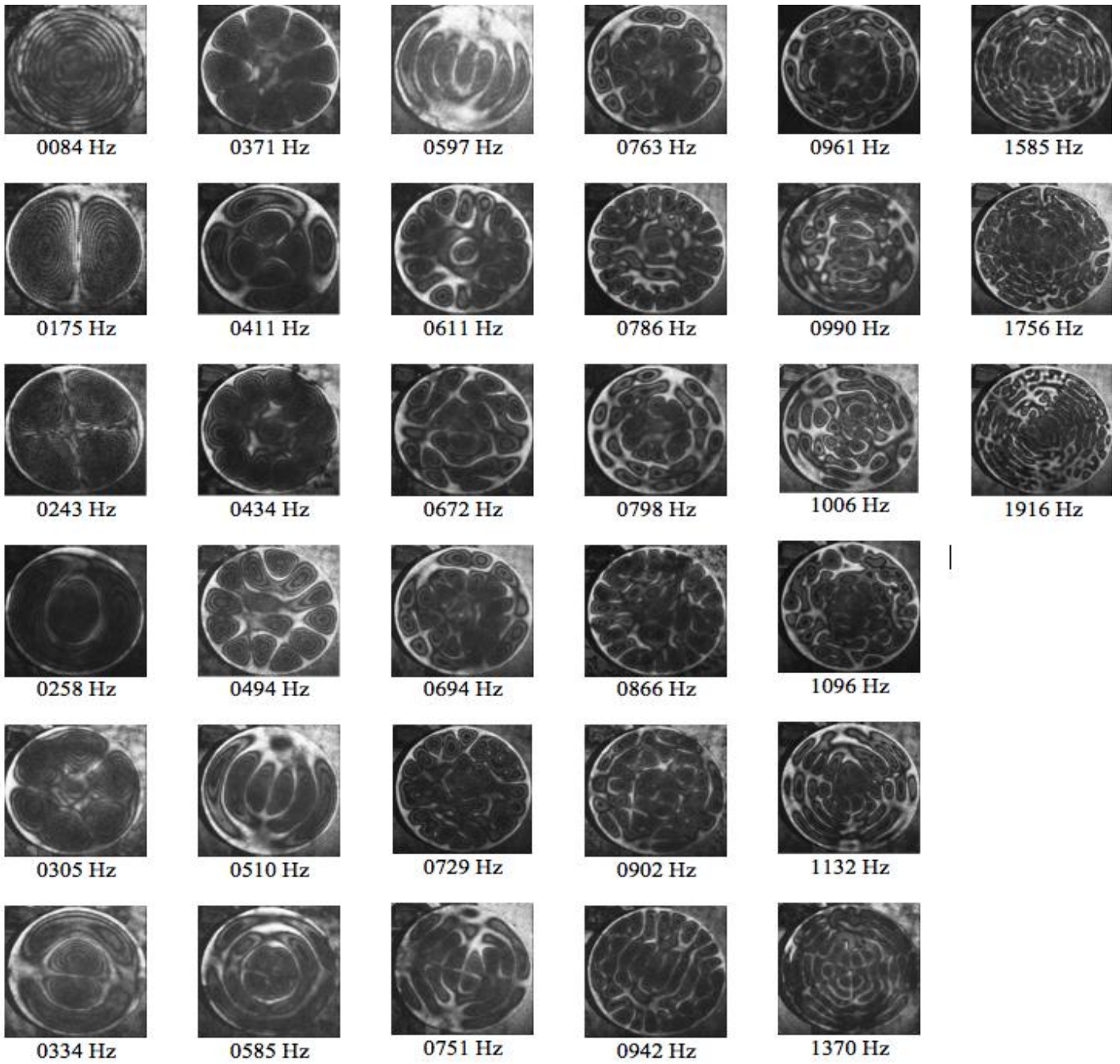
Πίνακας 4.3: Συχνότητες των 10 πρώτων συντονισμών για τα δύο φυσικά δέρματα

4.3.2. Μέθοδος ψηφιακής αναπαράστασης ψηφίδων(E. S. P. I)

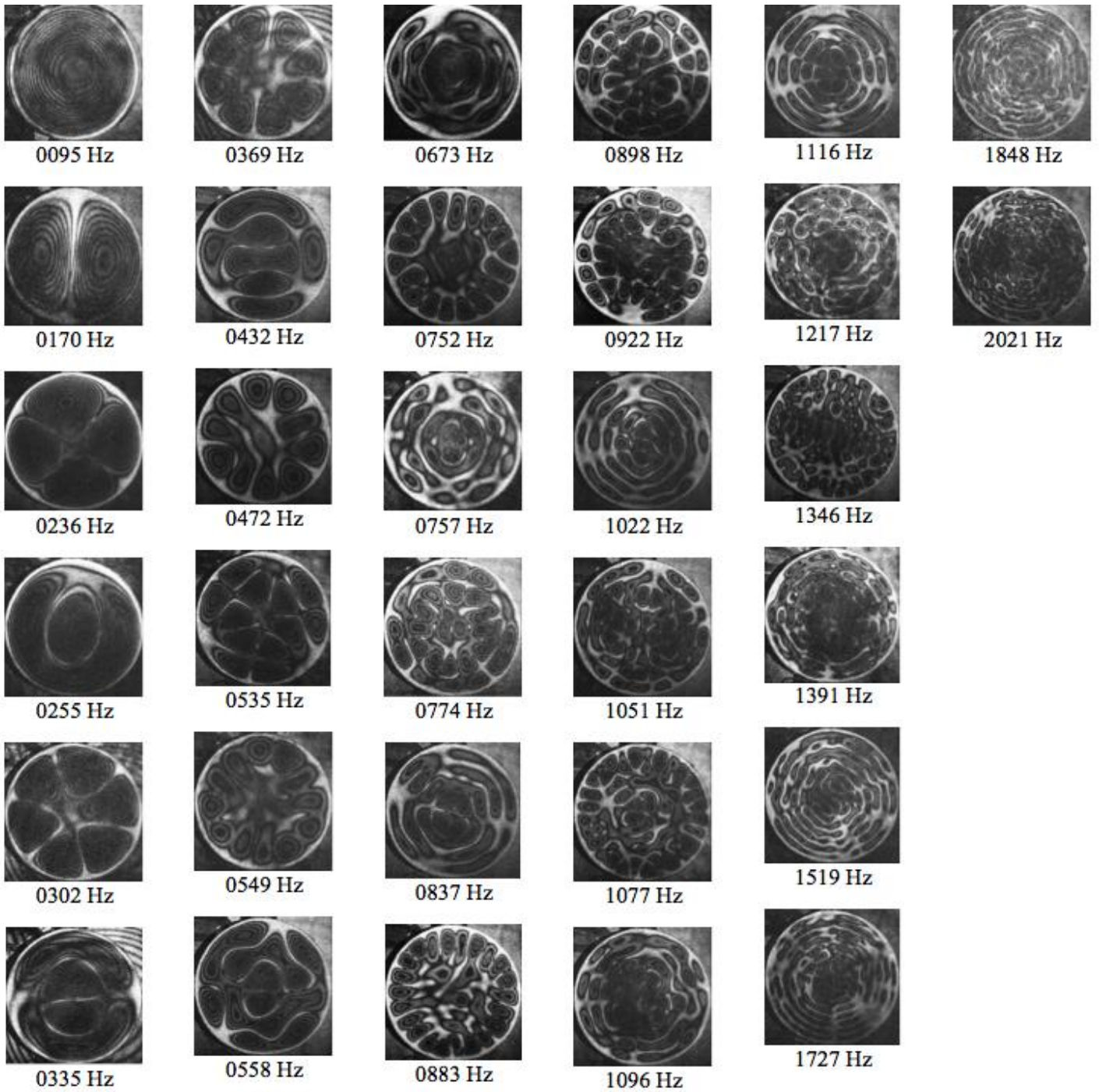
Στην συνέχεια προχωρήσαμε στην μέθοδο ανάλυσης E.S.P.I. στον εργαστηριακό χώρο οπτικής και μουσικής τεχνολογίας του τμήματος μουσικής τεχνολογίας και ακουστικής

4.3.2.1. Μεμβράνη φυσικού δέρματος κατσίκας

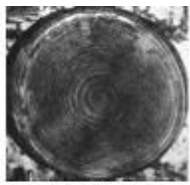
Τα αποτελέσματα που πήραμε από την μέτρηση της μεμβράνης του φυσικού δέρματος της κατσίκας για το χαμηλό κούρδισμα φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες:



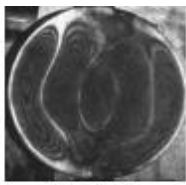
Στην συνέχεια κουρδίσαμε το μπεντίρ στη μέτρια τάση κουρδίσματος τα αποτελέσματα της ανάλησης των οποίων φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες:



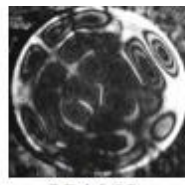
Συνεχίσαμε τις μετρήσεις κουρδίζοντας το μπεντίρ στην υψηλότερη τάση κουρδίσματος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων γι αυτή τη μέτρηση φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες:



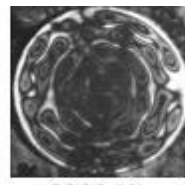
0105 Hz



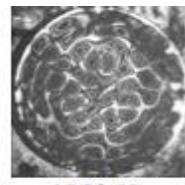
0469 Hz



0744 Hz



0938 Hz



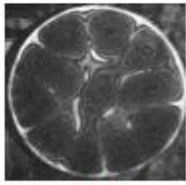
1203 Hz



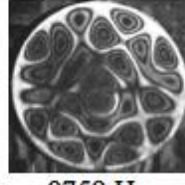
1938 Hz



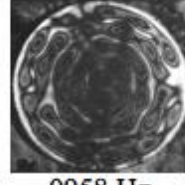
0180 Hz



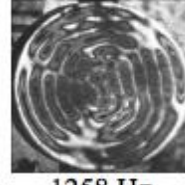
0486 Hz



0759 Hz



0958 Hz



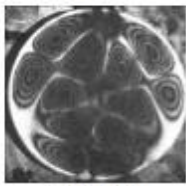
1258 Hz



1968 Hz



0255 Hz



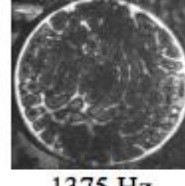
0544 Hz



0787 Hz



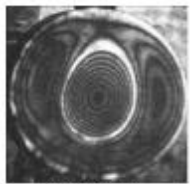
0995 Hz



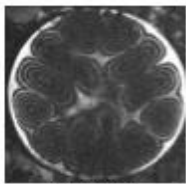
1375 Hz



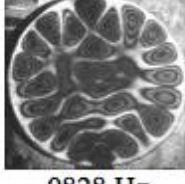
2002 Hz



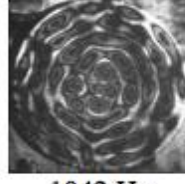
0276 Hz



0559 Hz



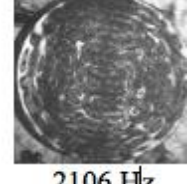
0828 Hz



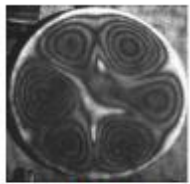
1042 Hz



1501 Hz



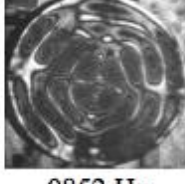
2106 Hz



0335 Hz



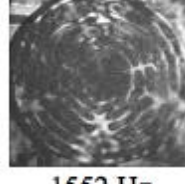
0575 Hz



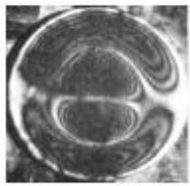
0852 Hz



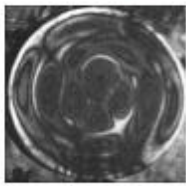
1098 Hz



1552 Hz



0366 Hz



0666 Hz



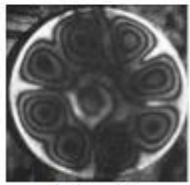
0873 Hz



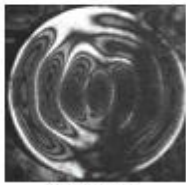
1119 Hz



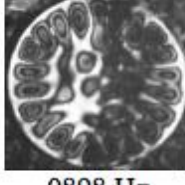
1662 Hz



0407 Hz



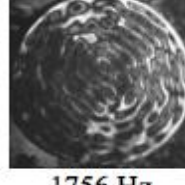
0677 Hz



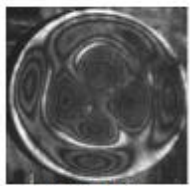
0898 Hz



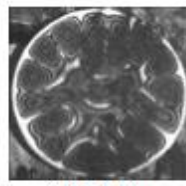
1131 Hz



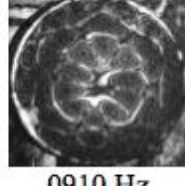
1756 Hz



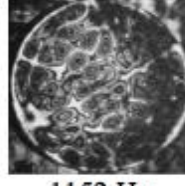
0457 Hz



0690 Hz



0910 Hz



1152 Hz



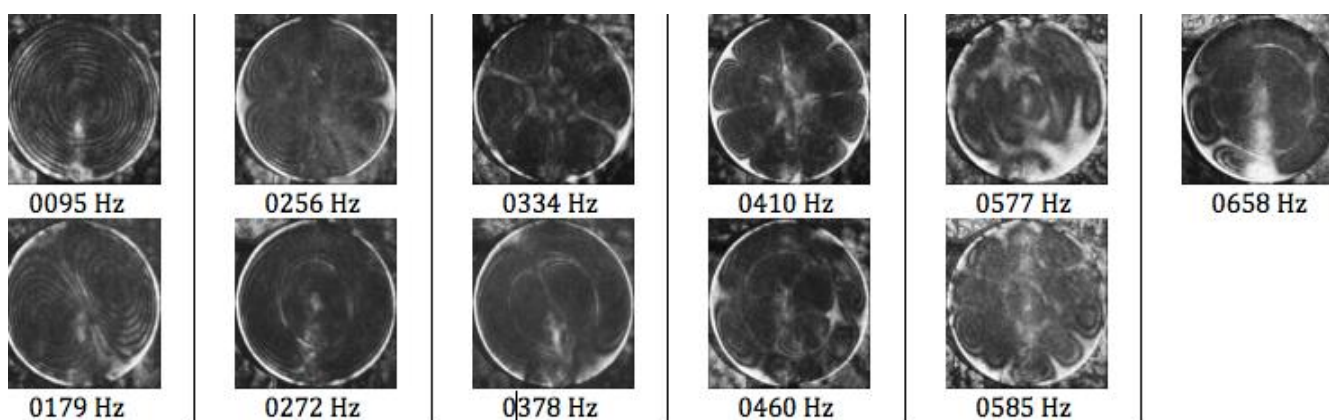
1852 Hz

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της μεμβράνη του φυσικού δέρματος της κατσίκας συμφωνούν με τις θεωρητικές τιμές που προαναφέρθηκαν και με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μέθοδο ανάλυσης προ ηχογραφημένου υλικού.

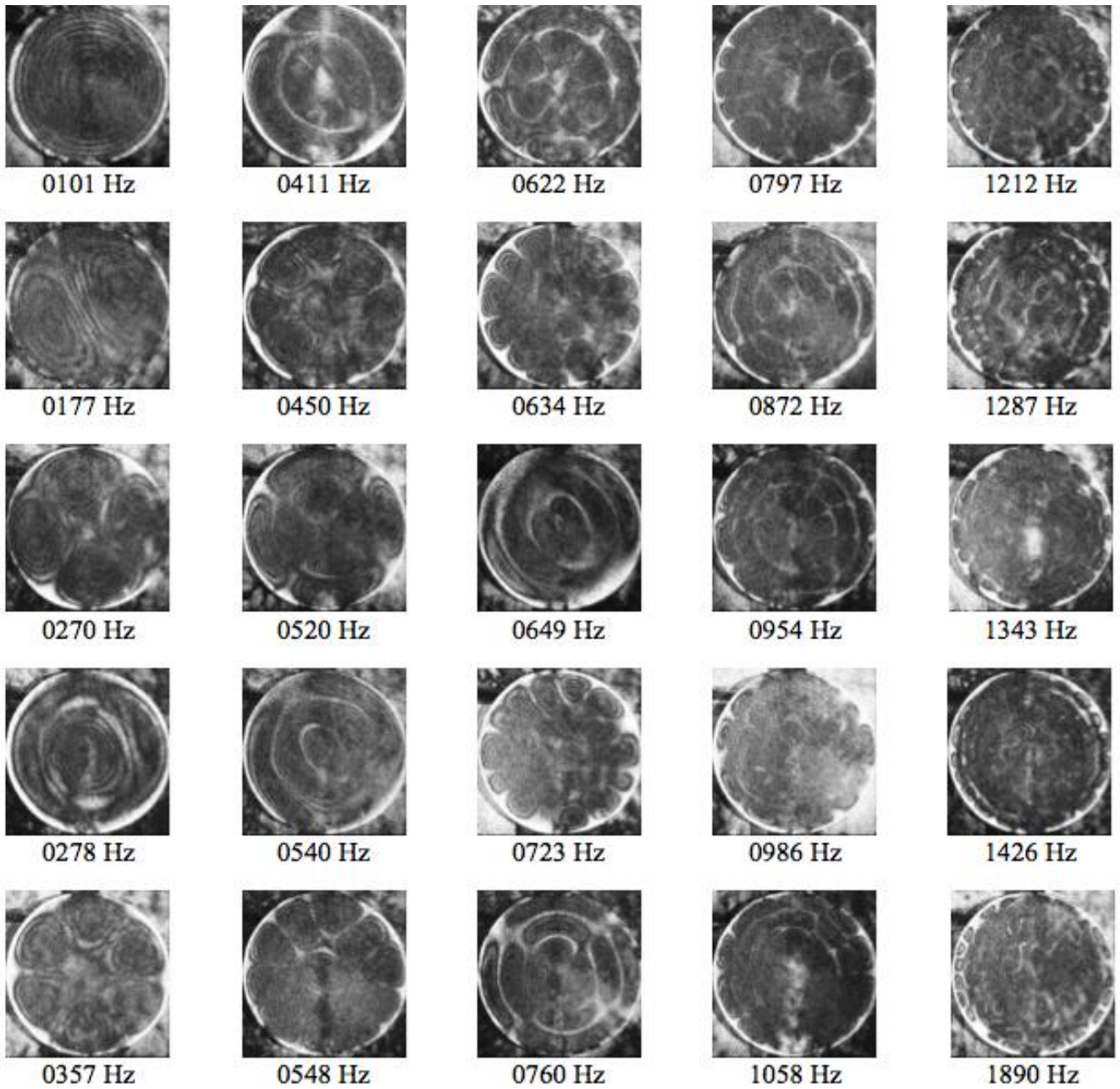
4.3.2.2. Μεμβράνη φυσικού δέρματος αγελάδας

Η μελέτη των κανονικών τρόπων ταλάντωσης των φυσικών δερμάτων του μπεντίρ συνεχίστηκαν με τη μεμβράνη του φυσικού δέρματος της αγελάδας. Η μεμβράνη αυτή είναι πολύ λεπτή σε πάχος με αποτέλεσμα το φως του λέιζερ να διαθλάται μέσα από την μεμβράνη και να μην αντανακλά το επιθυμητό ποσοστό που χρειαζόταν για την συμβολή του φωτός στη φωτογραφική κάμερα όπως προαναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ως συνέπεια αυτού ήταν να ρυθμίσουμε το συμβολόμετρό μας με νέες παραμέτρους.

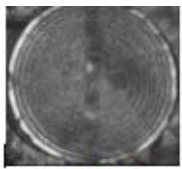
Στις παρακάτω φωτογραφίες βλέπουμε τους κανονικούς τρόπους ταλάντωσης της μεμβράνης για την χαμηλή τάση κουρδίσματος:



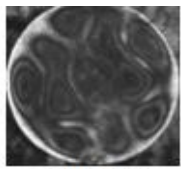
Συνεχίζουμε βλέποντας παρακάτω τις μετρήσεις που προέκυψαν από την μέτρια τάση κουρδίσματος της μεμβράνης:



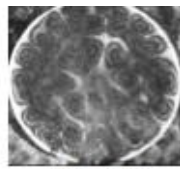
Στη παρακάτω σελίδα βλέπουμε το αποτέλεσμα των μετρήσεων για την υψηλή τάση κουρδίσματος του φυσικού δέρματος της αγελάδα:



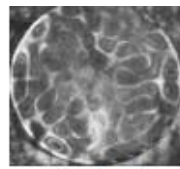
0114 Hz



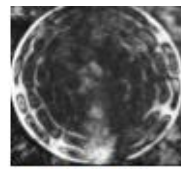
0595 Hz



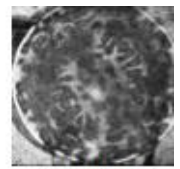
1049 Hz



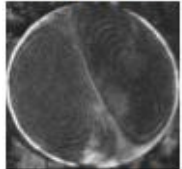
1456 Hz



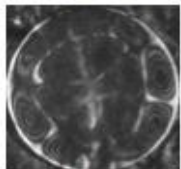
1786 Hz



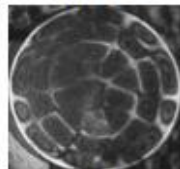
2339 Hz



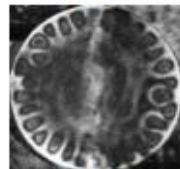
0218 Hz



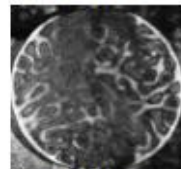
0673 Hz



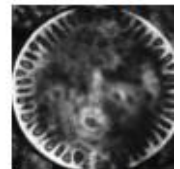
1150 Hz



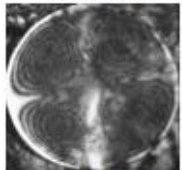
1489 Hz



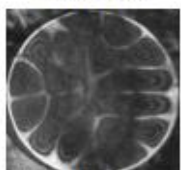
1828 Hz



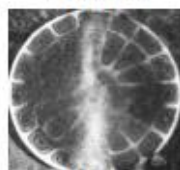
2350 Hz



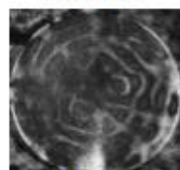
0312 Hz



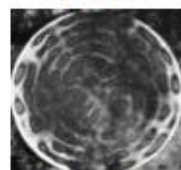
0774 Hz



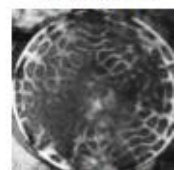
1170 Hz



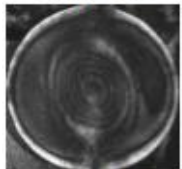
1519 Hz



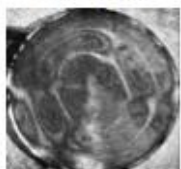
1902 Hz



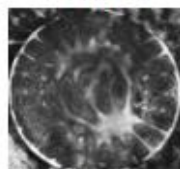
2414 Hz



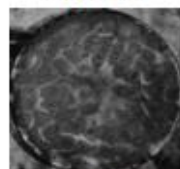
0332 Hz



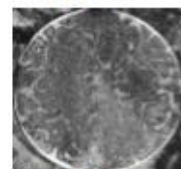
0810 Hz



1224 Hz



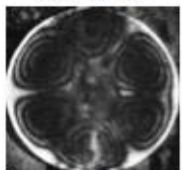
1559 Hz



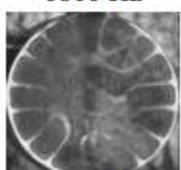
1938 Hz



2744 Hz



0408 Hz



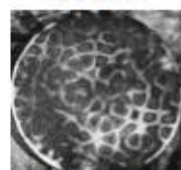
0865 Hz



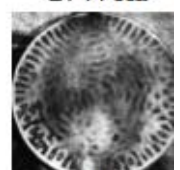
1269 Hz



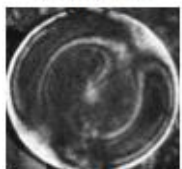
1573 Hz



1998 Hz



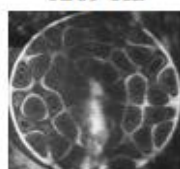
2949 Hz



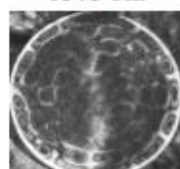
0449 Hz



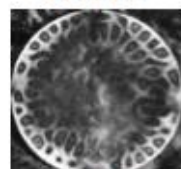
0880 Hz



1310 Hz



1628 Hz



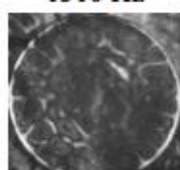
2111 Hz



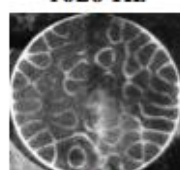
0502 Hz



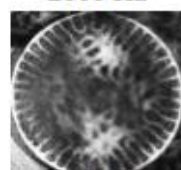
0928 Hz



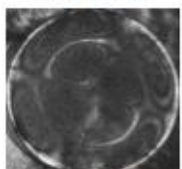
1320 Hz



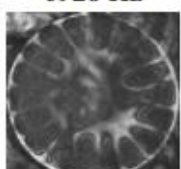
1671 Hz



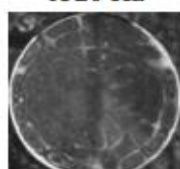
2176 Hz



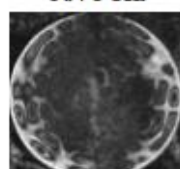
0562 Hz



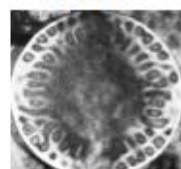
0958 Hz



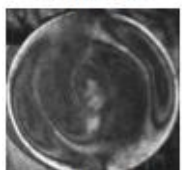
1352 Hz



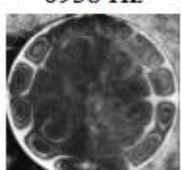
1725 Hz



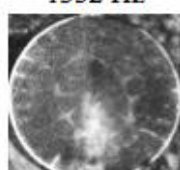
2201 Hz



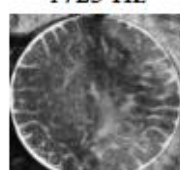
0588 Hz



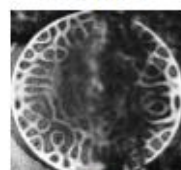
0979 Hz



1407 Hz



1747 Hz

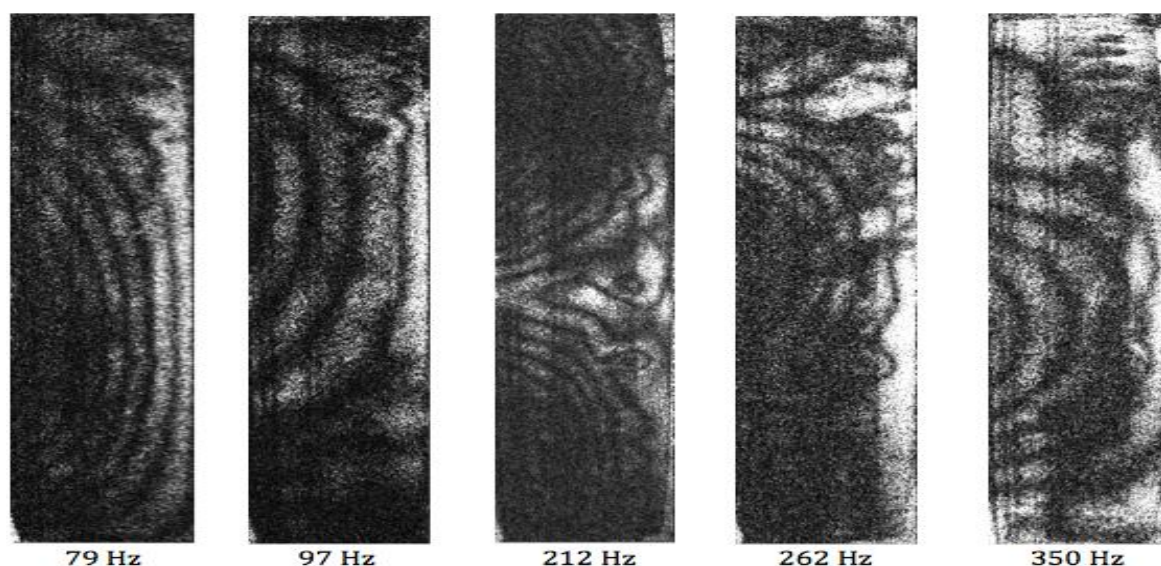


2294 Hz

Σε αυτή τη μεμβράνη του φυσικού δέρματος της αγελάδας παρατηρήθηκε ότι η συμπεριφορά του δε είναι όπως θα την περιμέναμε από τις θεωρητικές τιμές. Επίσης δεν συμφωνεί και με την πειραματική διαδικασία της μεθόδου ανάλυσης προ ηχογραφημένου υλικού. Παρατηρήθηκε ότι όσο η τάση κουρδίσματος μεγαλώνει τόσο αυξάνονται οι κανονικοί τρόποι δόνησης της μεμβράνης. Αυτό οφείλεται στο πολύ λεπτό πάχος της μεμβράνης, για το λόγο ότι δονείται με ανίσχυρους ήχους και είναι πολύ επιρρεπείς στις αλλαγές της θερμοκρασίας και της υγρασίας όπως θα δούμε και στη συνέχεια. Επίσης, όπως παρατηρήθηκε στην πειραματική διαδικασία έχει πολύ μεγάλη ελαστικότητα, δηλαδή μετά από ένα πολύ δυνατό τέντωμα της μεμβράνης της τάξης 90% και έπειτα επαναφορά στην χαμηλότερη τάση, όπου αυτή η τάση ηρεμίας αντιστοιχεί στην τάξη των 40%, παρατηρείται νέα τάση της τάξης 20% η οποία επαναφέρεται σταδιακά με την πάροδο του χρόνου στην τάξη 40% τάση κουρδίσματος χωρίς να επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά και η χροιά του οργάνου.

5. Η συμπεριφορά του ξύλου για τις δυο μεμβράνες.

Στη συνέχεια έγινε μελέτη για την συμπεριφορά του ξύλου του μπεντίρ, το οποίο είναι ένα σκληρό ξύλο από μαόνι, για τις δυο μεμβράνες και τα τρία κουρδίσματα αυτών. Οι κανονικοί τρόποι ταλάντωσης του ξύλου παρατηρήθηκαν οι ίδιοι και στις δυο μεμβράνες όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες **Εικ.5** με κάποια μικρή απόκλιση στις συχνότητες οι οποίες φαίνονται στον **πίνακα 2**.



Εικ.5 :Κανονικοί τρόποι δόνησης του ξύλου του μπεντίρ για την χαμηλή τάση κουρδίσματος του φυσικού δέρματος της κασίκας.

		Συχνότητες πρώτων συντονισμών ξύλου				
		1 ^{ος} f(Hz)	2 ^{ος} f(Hz)	3 ^{ος} f(Hz)	4 ^{ος} f(Hz)	5 ^{ος} f(Hz)
Φυσικό δέρμα κατσίκας	Χαμηλή τάση κουρδίσματος	79	92	212	262	350
	Μέτρια τάση κουρδίσματος	72	90	230	265	322
	Ηψηλή τάση κουρδίσματος	76	107	258	264	334
Φυσικό δέρμα αγελάδας	Χαμηλή τάση κουρδίσματος	72	140	179	252	329
	Μέτρια τάση κουρδίσματος	75	130	190	201	254
	Ηψηλή τάση κουρδίσματος	106	257	273	363	453

Πίνακας 4: Αποτελέσματα συχνοτήτων των πρώτων συντονισμών του ξύλου για τις δυο μεμβράνες.

Η συμπεριφορά του ξύλου παρατηρήθηκε γενικά σταθερή, με μικρές διακυμάνσεις της τάξης των 10 Hz. Επίσης παρατηρήθηκε ότι συντονισμοί του ξύλου δε επηρεάζουν μόνο την χροιά του κρουστού αλλά και την τονικότητά του. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι ο πρώτος τρόπος δόνησης του ξύλου είναι περίπου 72 - 79 Hz στις οποίες συχνότητες συναντήθηκαν και οι πρώτοι τρόποι δόνησης της μεμβράνης.

6. Η προσθήκη της πίσω μεμβράνης

Σε αυτή την ενότητα των πειραματικών μετρήσεων έγινε μελέτη της συμπεριφοράς της μπροστινής μεμβράνης, όταν προστίθεται η πίσω μεμβράνη. Για την μελέτη αυτής της συμπεριφοράς χρησιμοποιήσαμε ένα ταμπούρο με διάμετρο 14 ιντσών και βάθους 5 ιντσών της εταιρίας Γκάμπριελ από το στούντιο ηχογραφήσεων του τμήματος μουσικής τεχνολογίας και ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρίας Evans υλικού mylar μονής επίστρωσης για την πίσω μεμβράνη με πάχος 7mm και διπλής επίστρωσης με πάχος 7.5 mm για την μπροστινή μεμβράνη.

Αρχικά πήραμε μια σειρά μετρήσεων μόνο για την μπροστά μεμβράνη, σε μια τάση κουρδίσματος 65%. Η μέτρηση του ποσοστού της % για την τάση της μεμβράνης έγινε με το tension watch της εταιρίας TAMA εικ.4. Στη συνέχεια προσθέσαμε την πίσω μεμβράνη σε μία τάση κουρδίσματος 72% και μελετήσαμε τις επιπτώσεις που επιφέρει αυτή η

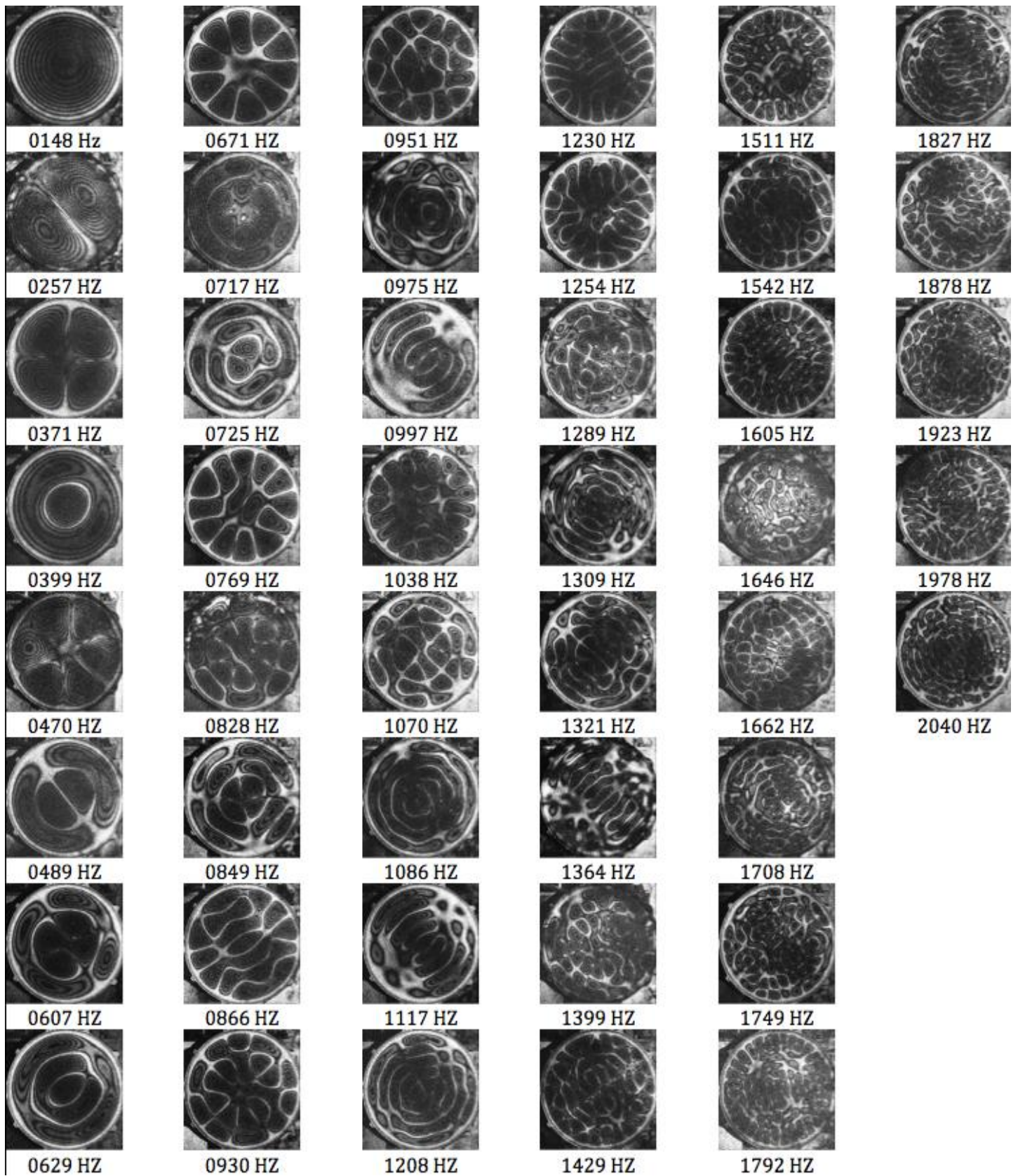
αλλαγή. Έπειτα εφαρμόσαμε τάση κουρδίσματος 82% στην πίσω μεμβράνη με την τάση κουρδίσματος της μπροστινής μεμβράνης να παραμένει 65% σε όλο το σύνολο των μετρήσεων. Η επιλογή των ποσοστών της % έγινε τυχαία για την πειραματική μέτρηση.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων μόνο της μπροστινής μεμβράνης σε τάση κουρδίσματος 65% φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες, εικόνα (εικ.6.1). Στη συνέχεια βλέπουμε στην εικόνα (εικ.6.2) τα αποτελέσματα της μπροστινής μεμβράνης με την προσθήκη της πίσω μεμβράνης σε τάση κουρδίσματος 72% και ακολουθούν τα αποτελέσματα με την πίσω μεμβράνη σε τάση κουρδίσματος 82% στην εικόνα (εικ.6.2).

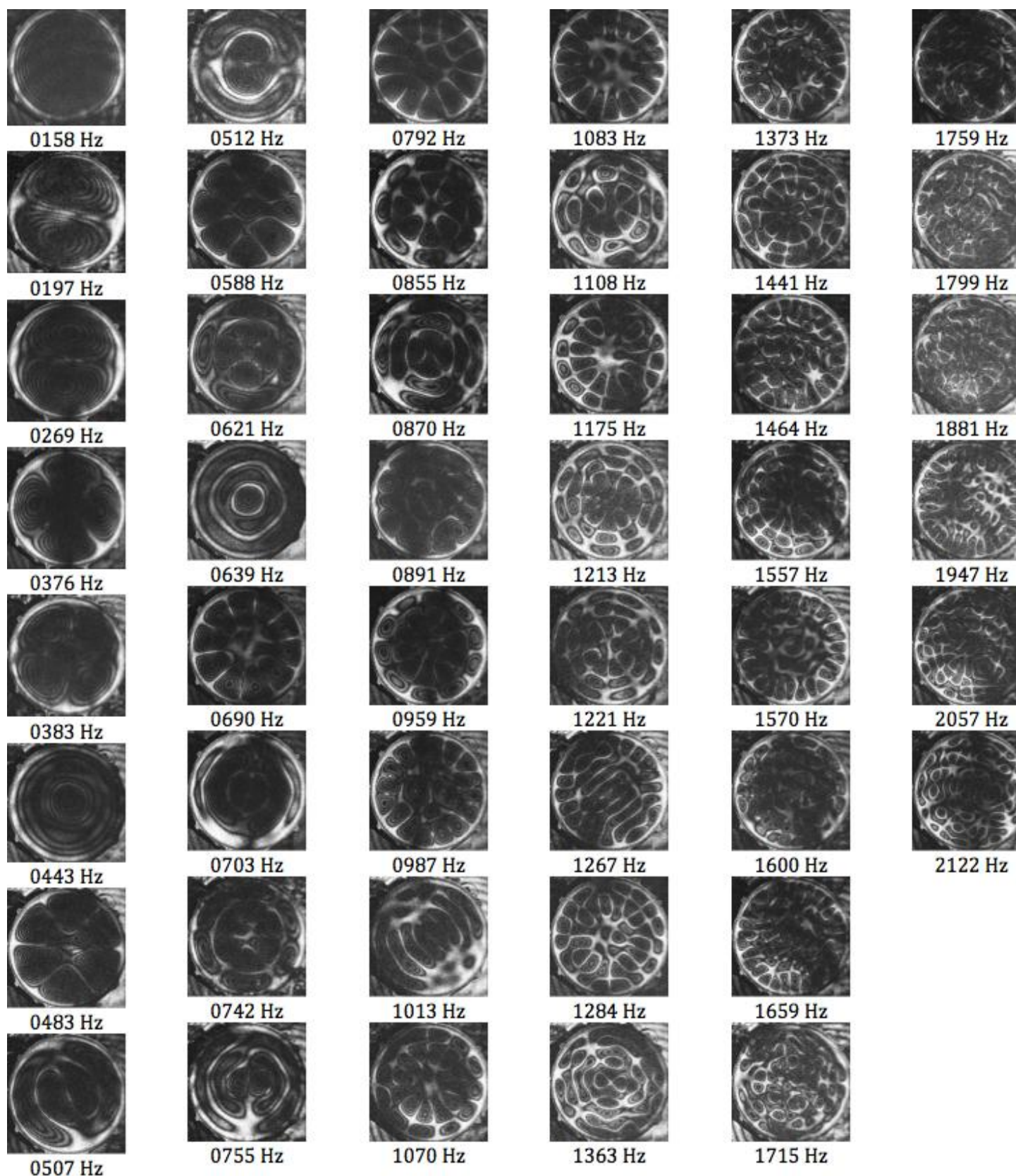
Η διαπίστωση που προέκυψε από την μελέτη αυτού του φαινομένου είναι ότι με την προσθήκη της πίσω μεμβράνης η θεμελιώδης συχνότητα του οργάνου αυξάνεται και επηρεάζεται αισθητά από την αλλαγή της τάσης κουρδίσματος της πίσω μεμβράνης. Επίσης όσο πιο μακριά κουρδίζονται οι δύο μεμβράνες τόσο μεγαλώνει και ο παράγοντας Q factor του κανονικού τρόπου δόνησης. Σε πολύ μεγάλες διαφορές της τάσης προκύπτουν δυο ξεχωριστές συχνότητες. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως στην περιοχή των 50 - 500 Hz. Με αυτό το τρόπο το κρουστό μουσικό όργανο αποκτά την ανάλογη μουσικότητα – τονικότητα η οποία εξαρτάται και από τον όγκο του πλαισίου του όπως θα δούμε στη συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας.



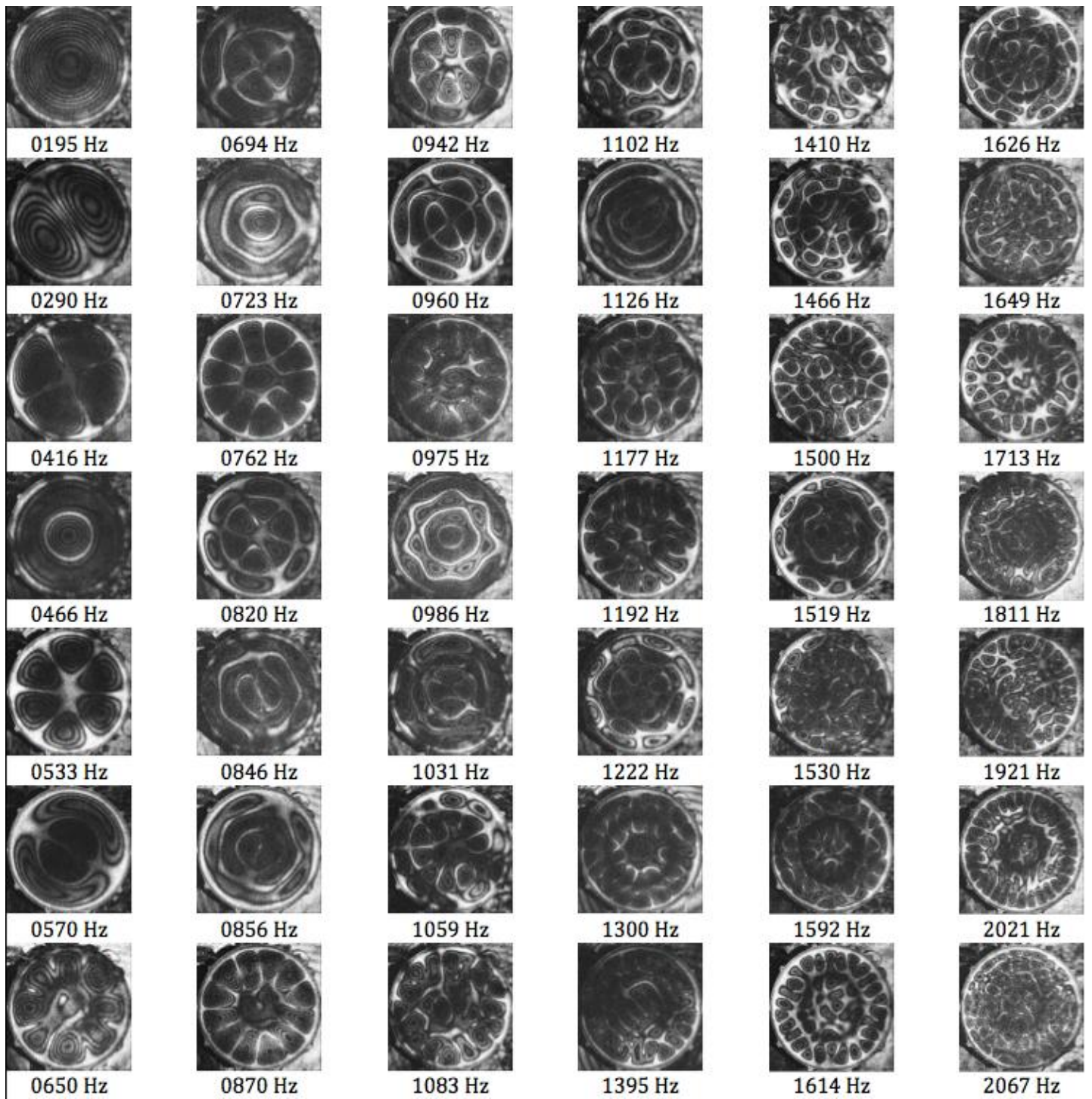
Εικ.4: Tension watch της εταιρίας TAMA



Εικ. 6.1: Τρόποι δόνησης της μπροστινής μεμβράνης του ταμπούρου με τάση 65%.



Εικ. 6.2: Τρόποι δόνησης της μπροστινής μεμβράνης του ταμπούρου με τάση 65% και προσθήκη της πίσω μεμβράνης σε τάση 72%.



Εικ.6.3: Τρόποι δόνησης της μπροστινής μεμβράνης του ταμπούρου με τάση 65% και προσθήκη της πίσω μεμβράνης σε τάση 82%.

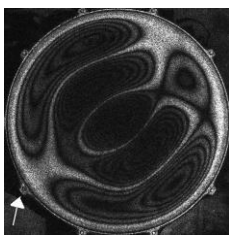
7. Οι ανομοιομορφίες της λάθος τάσης κουρδίσματος

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων παρουσιάστηκε λάθος στην τάση κουρδίσματος σε κάποια σημεία της μεμβράνης. Έτσι δε θα εφαρμόσουμε μια ομοιόμορφη τάση κουρδίσματος πάνω στη μεμβράνη, αλλά θα αφήσουμε κάποια σημεία ελεύθερα χωρίς δηλαδή να σφίξουμε τις βίδες των σημείων αυτών.

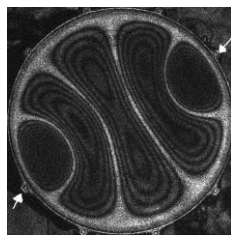
Για την μελέτη αυτού του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η προηγούμενη μέτρηση του ταμπούρου με τάσης κουρδίσματος 65% για την μπροστά μεμβράνη και 82% για την πίσω μεμβράνη.

Έχοντας μία ομοιόμορφη τάση κουρδίσματος στη μεμβράνη αρχίσαμε να ξεβιδώνουμε κάποια συγκεκριμένα σημεία της μεμβράνης. Κάθε σημείο που ξεβιδωνόταν είχε μείωση περίπου 5%.

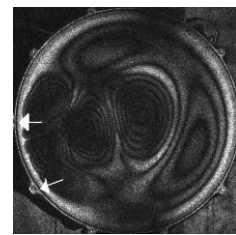
Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει τρεις σειρές μετρήσεων, δηλαδή τρία διαφορετικά σημεία ελεύθερα πάνω στην μεμβράνη. Η πρώτη σειρά μετρήσεων αναφέρεται σε ένα ελεύθερο σημείο εικ.5α η δεύτερη σε δύο απέναντι σημεία ελεύθερα εικ.5β και η τρίτη σε δυο διπλανά σημεία ελεύθερα εικ.5γ.



Εικ.5α: Ένα ελεύθερο σημείο όπως δείχνει το βέλος



Εικ.5β: Δυο απέναντι ελεύθερα σημεία όπως δείχνουν τα βέλοι.

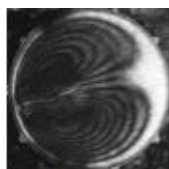


Εικ.5γ: Δυο διπλανά ελεύθερα σημεία όπως δείχνουν τα βέλοι.

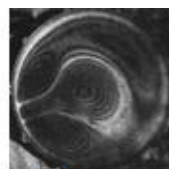
Στις παρακάτω φωτογραφίες βλέπουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα δυο διπλανά ελεύθερα σημεία στην επιφάνεια της μεμβράνης:



0158 Hz



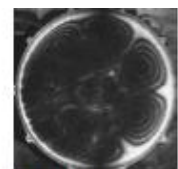
0222 Hz



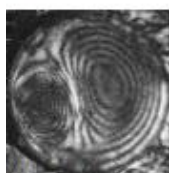
0319 Hz



0380 Hz



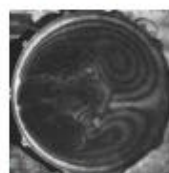
0532 Hz



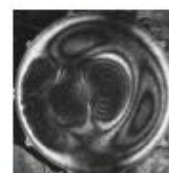
0208 Hz



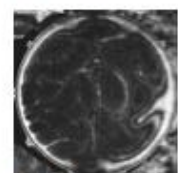
0282 Hz



0336 Hz

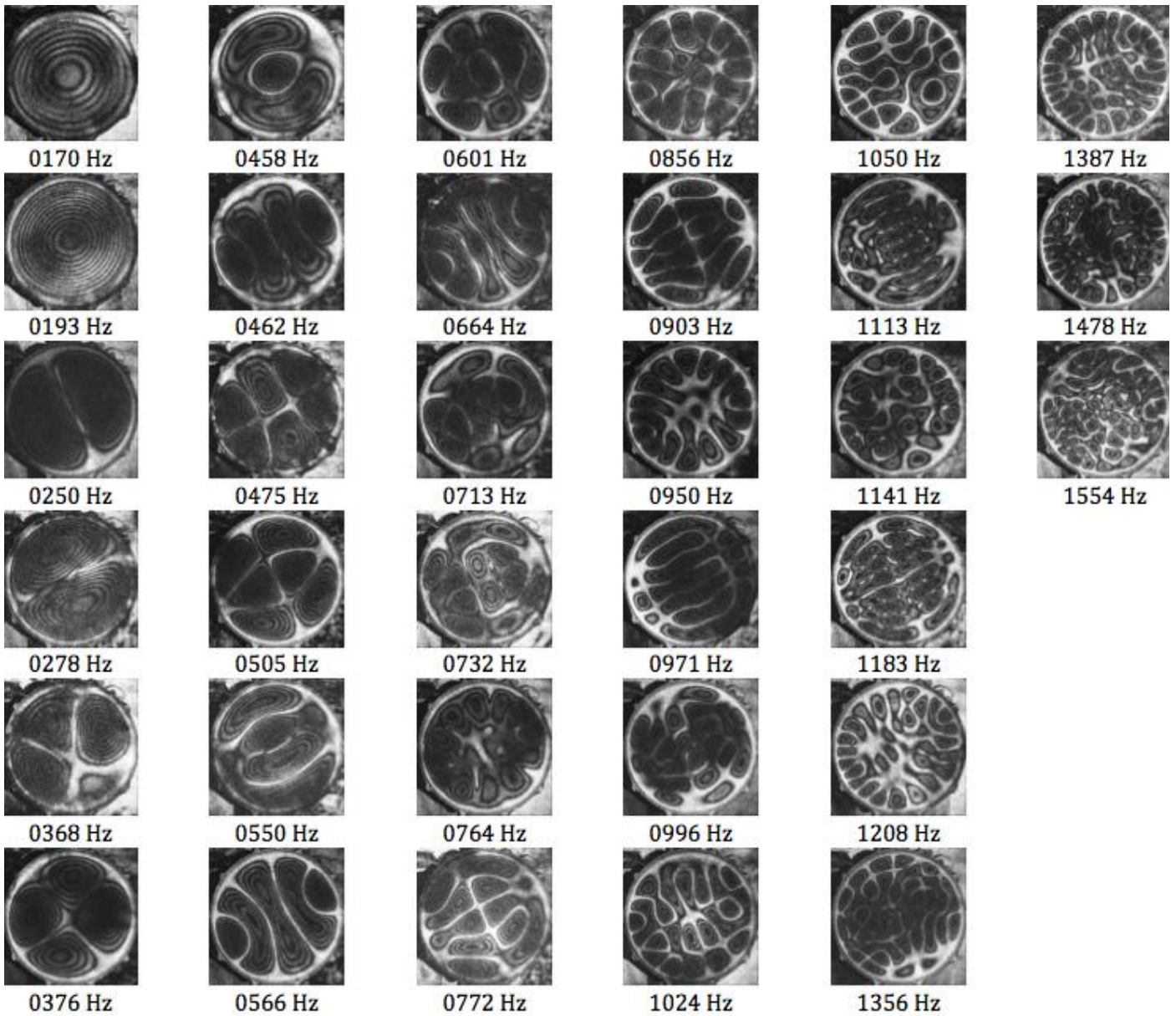


0411 Hz

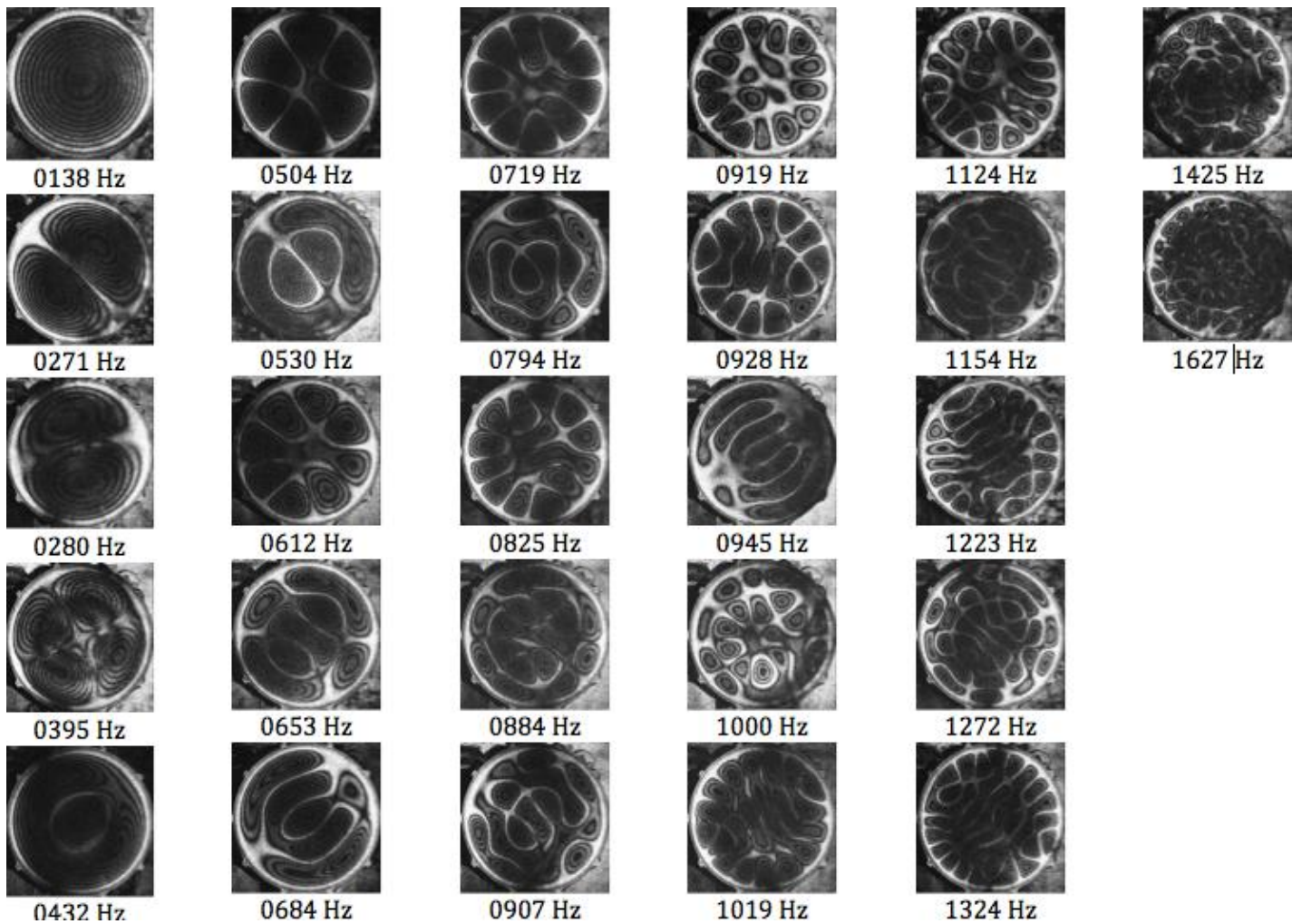


0695 Hz

Στη συνέχεια βλέπουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα δυο απέναντι σημεία στην επιφάνεια της μεμβράνης:



Ακολουθούν στη συνέχεια τα αποτελέσματα της μέτρησης για το ένα ελεύθερο σημείο στην επιφάνεια της μεμβράνης:

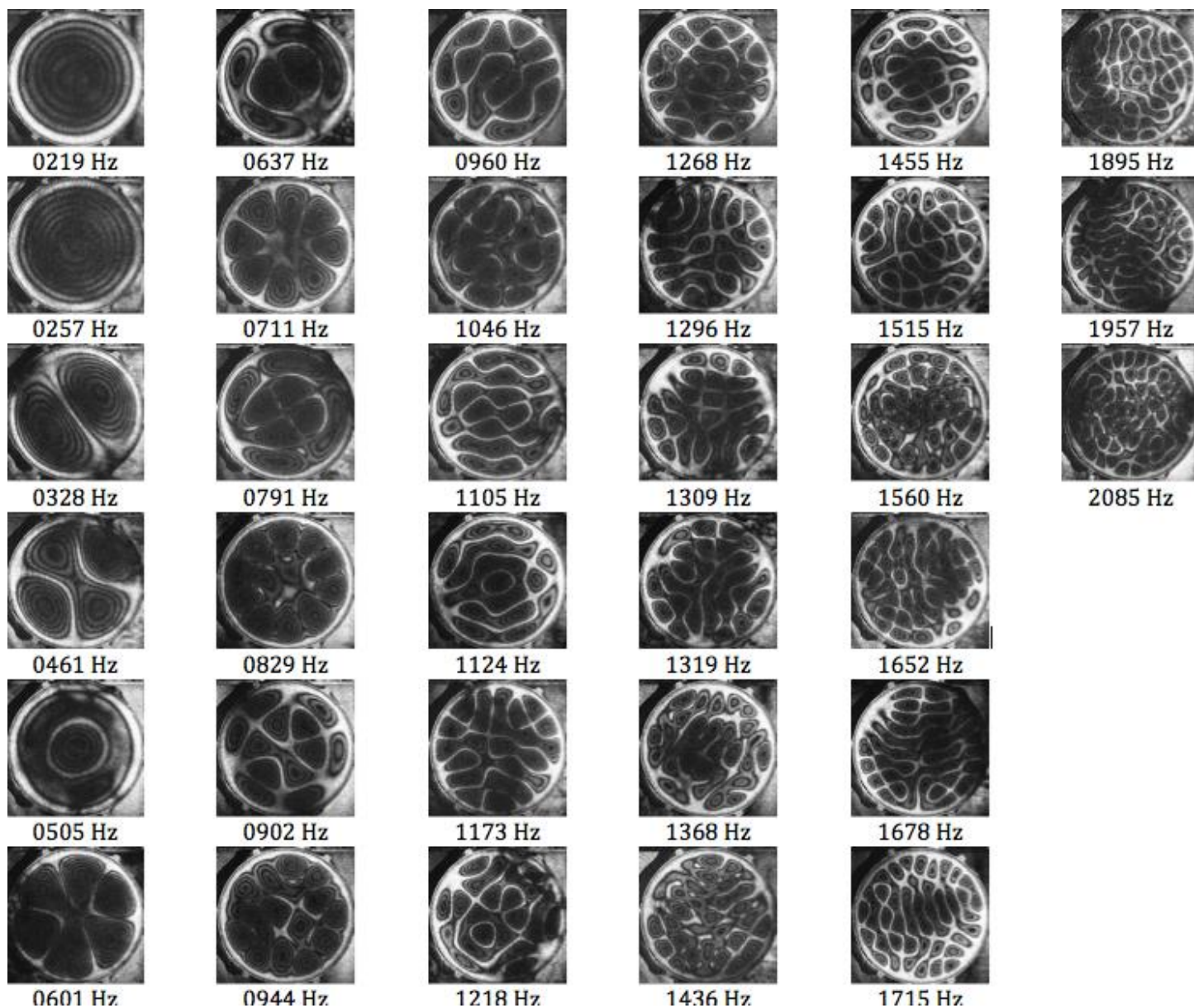


Σύμφωνα με τις μετρήσεις παρατηρούμαι ότι στην περίπτωση της μιας ξεβιδωμένης βίδας, ενός ελεύθερου σημείου, δεν υπάρχει μεγάλη παραμόρφωση στους κανονικούς τρόπους δόνησης της μεμβράνης, περισσότερο παρατηρείται μία πτώση των συχνοτήτων και μεγάλη αλλαγή στην χροιά. Στη περίπτωση των δύο απέναντι ξεβιδωμένων βιδών υπάρχει εμφανής παραμόρφωση των κανονικών τρόπων ταλάντωσης όπως στις συχνότητες 475 Hz, 505 Hz, 566 Hz όπου βλέπουμε ξεκάθαρα ότι τα υπόλοιπα σημεία “τραβάνε” κατά κάποιο τρόπο τον κανονικό τρόπο ταλάντωσης προς το μέρος τους. Επίσης παρατηρούμαι μία πτώση των συχνοτήτων με μεγάλη αλλαγή στη χροιά. Στη τελευταία περίπτωση των δύο διπλών ξεβιδωμένων βιδών γίνεται εμφανείς η πολύ μεγάλη παραμόρφωση στους κανονικούς τρόπους ταλάντωσης.

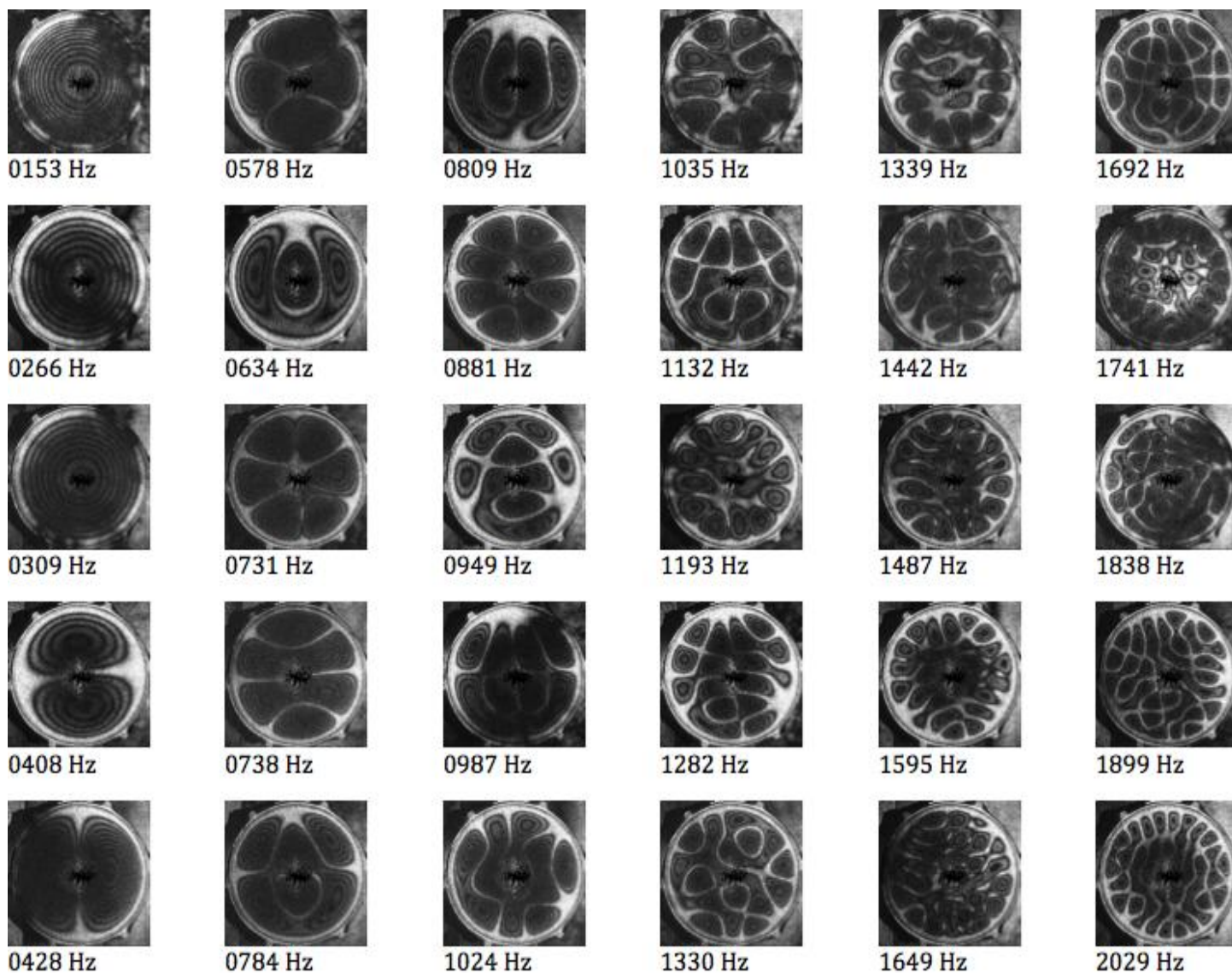
8. Ο συσχετισμός των διαστάσεων των τυμπάνων.

Σε αυτή την ενότητα θα παρατηρήσουμε τι συμβαίνει στις μεμβράνες αν εφαρμόσουμε ίδιες τάσης κουρδίσματος σε δυο toms ενός drumset. Για την πειραματική αυτή μελέτη χρησιμοποιήσαμε το μικρό tom με διάμετρο 25 cm και βάθους 22.4 cm και το μεγάλο tom με διάμετρο 30 cm και βάθος 24 cm της εταιρίας Γκάμπριελ από το στούντιο ηχογραφήσεων του τμήματος μουσικής τεχνολογίας και ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρίας Evans υλικού mylar μονής επίστρωσης για την πίσω μεμβράνη με πάχος 7mm και διπλής επίστρωσης με πάχος 7.5 mm για την μπροστινή μεμβράνη. Οι τάσεις κουρδίσματος που εφαρμόστηκαν στις μεμβράνες είναι αντίστοιχες με αυτές του ταμπούρου της προηγούμενης ενότητας, δηλαδή 65% τάση στην μπροστινή μεμβράνη και 72% τάση στη πίσω μεμβράνη.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το μικρό tom φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες:



Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το μεγάλο τομή φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες:



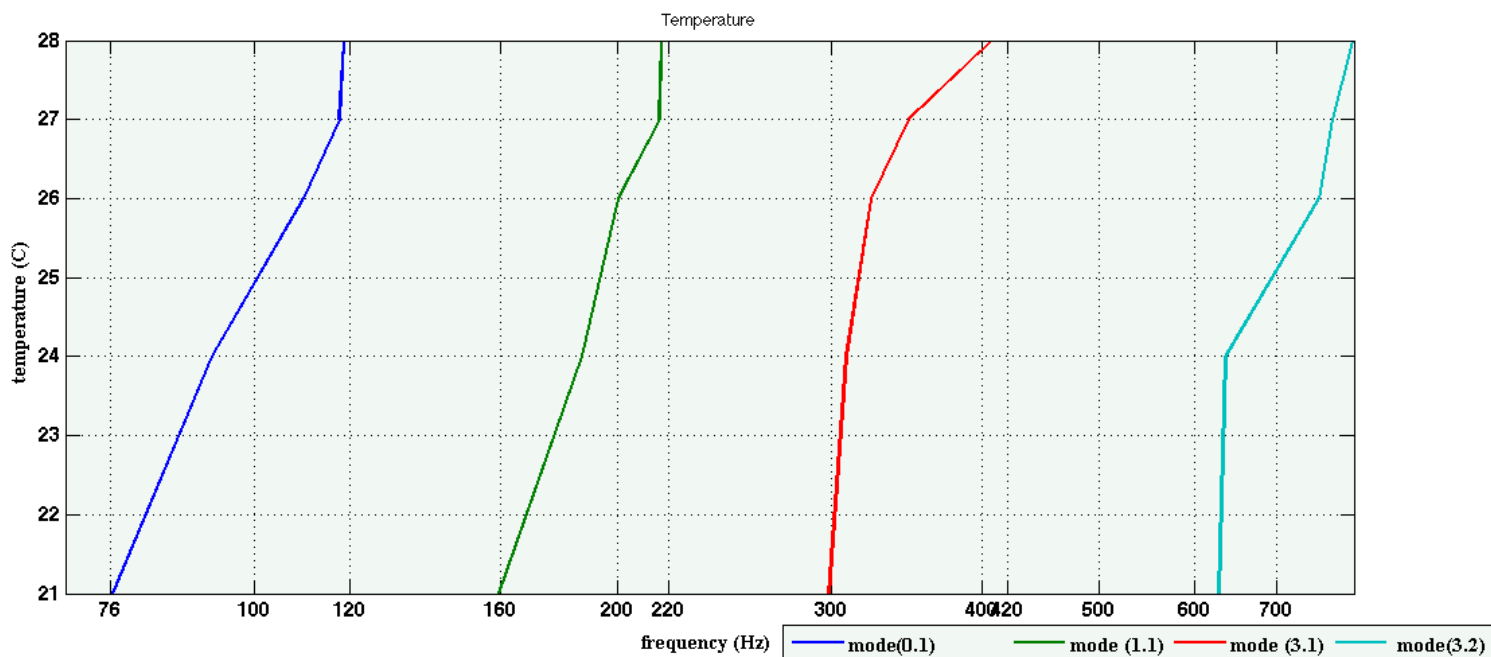
Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε αυτές τις τάσεις κουρδίσματος δεν παρατηρήθηκε κάποια ιδιαίτερη συχνοτική συνοχή μεταξύ των διαφορετικών αέριων κοιλοτήτων. Παρατηρήθηκε όμως σε κάποια πειράματα που έγιναν στο στούντιο ηχογραφήσεων ότι αν εφαρμόσουμε την ίδια τάση κουρδίσματος σε όλες τις μεμβράνες και στις μπροστά και στις πίσω, όπως για παράδειγμα 70% τάση, τα τρία toms έχουν μουσικά απόσταση μίας τρίτης μικρής και δεν προστίθενται επιπλέον κανονικοί τρόποι ταλάντωσης, δηλαδή επιπλέον "ουρά" στο τύμπανο.

9. Η παράμετρος της θερμοκρασίας

Στις πρώτες μετρήσεις που έγιναν στα φυσικά δέρματα της κατσίκας και της αγελάδας παρατηρήθηκαν μεγάλες συχνοτικές αλλαγές, κυρίως τονική ολίσθηση, κατά την αλλαγή της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Σε αυτή τη ενότητα γίνεται μία προσέγγιση σε αυτό το φαινόμενο. Χρησιμοποιήσαμε το κρουστό όργανο μπεντίρ με το φυσικό δέρμα της αγελάδας το οποίο ήταν πολύ ευαίσθητο σε μικρο αλλαγές της θερμοκρασίας. Οι κανονικοί τρόποι δόνησης της μεμβράνης που παρατηρήθηκαν φαίνονται στον πίνακα (**Πίνακας 9.1**) και το γράφημα (**Γράφημα 9.2**).

Συντονισμός 0.1					
Θερμοκρασία	21 ⁰ C	24 ⁰ C	26 ⁰ C	27 ⁰ C	28 ⁰ C
Συχνότητα (Hz)	76.4	92.4	110	117.6	118.7
Συντονισμός 1.1					
Θερμοκρασία	21 ⁰ C	24 ⁰ C	26 ⁰ C	27 ⁰ C	28 ⁰ C
Συχνότητα (Hz)	159.3	186.9	200.2	216.5	217.4
Συντονισμός 3.1					
Θερμοκρασία	21 ⁰ C	24 ⁰ C	26 ⁰ C	27 ⁰ C	28 ⁰ C
Συχνότητα (Hz)	298.7	-	323.9	347.7	407.8
Συντονισμός 3.2					
Θερμοκρασία	21 ⁰ C	24 ⁰ C	26 ⁰ C	27 ⁰ C	28 ⁰ C
Συχνότητα (Hz)	628	636	760	-	811

Πίνακας 9.1: αποτελέσματα των μετρήσεων της θερμοκρασίας



Γράφημα 9.2: Γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων της θερμοκρασίας

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων γίνεται εμφανές ότι στους δυο πρώτους τρόπους δόνησης της μεμβράνης, οι οποίοι είναι και οι κυριότερη και πιο ισχυροί για την απόδοση τονικότητας σε ένα κρουστό, έχουμε μια γραμμική αύξηση της συχνότητας όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, εκτός από τις υψηλότερες τιμές της θερμοκρασίας όπου η τάση της μεμβράνης έχει έρθει στο σημείο κόρου. Έτσι μπορεί να αποδοθεί ότι σε φυσικά δέρματα με πυκνότητα όπως της αγελάδας που χρησιμοποιήθηκε, για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό θα έχουμε και αύξηση της τονικότητας περίπου ενός ημιτόνιο. Ο υπολογισμός αυτός έγινε σύμφωνα με την συγκεκριμένη κλίμακα, στην οποία ο υπολογισμός της απόστασης μεταξύ των ημιτονίων δίνεται από $\sqrt[12]{2} = 1.05946$. Αυτή η αντιστοίχιση της θερμοκρασίας με την τονικότητα θα διαφέρει από μεμβράνη σε μεμβράνη και θα εξαρτάται από την πυκνότητα της μεμβράνης.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν η μελέτη των δονητικών χαρακτηριστικών των κρουστών μουσικών οργάνων μέσω οπτικής διάταξης. Για το λόγο αυτό έγινε μια ιστορική και μορφολογική/κατασκευαστική αναφορά στην οικογένεια των κρουστών. Επίσης παρουσιάστηκε η θεωρητική υποδομή του τρόπου παραγωγής του ήχου στα κρουστά. Δηλαδή πως δημιουργούνται και υπολογίζονται οι τρόποι δόνησης της μεμβράνης αλλά και όλων των παραμέτρων που συντελούν στη τελική χροιά του οργάνου όπως είναι η τάση κουρδίσματος, η θερμοκρασία, το πλαίσιο του κρουστού και η αέρινη κοιλότητα. Για κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους έγινε και μια διαφορετική πειραματική διαδικασία μέσω οπτικών και ακουστικών τεχνικών για την κατανόηση της συμπεριφοράς του οργάνου. Πιο συγκεκριμένα η οπτική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry) μέσω της οποίας γινόταν προσδιορισμός των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφιών των οργάνων. Η ακουστική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ανάλυση προ ηχογραφημένου υλικού η οποία μας έδινε μια πρώτη εικόνα της συμπεριφοράς του οργάνου.

Τα αποτελέσματα των δυο αυτών τεχνικών έδειξαν ότι ο κύριος όγκος του εκπεμπόμενου ήχου βρίσκεται μεταξύ της περιοχής 60 – 2000 Hz. Επίσης παρατηρήθηκε μια γεωμετρική μείωση του πλάτους σε όλο το ακουστό εύρος με τις δυνατότερες κορυφές πλάτους να παίρνουν θέση στις χαμηλότερες συχνότητες.

Η μελέτη της τάσης κουρδίσματος έγινε σε δύο μεμβράνες φυσικών δερμάτων διαφορετικής πυκνότητας. Οι τρόποι δόνησης αυτών συγκρίθηκαν με το αντίστοιχο θεωρητικό μοντέλο που παρουσιάστηκε. Παρατηρήθηκε ότι για την μία από τις δυο μεμβράνες η οποία δεν ήταν τόσο ευάλωτη στη θερμοκρασία, τα αποτελέσματά της σχεδόν ταυτίστηκαν με τα αποτελέσματα της θεωρίας. Επίσης μία άλλη πειραματική διαδικασία η οποία μελετήθηκε με βάση την τάση κουρδίσματος ήταν η παρατήρηση των ανομοιομορφιών που προκύπτουν από την λάθος τάση κουρδίσματος.

Το συμπέρασμα που παρατηρήθηκε κατά την μελέτη του πλαισίου του κρουστού ήταν ότι το πλαίσιο έχει ένα βασικό ρόλο τόσο στην χροιά όσο και στην τονικότητα του κρουστού μουσικού οργάνου.

Η επόμενη παράμετρος που μελετήθηκε ήταν η προσθήκη της πίσω μεμβράνης σε ένα κρουστό. Η μετατροπή δηλαδή του κλειστού-ανοιχτού σωλήνα σε κλειστού-κλειστού σωλήνα. Τα αποτελέσματα της μέτρησης οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η πίσω μεμβράνη επιδρά αισθητά στην θεμελιώδη συχνότητα αλλά και στον παράγοντα Q των συχνοτήτων των ιδιοσυχνοτήτων του κρουστού.

Μια άλλη παρατήρηση έγινε και στην μέτρηση των τομς, στην οποία η μέτρηση έδειξε ότι εάν εφαρμοστούν ίδιες τάσεις κουρδίσματος σε όλες τις μεμβράνες των κρουστών τα κρουστά θα απέχουν μουσικά μεταξύ τους μία τρίτη μικρή.

Η τελευταία παράμετρος που μελετήθηκε ήταν η θερμοκρασία. Κατά την μελέτη της θερμοκρασία προέκυψε ότι ο επηρεασμός αυτής γίνεται μόνο σε μεμβράνες φυσικών δερμάτων. Το αποτέλεσμα της μέτρησης επίσης έδωσε ένα συσχετισμό της θερμοκρασία με την τονικότητα, όπου για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό Κελσίου γινόταν αύξηση της τονικότητας κατά ένα περίπου ημίτονο.

Όπως διαπιστώνεται η παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να θεωρηθεί ως μια θεμελιακή αρχή η οποία ανοίγει νέους δρόμους για την μελέτη των κρουστών μουσικών οργάνων.

Ως αποτέλεσμα αυτού ανοίγεται ένας μεγάλος τομέας που αποσκοπεί στην παράμετρο της θερμοκρασίας. Θα μπορούσε αυτή η παράμετρος να εξεταστεί σε περισσότερες μεμβράνες φυσικών δερμάτων με διαφορετικές πυκνότητες και σε διαφορετικές εποχές του χρόνου (χειμώνα, καλοκαίρι,...), με αποτέλεσμα να γίνει μία μοντελοποίηση η οποία να πληροφορεί τον μουσικό ή τον αντίστοιχο ενδιαφερόμενο, ότι κάθε αλλαγή της θερμοκρασίας θα επιφέρει την εκάστοτε αύξηση ή μείωση της συχνότητας και κατ επέκταση της τονικότητας του κρουστού μουσικού οργάνου.

Επίσης θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να γίνει μία μεγαλύτερη εμβάθυνση στον τομέα της ερευνητικής διαδικασίας της μελέτης του ξύλου των κρουστών. Θα μπορούσαν για παράδειγμα να μελετηθούν κι άλλα είδη ξύλων όπως είναι το σφεντάμι ή η μαύρη καρδιά, τα οποία είναι επίσης “σκληρά” ξύλα και χρησιμοποιούνται ευρέως στην οργανοποιία, στις ίδιες διαστάσεις και με τις ίδιες πυκνότητες στις μεμβράνες. Με αποτέλεσμα να γνωρίζουμε πως επηρεάζουν τα δονητικά χαρακτηριστικά του κάθε ξύλου την γενική συμπεριφορά του οργάνου.

Επίσης στη περίπτωση της ερευνητικής διαδικασίας του ξύλου θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να μελετηθούν τα δονητικά χαρακτηριστικά σε τύμπανα κλειστά και στα δύο τους άκρα όπως είναι το τομ και το ταμπούρο που μελετήθηκαν. Με σκοπό να συγκριθεί με την θεωρητική μοντελοποίηση η οποία θεωρεί ότι οι τρόποι δόνησης του ξύλου συνεισφέρουν μόνο στην χροιά του οργάνου και όχι στην τονικότητα.

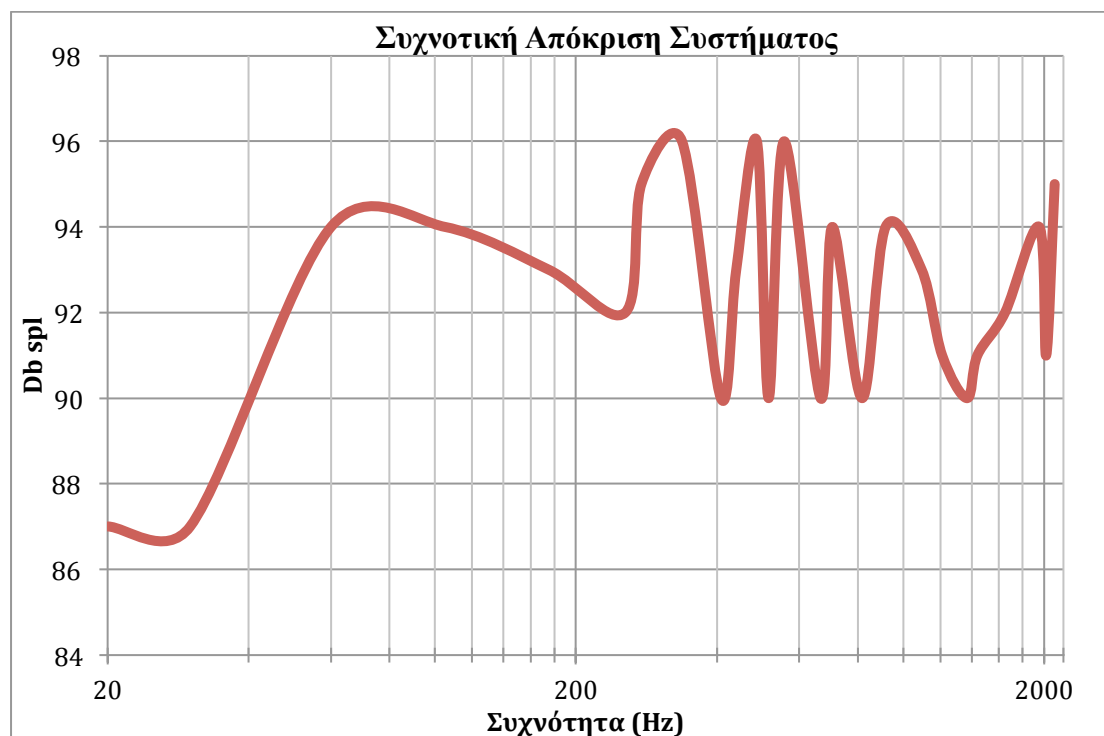
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Συχνοτική απόκριση του συστήματος

Για την καλύτερη απόδοση στην ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, μετρήθηκε η συχνοτική απόκριση του όλου συστήματος. Δηλαδή πως αποκρινόταν το ηχείο και ο χώρος στο σημείο τοποθέτησης των κρουστών.

Έτσι τοποθετήθηκε στην ειδική βάση στήριξης των κρουστών ένα ηχόμετρο και εφαρμόστηκαν οι ίδιες τάσης ρεύματος με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν σε όλη τη πειραματική διαδικασία, για την διέγερση του ηχείου.

Η παρακάτω γραφική παράσταση μας πληροφορεί για την συχνοτική απόκριση αυτού.



Από την γραφική παράσταση παρατηρήθηκε ότι η συχνοτική απόκριση του ηχείου κυμαίνεται σε ένα εύρος έντασης +/- 6 Db spl. Οπότε με αυτή τη πληροφορία μπορούμε να διαχειριστούμε τα αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια.

7. Βιβλιογραφία

Ελληνική

- Βάθης, Β. (2007). *Ανακατασκευή, ακουστική μελέτη και εκτέλεση αρχαίας ελληνικής λύρας (χέλυσ)*. Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο.
- Καρώνης, Δ. (2009). *Κατασκευή και έλεγχος λειτουργίας οπτικών διατάξεων ανίχνευσης ήχων*. Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο.
- Μάρκου, Η. Μ., & Καϊμακάμη, Θ. Σ. (2008). *Προσομοίωση οπτικού συμβολομέτρικου διακόπτη Mach - Zehnder με ημιαγωγίμους οπτικούς ενισχυτές*. Πτυχιακή εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Πληροφορικής.
- Μήτσου, Γ. (2007). *Συμβολομετρία Fabry – Pérot*. Εργαστήριο φυσικής οπτικής – οπτοηλεκτρονικής & LASER, Τμήμα Φυσικής – Χημείας & Τ/Υ.
- Παπαδιαμάντης, Α. (2007). *Ανάπτυξη & κατασκευή συμβολομέτρου προβολής αμφιστροειδών κροσσών, για την παράκαμψη των οπτικών στοιχείων του οφθαλμού*. Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Κρήτης.
- Πατσάς, Κ. (2009). *Ανάπτυξη τροποποιημένων τεχνικών ολογραφικής συμβολομετρίας ESPI για την μελέτη κανονικών τρόπων ταλάντωσης επιφανειών*. Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο.
- Σκαρλάτος, Δ. (2008). *Εφαρμοσμένη ακουστική* (Γ' έκδοση). Πάτρα: εκδόσεις Gotsis.
- Χαρτοφύλακας, Λ. (2007). *Διερεύνηση του ρόλου των δονητικών χαρακτηριστικών του αντηχείου έγχορδων παραδοσιακών μουσικών οργάνων και συγκεκριμένα κρητικής λύρας, στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του φυσικά εκπεμπόμενου ήχου*. Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο.

Ξενόγλωσση

- Fletcher, N. H., & Rossing, T. D. (1998). *The physics of musical instruments* (2nd ed.). Springer science and business media, library of congress cataloging-in-publication data.
- Hall, D. E. (1990). *Musical acoustic* (2nd ed.). California: Brooks/Cole publishing company grove.
- Hecht, E. (2002). *Optics*. Addison – Wesley.
- Rastogi, P. K. (1989). *Digital speckle pattern interferometry and related techniques*. New York: Cambridge University Press.
- Rossing, T. D. (2000). *Science of percussions instruments. Series in popular science – Vol. 3*. World scientific publishing Co. Pte. Ltd.
- Scruby, C. B., & Drain, L. E. (1990). *Laser ultrasonics: techniques and applications*. Taylor & Francis Group.
- Siegman, A. E. (1996). *Lasers*. University Science Books.
- Sirohi, R. S., & Chau, F. S. (1999). *Optical methods of measurement: Wholefield techniques*. New York: Marcel Dekker Inc.

Ηλεκτρονική

- Διάφορα ιστορικά στοιχεία περί των κρουστών οργάνων, από <http://drumlife-sakissab.blogspot.gr/2009/01/blog-post.html> (12/03/13).
- Circular membrane mode, from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/music/cirmem.html> (12/03/13).
- Helmholtz resonant, from <http://www.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html> (12/03/13).
- What you need to know about drumheads, from <http://www.moderndrummer.com/site/2011/10/what-you-need-to-know-about-drumheads/> (12/03/13).