

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Τέχνες και τεχνολογίες του ήχου

κατεύθυνση: Ηλεκτρονική Μουσική Τεχνολογία

**Ακουστική και ηχητική ανάλυση των οργάνων της οικογένειας του
μπουζουκιού**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λεωνίδας Χαρτοφύλακας

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Δρ. Ανδρέας Φλώρος, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Τ.Η.Ε, Επιβλέπων

Δρ. Νεκτάριος Παπαδογιάννης, Καθηγητής, Τ.Ε.Ι Κρήτης

Ανδρέας Μνιέστρης, Επίκουρος Καθηγητής

Κέρκυρα, Δεκέμβρης 2009

Copyright © Λεωνίδα Χαρτοφύλακας, 2009.

Με επιφύλαξη κάθε νόμιμου δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Το βασικό μέρος της έρευνας της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε στο **Εργαστήριο Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής** του Τ.Ε.Ι. Κρήτης (Ρέθυμνο) υπό την επίβλεψη του Καθηγητή και Διευθυντή του παραπάνω εργαστηρίου **Δρ. Νεκτάριου Παπαδογιάννη**. Στο εργαστήριο αυτό έχουν αναπτυχθεί διατάξεις πιστοποίησης μουσικών οργάνων με την χρήση συμβολομετρικών τεχνικών laser στα πλαίσια των Προγραμμάτων «Αρχιμήδης», ΕΠΕΑΕΚ για την ενίσχυση των ερευνητικών ομάδων ΤΕΙ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω και να αφιερώσω την παρούσα εργασία σε όλους αυτούς που συνέβαλαν, ο καθένας με τον δικό του μοναδικό τρόπο, στη διεκπεραίωσή της:

Νότη Λιάπη, Γιώργο Μανίκα, Μανόλη Παπαδάκη, Γιάννη Ορφανό, Σπύρο Μπρέζα, Μάκη Μπακαρέζο, Ανδρέα Μνιέστη, Ανδρέα Φλώρο και Νεκτάριο Παπαδογιάννη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετώνται τα δονητικά και ηχητικά χαρακτηριστικά επτά ολοκληρωμένων οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού, δύο τρίχορδων και ενός τετράχορδου μπουζουκιού, δύο οργάνων τζουρά και δύο μπαγλαμά. Η καταγραφή και ανάλυση των τρόπων δόνησης των οργάνων πραγματοποιείται μέσω της ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (ESPI), και μηχανικών τεχνικών ανίχνευσης δονήσεων. Η μελέτη των χαρακτηριστικών του εκπεμπόμενου ήχου των οργάνων και της επίδρασης του εκτελεστή σε αυτόν πραγματοποιείται μέσω καταγραφής επαρκούς αριθμού ηχητικών δειγμάτων και ανάλυσης στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας. Οι σχέσεις που συνδέουν τις δονητικές και ηχητικές ιδιότητες των οργάνων μελετώνται μέσω της παράλληλης ανάλυσης των αποτελεσμάτων και προσδιορίζονται οι βασικοί τρόποι δόνησης που συμβάλουν στην διαμόρφωση του εκπεμπόμενου ήχου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.ΤΑ ΟΡΓΑΝΑ ΤΗΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΜΠΟΥΖΟΥΚΙΟΥ	4
1.1 Περιγραφή	
1.2 Χορδές και κουρδίσματα	5
1.3 Τα τμήματα των οργάνων	6
1.4 Διαστάσεις και παραλλαγές στην γεωμετρία των οργάνων	8
1.5 Υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των οργάνων	10
1.6 Η επιλογή των οργάνων της μελέτης	11
2.Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΕΓΧΟΡΔΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ (ΘΕΩΡΙΑ)	12
2.1 Το «σύστημα» οργανοπαίκτης-όργανο-δωμάτιο ακρόασης	
2.2 Χορδές	14
2.3 Τα ελεύθερα τμήματα των οργάνων	23
2.4 Σχέσεις σύζευξης στα ολοκληρωμένα όργανα	28
3.ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	34
3.1 Καταγραφή και ανάλυση της ηχητικής εκπομπής των οργάνων	
3.1.1 Διαδικασία της δειγματοληψίας	34
3.1.2 Ανάλυση των ηχητικών δειγμάτων	39
3.2 Μέθοδοι μελέτης των δονητικών χαρακτηριστικών	43
3.2.1 Χρονικά Ολοκληρωμένη Ηλεκτρονική Συμβολομετρία Ψηφίδων ((ESPI)	
3.2.2 Απόκριση σε στιγμιαία διέγερση	49
ΤΡΙΧΟΡΔΟ ΜΠΟΥΖΟΥΚΙ (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ)	54
4.1 Δονητικά χαρακτηριστικά	54
4.1.1 Τρίχορδο μπουζούκι 1	55
4.1.2 Τρίχορδο μπουζούκι 2	62
4.2 Τρίχορδο μπουζούκι 1- Ήχος και δονήσεις	66
4.3 Τρίχορδο μπουζούκι 2- Ήχος και δονήσεις	92
ΤΕΤΡΑΧΟΡΔΟ ΜΠΟΥΖΟΥΚΙ (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ)	97
5.1 Δονητικά χαρακτηριστικά	97
5.2 Ηχητικά χαρακτηριστικά	101
5.2.1 Ανάλυση σε μονές χορδές	
5.2.2 Διπλές χορδές	108

ΤΖΟΥΡΑΣ ΚΑΙ ΜΠΑΓΛΑΜΑΣ (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ)	115
6.1 Τζουράς 1	
6.1.1 Τρόποι δόνησης	
6.1.2 Απόκριση συχνότητας και ενεργειακές κατανομές του ήχου	117
6.2 Τζουράς 2	126
6.3 Τα όργανα του μπαλαμά	133
6.3.1 Μπαλαμάς 2	
6.3.2 Μπαλαμάς 1	141
Σύνοψη και μελλοντική εργασία	144
Αναφορές	146

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ακουστική των παραδοσιακών μουσικών οργάνων

Η συστηματική μελέτη των φυσικών, μηχανικών και ηχητικών ιδιοτήτων των μουσικών οργάνων έχει γνωρίσει ιδιαίτερη άνθιση τις τελευταίες δεκαετίες. Σε αυτό έχουν συμβάλει τόσο η εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών όσο και το ενδιαφέρον των μουσικών, των οργανοποιών και των ερευνητών που σχετίζεται με την ευρύτερη κατανόηση της λειτουργίας αυτών των πολύπλοκων συστημάτων. Έτσι, στα χρονικά πλαίσια που εξελίσσεται η παρούσα εργασία τα περισσότερα χαρακτηριστικά που αφορούν στην βασική λειτουργία των μουσικών οργάνων που ανήκουν στις οικογένειες των εγχόρδων, των πνευστών και των πληκτροφόρων έχουν γίνει πλήρως κατανοητά.

Όμως, ο κυριότερος όγκος της έρευνας που έχει πραγματοποιηθεί αφορά στα πιο δημοφιλή όργανα του δυτικού κόσμου που είναι το βιολί και η κιθάρα. Αντιθέτως, οι πληροφορίες που σχετίζονται με την λειτουργία των παραδοσιακών οργάνων είναι περιορισμένες. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στην Ελλάδα με εξαίρεση την τελευταία πενταετία όπου έχει δημοσιευθεί ένας μικρός αριθμός σημαντικών ερευνών με αντικείμενο τις ακουστικές ιδιότητες και την ηχητική ανάλυση τόσο πνευστών που ανήκουν στην οικογένεια του ζουρνά [1,2] όσο και εγχόρδων τοξωτών παραδοσιακών οργάνων Κρητικής λύρας [3].

Στην πραγματοποίηση των προαναφερθέντων ερευνών είναι καίριας σημασίας η συμβολή του εργαστηρίου Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής (Μ.Τ.Α) του Τ.Ε.Ι. Κρήτης (Ρέθυμνο). Εκεί, εκτός άλλων έχει αναπτυχθεί η σύγχρονη μέθοδος οπτικής απεικόνισης δονήσεων (ESPI) που αποτελεί εξέλιξη της παραδοσιακής ολογραφίας η οποία έχει χρησιμοποιηθεί αρκετές φορές για τον προσδιορισμό των δονητικών χαρακτηριστικών τόσο του βιολιού όσο και της κιθάρας.

Προσέγγιση της ακουστικής και ηχητικής ανάλυσης των οργάνων στην παρούσα εργασία

Στην παρούσα εργασία μελετώνται οι δονητικές και ηχητικές ιδιότητες 7 αντιπροσωπευτικών οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού. Συγκεκριμένα μελετώνται δύο τρίχορδα μπουζούκια, ένα τετράχορδο, δύο όργανα τζουρά και δύο μπαγλαμά.

Οι τρόποι δόνησης των διαφορετικών οργάνων μελετώνται με την μέθοδο της ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (ESPI). Επίσης, καταγράφεται και μελετάται η συχνοτική απόκριση των οργάνων σε μηχανική διέγερση και διέγερση με κρούση σε δύο διαφορετικές θέσεις πάνω στα όργανα μέσα σε στούντιο ηχογραφήσεων.

Στην συνέχεια τα όργανα εκτελούνται από επαγγελματία οργανοπαίκτη και καταγράφεται ένας μεγάλος αριθμός δειγμάτων σε δύο διαφορετικές θέσεις λήψης μέσα σε στούντιο ηχογραφήσεων που αφορά τόσο μεμονωμένες νότες όσο και διαφορετικά μουσικά κομμάτια. Τα δείγματα που καταγράφονται καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών τεχνικών εκτέλεσης όπως είναι τα διαφορετικά δυναμικά επίπεδα, οι διαφορετικές θέσης διέγερσης κατά μήκος της χορδής και η διαφορετική γωνία και φορά διέγερσης.

Τα όργανα της οικογένειας του μπουζουκιού αποτελούνται από ζεύγη χορδών. Για την μελέτη της αλληλεπίδρασης των διπλών χορδών καταγράφεται ένας μεγάλος αριθμός νοτών που εκτελούνται με μονές χορδές στα υπό μελέτη όργανα. Ωστόσο, στην εκτέλεση με μονές χορδές δεν αφαιρούνται τα ζεύγη των χορδών καθώς αυτό θα μετέβαλε δραστικά τα χαρακτηριστικά των οργάνων.

Στην συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση των ηχητικών δειγμάτων που καταγράφονται η οποία πραγματοποιείται στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας με χρήση συγκεκριμένων λογισμικών. Για την μαζική επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων αναπτύσσεται ειδικός προγραμματιστικός κώδικας.

Από τα αποτελέσματα της μελέτης προσδιορίζονται τα βασικότερα δονητικά και ηχητικά χαρακτηριστικά των οργάνων και οι βασικές σχέσεις από τις οποίες διέπονται.

Σκοπός της μελέτης

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός των σημαντικότερων ακουστικών χαρακτηριστικών των οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στο τρίχορδο μπουζούκι το οποίο είναι αντικειμενικά το πιο διαδεδομένο ελληνικό μουσικό όργανο σε οικουμενικό επίπεδο. Στα ακουστικά χαρακτηριστικά των οργάνων συγκαταλέγεται τόσο η δονητική τους συμπεριφορά όσο και ο εκπεμπόμενος ήχος τους.

Όσο αφορά την δονητική συμπεριφορά η συγκεκριμένη εργασία έχει ως στόχο τον εντοπισμό των βασικών τρόπων δόνησης όπως διαμορφώνονται στα ολοκληρωμένα όργανα. Το σημείο παρατήρησης είναι το καπάκι λόγω της εξέχουσας σημασίας που κατέχει στην διαμόρφωση του εκπεμπόμενου ήχου όπως προκύπτει και από το σύνολο της εργασίας.

Τα χαρακτηριστικά του ήχου των οργάνων μελετώνται στο πεδίο της συχνότητας και του χρόνου αντίστοιχα από όπου προκύπτουν πληροφορίες για τον τρόπο που διαμορφώνονται τόσο από τον οργανοπαίκτη όσο και από την δονητική συμπεριφορά του εκάστοτε οργάνου και βρίσκουν χρήση εκτός από τομέα της μουσικής ακουστικής, στους αντίστοιχους της σύνθεσης ήχου όσο και της ψυχοακουστικής.

Ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο 1 πραγματοποιείται η παρουσίαση των οργάνων που μελετώνται σε επίπεδο δομής με στόχο την εξοικείωση του αναγνώστη με τα όργανα που απασχολούν την εργασία.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται ο τρόπος που λειτουργούν τα έγχορδα μουσικά όργανα μέσω της πολυετούς έρευνας που έχει πραγματοποιηθεί στην κιθάρα και το βιολί.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη με στόχο την καταγραφή των ακουστικών χαρακτηριστικών των οργάνων. Περιγράφεται η διαδικασία της δειγματοληψίας μέσω της οποίας πραγματοποιήθηκε η καταγραφή του ηχητικού υλικού από τα όργανα. Γίνεται αναφορά στις παραμέτρους που μεταβλήθηκαν κατά αυτήν την διαδικασία ενώ παράλληλα αναφέρεται και ο σκοπός της κάθε πειραματικής εφαρμογής. Περιγράφεται η μέθοδος μέσω της οποίας εφαρμόστηκε η ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων με στόχο τον προσδιορισμό των βασικών τρόπων δόνησης των οργάνων.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα δονητικά και ηχητικά χαρακτηριστικά του τρίχορδου μπουζουκιού.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα δονητικά και ηχητικά χαρακτηριστικά του τετράχορδου μπουζουκιού.

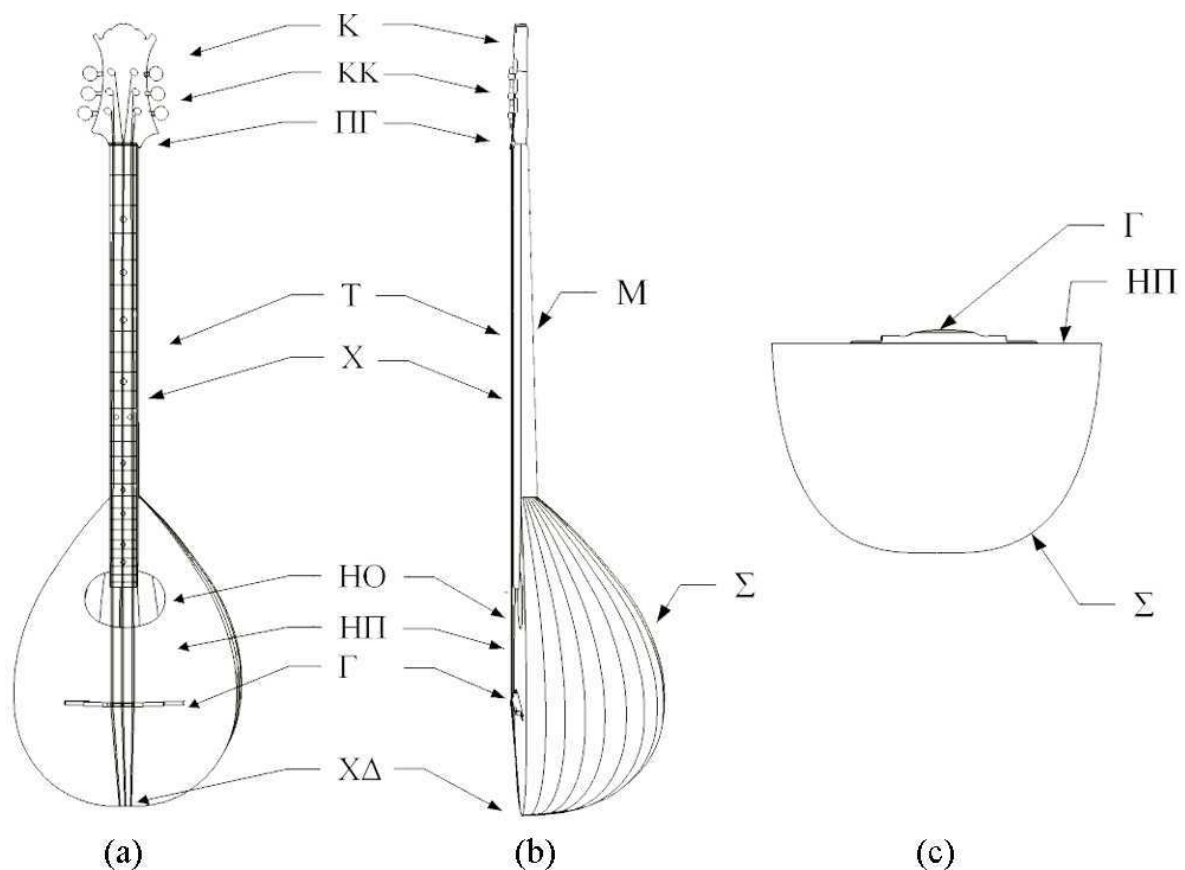
Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα δονητικά και ηχητικά χαρακτηριστικά των μικρότερων οργάνων της οικογένειας που είναι ο τζουράς και ο μπαγλαμάς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΤΑ ΟΡΓΑΝΑ ΤΗΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΜΠΟΥΖΟΥΚΙΟΥ

1.1 Περιγραφή

Τα όργανα της οικογένειας του μπουζουκιού ανήκουν στα έγχορδα νυκτά μουσικά όργανα. Είναι συγκερασμένα, με ζεύγη χορδών χορδισμένα είτε σε ταυτοφωνία είτε σε διάστημα οκτάβας, έχουν μακρύ λαιμό (μπράτσο) και αχλαδόσχημο αντηχείο. Από μικρότερο σε διαστάσεις έως το μεγαλύτερο είναι ο μπαγλαμάς, ο τζουράς και το μπουζούκι που συναντάται σε δύο μορφές, αυτήν με 3 και 4 ζεύγη χορδών που ονομάζονται τρίχορδο και τετράχορδο αντίστοιχα. Τα βασικά τμήματα ενός τρίχορδου μπουζουκιού φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 1.1) και παρουσιάζονται αντίστοιχα σε όλα τα όργανα της οικογένειας διαφοροποιημένα κυρίως σε ότι αφορά τις διαστάσεις και το σχήμα τους.



Εικόνα 1.1: Τρίχορδο μπουζούκι, (a) πρόσοψη, (b) κατατομή, (c) τομή στο κέντρο, με το κεφάλι (Κ), τα κλειδιά (ΚΚ), τον πάνω καβαλάρη ή γέφυρα (ΠΓ), την ταστιέρα (Τ), τα ζεύγη χορδών (Χ), την ηχητική οπή (ΗΟ), το καπάκι ή ηχητική πλάκα (ΗΠ), την γέφυρα ή καβαλάρη (Γ), τον χορδοδέτη (ΧΔ), το σκάφος ή πλάτη (Σ) και το μπράτσο (Μ).

1.2 Χορδές και κουρδίσματα

Εκτός από το τετράχορδο μπουζούκι που όπως αναφέρθηκε έχει 4 ζεύγη χορδών (8 χορδές) τα υπόλοιπα όργανα έχουν από 3 και ο βασικός τρόπος κουρδίσματός τους φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

	Μπαγλαμάς		Τζουράς και Τρίχορδο Μπουζούκι		Τετράχορδο Μπουζούκι	
	Νότα	Συχνότητα(Hz)	Νότα	Συχνότητα(Hz)	Νότα	Συχνότητα(Hz)
1ο ζεύγος	D4	293,6	D3	146,8	C3	130,8
	D5	587,3	D4	293,7	C4	261,6
2ο ζεύγος	A4	440	A3	220	F3	174,6
	A4	440	A3	220	F4	349,2
3ο ζεύγος	D5	587,3	D4	293,6	A3	220
	D5	587,3	D4	293,6	A3	220
4ο ζεύγος					D4	293,6
					D4	293,6

Πίνακας 1.1: Κούρδισμα των οργάνων

Από τον πίνακα παρατηρείται πως το πρώτο ζεύγος χορδών για τον μπαγλαμά τον τζουρά και το τρίχορδο μπουζούκι είναι κουρδισμένο σε διάστημα οκτάβας ενώ το ίδιο διάστημα ισχύει για τα 2 πρώτα ζεύγη χορδών του τετράχορδου μπουζουκιού. Τα υπόλοιπα ζεύγη κουρδίζονται στην ίδια συχνότητα (ταυτοφωνία). Ο μπαγλαμάς είναι κουρδισμένος μια οκτάβα υψηλότερα από τα υπόλοιπα όργανα της οικογένειας.

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του τρόπου κουρδίσματος των οργάνων είναι πως το τρίχορδο μπουζούκι έχει το ίδιο κούρδισμα με τον τζουρά παρόλο που τα δύο όργανα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές που επικεντρώνονται κυρίως στις διαστάσεις τους. Τέλος, σημαντικό χαρακτηριστικό του τετράχορδου μπουζουκιού σε σχέση με το τρίχορδο και τον τζουρά είναι πως παρά το επιπλέον ζεύγος χορδών η έκταση του οργάνου είναι μόλις ένα τόνο μεγαλύτερη στην χαμηλότερη (σε συχνότητα) νότα του οργάνου.

Για λόγους ευκολίας σημειώνεται σε αυτό το σημείο πως εθιμοτυπικά η υψηλότερη σε συχνότητα χορδή των οργάνων αναφέρεται ως η πρώτη σε σειρά σε όλα τα έγχορδα μουσικά όργανα. Ωστόσο στην παρούσα εργασία συνήθως για τον προσδιορισμό του εκάστοτε ζεύγους χρησιμοποιείται η νότα στην οποία αντιστοιχεί η θεμέλιός τους, τόσο για τα ζεύγη που είναι χορδισμένα σε ταυτοφωνία όσο και στα αντίστοιχα της οκτάβας. Έτσι για παράδειγμα στο τρίχορδο μπουζούκι γίνεται αναφορά για του πρώτο ζεύγος με τον όρο «χορδή D4» ενώ για τα υπόλοιπα «χορδή A3» και «χορδή D3» αντίστοιχα.

1.3 Τα τμήματα των οργάνων

1.3.1 Σκάφος

Το σκάφος (ή σκάφη) των οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού έχει σχήμα ημιελλειψοειδές, αχλαδοειδές ή αμυγδάλου. Ωστόσο, η συνολική γεωμετρία του σκάφους αποτελεί προσωπική επιλογή του κατασκευαστή. Η τεχνική που εφαρμόζεται από τους οργανοποιούς για την κατασκευή των σκαφών είναι γνωστή με το όνομα «τεχνική της φέτας» [4]. Ο κατασκευαστής του σκάφους δημιουργεί ένα πρότυπο σκελετό (καλούπι) με το σχήμα που επιθυμεί να έχει το εν λόγω τμήμα του οργάνου. Πάνω στο καλούπι αυτό τοποθετούνται στην συνέχεια λεπτές ξύλινες φέτες γνωστές και ως «δούγκες» ή «ντούγιες» που ενώνονται μεταξύ τους σχηματίζοντας το τελικό σκάφος.

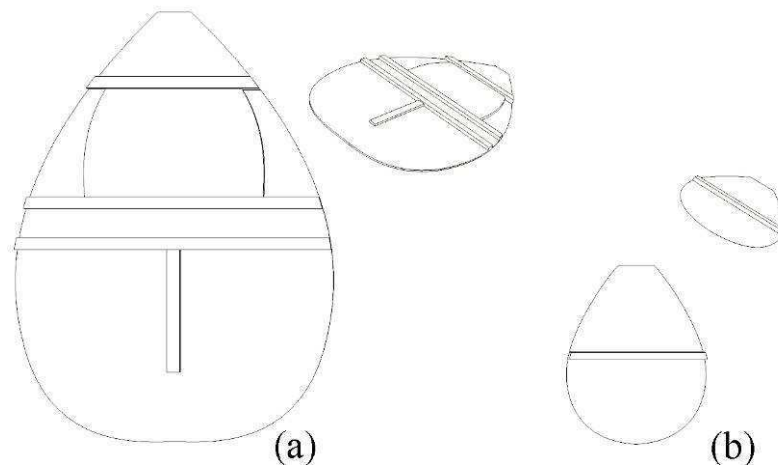
Ακόμα, στα μικρότερα όργανα της οικογένειας (μπαγλαμά και τζουρά) συχνά εμφανίζεται και η τεχνική του σκαφτού σκάφους όπου ένα ενιαίο κομμάτι ξύλου δέχεται την κατάλληλη επεξεργασία ώστε να αποκτήσει το τελικό επιθυμητό σχήμα.

1.3.2 Καπάκι

Το καπάκι (ή ηχητική πλάκα) του μπουζουκιού είναι το τμήμα που συνδέεται με το σκάφος σχηματίζοντας το αντηχείο του οργάνου. Το πάχος των καπακιών πρέπει να είναι αρκετά μικρό (2-3mm) ώστε να μπορεί να ταλαντώνεται με πλάτος τέτοιο που να παράγει αξιόλογης έντασης ήχο. Ο συνδυασμός όμως του μικρού πάχους των καπακιών με την κάθετη τάση που δέχονται από τις χορδές μπορεί να αποβεί «καταστροφικός» σε ένα έγχορδο όργανο. Για τον λόγο αυτό στα καπάκια εφαρμόζεται επιπλέον οπλισμός με την μορφή ξύλινων τμημάτων που στην ορολογία των οργανοποιών είναι γνωστά ως «καμάρια».

Όπως φαίνεται από την εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 1.2) οπλισμός του καπακιού στο μπουζούκι αποτελείται βασικά από 3 καμάρια τα οποία τοποθετούνται οριζόντια και 1 που τοποθετείται κάθετα κάτω από την περιοχή που εφαρμόζεται η γέφυρα των οργάνων. Επίσης, αναφέρεται πως υπάρχει και στήριξη εκατέρωθεν της οπής η οποία επιτυγχάνεται με 2 τρόπους : 1) Με χρήση 2 μικρότερων στηριγμάτων που τοποθετούνται εκατέρωθεν της οπής και 2) Με αύξηση του πάχους του καπακιού γύρω από την οπή (όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2). Αντίστοιχα, στον μπαγλαμά τοποθετείται ένα μόνο οριζόντιο στήριγμα. Ο οπλισμός στα καπάκια του τζουρά είναι αντίστοιχος με αυτόν στον μπαγλαμά. Ωστόσο, δεν είναι σπάνιο φαινόμενο η τοποθέτηση περισσότερων στηριγμάτων εάν ο κατασκευαστής κρίνει αναγκαία την ύπαρξή τους.

Οι ακριβείς διαστάσεις των καμαριών και οι θέσεις τοποθέτησής τους στα καπάκια είναι πιθανό να διαφέρουν τόσο μεταξύ των οργανοποιών αλλά και ανάμεσα σε όργανα του ίδιου οργανοποιού και για τον λόγο στην παρούσα εργασία δεν δύναται να απαντηθούν τέτοιου είδους ερωτήματα.



Εικόνα 1.2: Οπλισμός καπακιών (a) μπουζουκιού και (b) μπαγλαμά

1.3.3 Η γέφυρα

Η γέφυρα (ή καβαλάρης) είναι το τμήμα του οργάνου κατά μήκος του οποίου εκτείνονται οι χορδές. Η σημασία του στην λειτουργία του οργάνου είναι καίρια καθώς μεταφέρει τις δονήσεις των χορδών στα καπάκια και αντίστροφα. Έτσι, με βάση τα δονητικά της χαρακτηριστικά λειτουργεί ως ένα φίλτρο στο σήμα εισόδου των οργάνων, που είναι οι δονήσεις των χορδών. Χαρακτηριστικό της γέφυρας των υπό μελέτη οργάνων είναι το ότι μπορεί να ταλαντώνεται και «ανεξάρτητα» από το καπάκι από την στιγμή που δεν είναι κολλημένη σε αυτό, σε αντίθεση με το αντίστοιχο τμήμα στην κιθάρα.

1.3.4 Μπράτσο και ταστιέρα

Το μπράτσο (ή μανίκι) είναι το τμήμα του οργάνου πάνω στο οποίο εφαρμόζεται η ταστιέρα. Προσαρμόζεται στο αντηχείο των οργάνων στο ένα άκρο του και στο άλλο προσαρμόζεται το κεφάλι όπου τοποθετούνται τα κλειδιά για το κούρδισμα των χορδών.

Ο αριθμός των μεταλλικών τάστων που τοποθετούνται στην ταστιέρα όργανα είναι 26 με 27 για τα περισσότερα σύγχρονα όργανα διαμορφώνοντας έτσι την συνολική τους έκταση η οποία ξεπερνά συνολικά τις 3 οκτάβες κατά 2-3 ημιτόνια για όλα τα όργανα εκτός του τετράχορδου μπουζουκιού που η έκταση του οποίου είναι κατά ένα τόνο (2 ημιτόνια) μεγαλύτερη.

1.4 Διαστάσεις και παραλλαγές στην γεωμετρία των οργάνων

Τα όργανα της οικογένειας του μπουζουκιού όπως και τα περισσότερα παραδοσιακά όργανα παρότι «τηρούν» κάποιες βασικές αρχές ως προς την γεωμετρία των τμημάτων τους εμφανίζονται συχνά με αρκετές παραλλαγές. Ιδίως τα μικρότερα όργανα όπως ο τζουράς και ο μπαγλαμάς μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ακόμα και όταν κατασκευάζονται από τον ίδιο οργανοποιό.

Για το τρίχορδο μπουζούκι ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχουν διαμορφωθεί κάποια βασικά χαρακτηριστικά που αφορούν στις διαστάσεις των καπακιών και το ενεργό μήκος χορδής και φαίνεται να ακολουθούνται από τους περισσότερους οργανοποιούς.

1.4.1 Ενεργό μήκος χορδών και στατική τάση

Το ενεργό μήκος χορδής των οργάνων που μελετώνται στην παρούσα εργασία εμφανίζεται στον πίνακα που ακολουθεί μαζί με την τάση υπό την οποία βρίσκονται οι τυπικές χορδές τους.

	Μπουζούκι Τρίχορδο 1	Μπουζούκι Τετράχορδο 2	Τζουράς 1	Τζουράς 2	Μπαγλαμάς 1	Μπαγλαμάς 2
Μήκος χορδών (cm)	68	66	62	57	36	34
Τάση 1ης χορδής (N)	76,4	71,9	63,5	53,6	57,3	51,2
Τάση 2ης χορδής (N)	79,7	65,4	49,77	42	48	42,8
Τάση 3 ^{ου} ζεύγους χορδών (πρίμα- μπάσα)	76,4 - 83,3	84 - 93,26	48	40	64	57,8
Τάση 4 ^{ου} ζεύγους χορδών (πρίμα- μπάσα)	-	62,3 - 84,7	-	-	-	-
Συνολική τάση (N)	472	599,23	338	286	333	297

Πίνακας 1.2: Μήκος ελεύθερης χορδής και στατική τάση

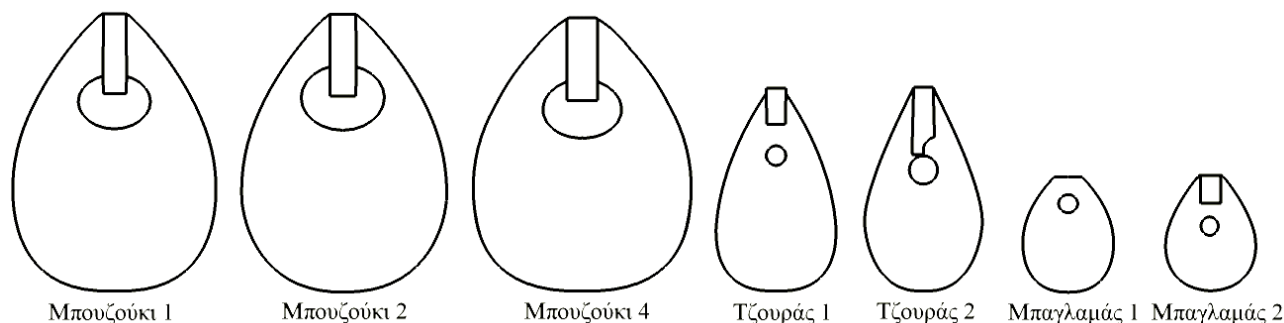
Οι διατομές των χορδών που λαμβάνονται υπόψη για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι οι τυπικές των χορδών που είναι τοποθετημένες στα όργανα. Λίγο πιο παχιές ή πιο λεπτές χορδές θα μεταβάλλουν τις παραπάνω τιμές αυξάνοντας ή μειώνοντας τις αντίστοιχα.

Από τον πίνακα παρατηρείται πως το μήκος χορδών των 2 μπουζουκιών είναι 68cm. Η συνολική τάση του τετράχορδου μπουζουκιού είναι αρκετά μεγάλη καθώς έχει 2 χορδές περισσότερες. Η

σημαντικότερη διαφορά όμως εντοπίζεται στο μήκος χορδών του τζουρά όπου ο 2^{ος} είναι πολύ μικρότερος του 1^{ου} με αποτέλεσμα τις αντίστοιχες μεταβολές στην συνολική τους τάση.

1.4.2 Διαστάσεις καπακιών και αντηχείων των οργάνων

Εκτός από το ενεργό μήκος της χορδής σημαντικές διαφορές παρατηρούνται και στο σχήμα των καπακιών των οργάνων που φαίνονται στην συνέχεια:



Εικόνα 1.3: Τα καπάκια των οργάνων

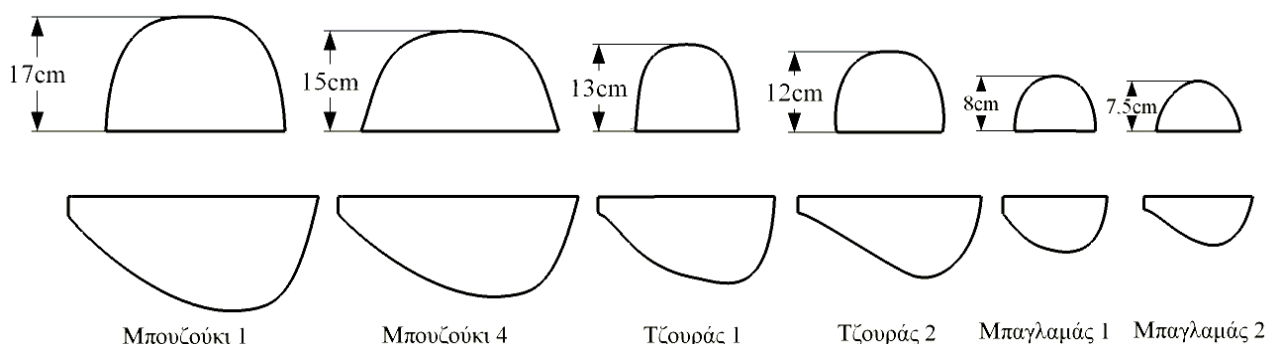
Από τα σχήματα των καπακιών παρατηρείται πως τα δύο τρίχορδα μπουζούκια δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στο σχήμα τους σε αντίθεση με το τετράχορδο μπουζούκι το καπάκι του οποίου έχει εμφανώς μεγαλύτερο πλάτος και γενικά είναι πιο κυκλικό από τα τρίχορδα. Επίσης, σημαντικές διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στο σχήμα των καπακιών των μικρότερων οργάνων. Η βασικότερη αφορά στο αν τα καπάκια θα σχεδιαστούν «αχλαδόσχημα» με αποτέλεσμα το μέγιστο πλάτος τους να βρίσκεται κοντά στο κάτω μέρος τους ή με σχήμα αμυγδάλου όπου το μέγιστο πλάτος συγκεντρώνεται λίγο κάτω από το μέσο του μήκους τους.

Διακρίνεται επίσης στην από την εικόνα 1.3 πως στα μπουζούκια που μελετήθηκαν οι ηχητικές τρύπες είναι οβάλ ενώ στα υπόλοιπα όργανα κυκλικές. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται οι μέγιστες διαστάσεις των καπακιών των οργάνων και της ηχητικής οπής. Στα μπουζούκια όπου η οπή είναι οβάλ παρατίθενται τα μέγιστα μήκη και πλάτη ενώ αντίστοιχα στα μικρότερα όργανα η διάμετρος των οπών.

	Μπουζούκι Τρίχορδο 1	Μπουζούκι Τρίχορδο 2	Μπουζούκι Τετράχορδο	Τζουράς 1	Τζουράς 2	Μπαγλαμάς 1	Μπαγλαμάς 2
Καπάκι μήκος-πλάτος (cm)	37,5 - 27	37 - 27,5	29,3 - 36	26-15	25,5 - 16	15,5 - 11,5	15,5 - 13
Ηχητική οπή μήκος- πλάτος (cm) ή διάμετρος (cm)	9,8 - 7	11 - 8,5	10,35 - 7,4	2,5	3,8	2,4	2,3

Πίνακας 1.3: Διαστάσεις καπακιών και ηχητικών οπών

Το τμήμα στο οποίο διαφοροποιούνται περισσότερο τα όργανα είναι το σκάφος. Στο διάγραμμα που ακολουθεί εμφανίζονται οι τομές και οι κατατομές των σκαφών των οργάνων που μελετήθηκαν.



Εικόνα 1.4: Τομές και κατατομές από τα σκάφη των οργάνων

Παρατηρείται πως τα σκάφη των οργάνων διαφοροποιούνται από όργανο σε όργανο ακόμα και στα όργανα της ίδια ομάδας με εξαίρεση το τρίχορδο μπουζούκι όπου τα 2 όργανα της μελέτης δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές. Σημειώνεται τέλος σχετικά με τον τύπο του σκάφους πως τα μικρότερα όργανα που μελετήθηκαν έχουν όλα σκαφτό σκάφος με εξαίρεση τον τζουρά 2.

1.5 Υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των οργάνων

Τα ξύλα από τα οποία κατασκευάζονται τα επιμέρους τμήματα των οργάνων επιλέγονται από τους οργανοποιούς με βάση τα χαρακτηριστικά τους ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζονται.

Για παράδειγμα, τα καπάκια των οργάνων πρέπει να ταλαντώνονται με μεγάλο (σχετικά) πλάτος εκπέμποντας ικανοποιητικής έντασης ήχο στον αέρα ενώ ταυτόχρονα πρέπει να είναι αρκετά σκληρά για να αντέχουν στις κάθετες δυνάμεις που ασκούνται από τις χορδές μέσω της γέφυρας. Για το λόγο αυτό για τα καπάκια χρησιμοποιούνται κατεξοχήν ξύλα ελάτης που συνδυάζουν μεγάλο βαθμό σκληρότητας σε σχέση με μικρή πυκνότητα. Ένα άλλο είδος ξύλου που συνδυάζει τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι ο Κέδρος που χρησιμοποιείται λιγότερο έως καθόλου στα όργανα υψηλής ποιότητας*. Σημειώνεται πως τα καπάκια των οργάνων της μελέτης είναι κατασκευασμένα από ξύλο ελάτης.

* Σχόλιο: Παρουσιάζεται η τάση των οργανοποιών και δεν εννοείται πως δεν μπορεί να κατασκευαστεί ένα πολύ καλής ποιότητας όργανο χρησιμοποιώντας καπάκι Κέδρου.

Στα σκάφη των οργάνων χρησιμοποιούνται πιο ανθεκτικά ξύλα με μεγαλύτερη πυκνότητα όπως η καρυδιά, ο Παλίσσανδρος και ο Σφένδαμος ενώ στον βραχίονα Φλαμούρι, Παλίσσανδρος και Έβενος. Για την ταστιέρα είναι κλασσική η χρήση του Έβενου που είναι ένα από τα ξύλα με την μεγαλύτερη πυκνότητα ενώ το ίδιο είδος ξύλου χρησιμοποιείται και για την κατασκευή της γέφυρας σε συνδυασμό με ένα κομμάτι κοκάλου στο οποίο προσαρμόζονται οι χορδές.

1.6 Η επιλογή των οργάνων της μελέτης

Προκύπτει από τα όσα έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής πως τα βασικά τμήματα των οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού είναι κοινά για όλα τα όργανα με διαφορές που αφορούν στις διαστάσεις, στα υλικά και στον τρόπο κατασκευής. Οι διαστάσεις των οργάνων διαφοροποιούνται από τον εκάστοτε οργανοποιό με αποτέλεσμα όργανα της ίδιας ομάδας να παρουσιάζουν διαφορετική δονητική και ηχητική συμπεριφορά.

Μια αναλυτική περιγραφή των διάφορων μεταβολών που μπορεί να παρουσιαστούν στην δομή και την χρήση υλικών μέσα σε ένα πλήθος διαφορετικών οργάνων θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον, ωστόσο δεν είναι αντικείμενο που απασχολεί την συγκεκριμένη δουλειά. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να ερευνησει τον βασικό τρόπο λειτουργίας τυπικών οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού προσδιορίζοντας τα δονητικά και ηχητικά χαρακτηριστικά τους ως ομάδες (π.χ μπουζούκι, τζουράς) και όχι η σύγκριση των επιμέρους χαρακτηριστικών του κάθε οργάνου. Με γνώμονα τα παραπάνω, τα όργανα της μελέτης επιλέχθηκαν ώστε να πληρούν τις εξής προϋποθέσεις:

- 1) Να είναι δομικά άρτια χωρίς παραμορφώσεις σε κάποια από τις επιφάνειές τους.
- 2) Να χρησιμοποιούνται από επαγγελματίες οργανοπαίκτες (να είναι «ενεργά»).
- 3) Να πληρούν κάποιες τυπικές προϋποθέσεις όπως για παράδειγμα το ξύλο των καπακιών να είναι φτιαγμένο από Έλατο και όχι Κέδρο που σπάνια εμφανίζεται στα όργανα που χρησιμοποιούν επαγγελματίες οργανοπαίκτες.
- 4) Να διαφέρουν στις διαστάσεις τους ούτως ώστε να εντοπιστούν οι μεγαλύτερες το δυνατό αποκλίσεις στα χαρακτηριστικά τους*.
- 5) Να είναι χειροποίητα (αυτό θεωρείται αυτονόητο).

* Ωστόσο, ανάμεσα σε 5 τρίχορδα μπουζούκια που εξετάστηκαν πριν την επιλογή το μήκος χορδής ήταν 68cm και έτσι τα 2 που επιλέχθηκαν έχουν σχεδόν τις ίδιες διαστάσεις με σημαντικότερη διαφορά στο μέγεθος της οπής και στο σχήμα του καπακιού όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

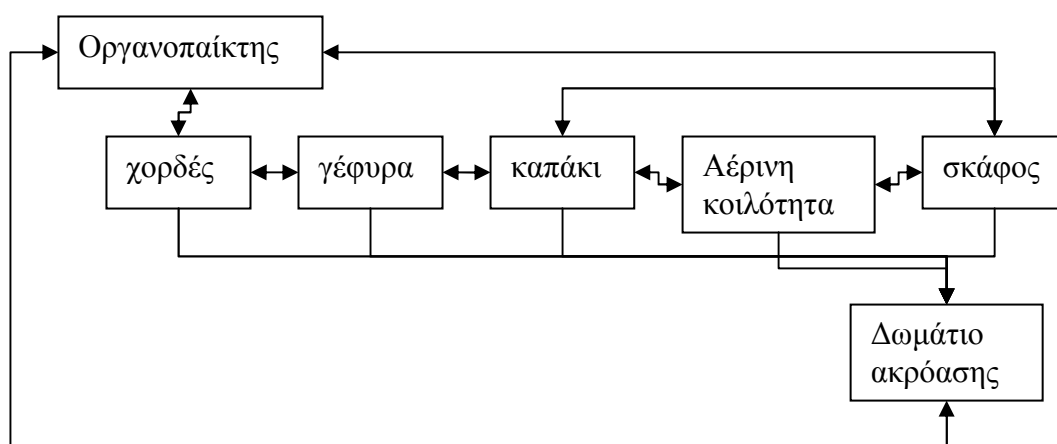
Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΕΓΧΟΡΔΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ (ΘΕΩΡΙΑ)

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές λειτουργίες των έγχορδων μουσικών οργάνων που προκύπτουν από την πολυετή έρευνα της ακουστικής στον συγκεκριμένο τομέα και ιδιαίτερα όσο αφορά στα όργανα της κιθάρας και του βιολιού. Οι πληροφορίες που αφορούν στην λειτουργία των οργάνων που απασχολούν την συγκεκριμένη εργασία είναι ελάχιστες, ωστόσο οι βασικές λειτουργίες παραμένουν κοινές.

Το κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο τμήματα: Στο πρώτο περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των τμημάτων (όπως οι χορδές και τα καπάκια) στην «ελεύθερή» τους κατάσταση ενώ στο δεύτερο περιγράφονται βασικά χαρακτηριστικά που προκαλούνται από την σύνθετη συμπεριφορά τους όταν συζεύγγονται στα ολοκληρωμένα όργανα.

2.1 Το «σύστημα» οργανοπαίκτης-όργανο-δωμάτιο ακρόασης

Η αρχική διέγερση των χορδών στα όργανα της οικογένειας του μπουζουκιού γίνεται μέσω μιας πένας που συνήθως κατασκευάζεται από συνθετικό υλικό. Ο εκτελεστής οδηγεί την χορδή πέρα από την θέση ισορροπίας της μέσω δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται ανάμεσα στην πένα και την χορδή. Όταν η (συνισταμένη) δύναμη επαφής της χορδής γίνει μεγαλύτερη από την δύναμη που την συγκρατεί πάνω στην πένα (ή όταν ο οργανοπαίκτης απομακρύνει την πένα από την χορδή) τότε η χορδή ελευθερώνεται και εκτελεί φθίνουσα ταλάντωση έως ότου βρεθεί στην αρχική θέση ισορροπίας της.



Εικόνα 2.1: Το «σύστημα» οργανοπαίκτης-όργανο-δωμάτιο ακρόασης

Κατά την διάρκεια ταλάντωσής της η χορδή εκπέμπει πολύ μικρά ποσοστά ακουστικής ενέργειας στον αέρα (λόγω της μικρής της επιφάνειας) ενώ τα μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας της ταλάντωσης διοχετεύονται στο καπάκι μέσω της γέφυρας και το θέτουν σε εξαναγκασμένη ταλάντωση. Η ταλάντωση του καπακιού έχει ως αποτέλεσμα την ηχητική εκπομπή αλλά και την περιοδική μεταβολή του αέρινου όγκου των αντηχείων των οργάνων θέτοντας σε ταλάντωση την αέρια μάζα που εσωκλείεται στα όργανα διαμέσου της ηχητικής οπής. Το σκάφος των οργάνων διεγείρεται από το καπάκι μέσω άμεσης σύζευξης αλλά κυρίως μέσω του αέρα που ταλαντώνεται στο εσωτερικό των αντηχείων.

Κατά την αντίθετη φορά, το δονούμενο σκάφος διαμορφώνει εκ νέου τις ταλαντώσεις της αέρινης μάζας μεταφέροντας ενέργεια στο καπάκι το οποίο με την σειρά του ταλαντώνεται διαταράσσοντας τις δονήσεις της χορδής.

Από τα προαναφερθέντα γίνονται αντιληπτά δύο στοιχειώδη χαρακτηριστικά των μουσικών οργάνων.

1) Όλες οι επιφάνειες των οργάνων και η αέρινη μάζα των αντηχείων που ταλαντώνονται περιοδικά σε συχνότητες που βρίσκονται εντός του ακουστικού εύρους ηχοβολούν στο δωμάτιο ακρόασης (ανεξάρτητα με τις σχετικές εντάσεις τους) και γίνονται αντιληπτές από τον οργανοπαίκτη μέσω του αισθητηρίου της ακοής.

2) Δεν υπάρχει μέρος του συστήματος που να μην αλληλεπιδρά με όλα τα υπόλοιπα είτε μέσω άμεσης (όπως γέφυρα-καπάκι) είτε μέσω έμμεσης (όπως γέφυρα-σκάφος) σύζευξης.

Μια ακόμα πιο πολύπλοκη αλληλεπίδραση συμβαίνει μεταξύ του οργανοπαίκτη και του οργάνου. Ο οργανοπαίκτης δέχεται ερεθίσματα μέσω της άμεσης επαφής του με το όργανο όπου οι δονήσεις γίνονται αντιληπτές μέσω των χεριών και του ποδιού όπου στηρίζει το όργανο, αλλά και μέσω του ακουστικού του συστήματος που δέχεται το ερέθισμα του ήχου. Και στις δύο περιπτώσεις ο εγκέφαλος του οργανοπαίκτη εκτελεί πολύπλοκες διεργασίες που συνδέονται άμεσα με το νευρικό και το *μυϊκό* του σύστημα με αποτέλεσμα να αναπροσαρμόζει την τεχνική του ανάλογα με τα ηχητικά χαρακτηριστικά που επιθυμεί να μεταβάλλει. Τέλος, οι ανακλάσεις του ήχου στα τοιχώματα του δωματίου συμβάλλουν με τον απευθείας ήχο που δέχεται ο οργανοπαίκτης από το όργανο συμβάλλοντας δραστικά στην υποκειμενική του εκτίμηση για τα χαρακτηριστικά του ήχου.

Παρατηρείται πως στο σύστημα οργανοπαίκτης – όργανο - δωμάτιο ακρόασης συμβαίνουν αλληλεπιδράσεις ακουστικής και ψυχοακουστικής φύσεως που όλες υπάγονται στον ευρύτερο τομέα της ακουστικής.

Ο τομέας της ψυχοακουστικής καλείται να περιγράψει τον τρόπο με τον «ερμηνεύονται» από τον ανθρώπινο εγκέφαλο τα χαρακτηριστικά της ηχητικής χροιάς των οργάνων. Στον τομέα αυτό,

που δεν απασχολεί ιδιαίτερα την συγκεκριμένη εργασία, οι γνώσεις που υπάρχουν βασίζονται σε ψυχοακουστικά πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί σε πλήθος ανθρώπων και με τον τρόπο αυτό έχουν περιγραφεί σημαντικά στοιχεία για τον «αντικειμενικό» τρόπο με τον οποίο γίνονται αντιληπτά κάποια βασικά χαρακτηριστικά των ήχων.

Η επιστήμη της μουσικής ακουστικής, που αφορά το μεγαλύτερο τμήμα της εργασίας καλείται να περιγράψει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν τα μουσικά όργανα. Οι λειτουργίες των μουσικών οργάνων μπορεί να αφορούν τόσο στην δονητική συμπεριφορά των επιμέρους τμημάτων τους όσο και την συνολική περιγραφή της λειτουργίας τους ως συζευγμένοι ταλαντωτές.

Στην λειτουργία των μουσικών οργάνων εμπλέκονται και άλλοι τομείς της επιστήμης με βασικότερο αυτόν της μουσικής τεχνολογίας όπου μέσα από την ανάλυση και τον προσδιορισμό των ηχητικών τους χαρακτηριστικών επιτυγχάνεται η σύνθεσή τους με χρήση ψηφιακών ή αναλογικών ηλεκτρονικών συστημάτων.

Η παρούσα εργασία δεν επεκτείνεται στον τομέα της σύνθεσης, ωστόσο η ανάλυση των βασικότερων χαρακτηριστικών του ήχου σε συνδυασμό με την περιγραφή της δονητικής συμπεριφοράς των οργάνων είναι προφανές πως δίδει χρήσιμα στοιχεία και στον τομέα αυτό της επιστήμης του ήχου.

2.2 Χορδές

Προσεγγίζοντας θεωρητικά τα τμήματα του «συστήματος» οργανοπαίκτης-όργανο-δωμάτιο ακρόασης που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, η αρχή γίνεται από την χορδή που είναι το τμήμα των οργάνων που έχει ερευνηθεί περισσότερο όσο αφορά τις λειτουργίες και τα χαρακτηριστικά του.

2.2.1 Η «ιδανική» χορδή

Αρχικά, περιγράφεται η κίνηση μιας αβαρούς, ελαστικής χορδής μήκους L πακτωμένης στα δύο άκρα η οποία απομακρύνεται σε μία απόσταση h από την θέση ισορροπίας της σε ένα σημείο της l από μια στιγμιαία δύναμη F . Όταν δεν λαμβάνονται υπόψη οι μηχανισμοί τριβής και θεωρηθεί πως η τάση που ασκείται στη χορδή είναι εφαπτομενική σε κάθε σημείο της τότε τα εγκάρσια κύματα που διαδίδονται στην χορδή ικανοποιούν την μονοδιάστατη κυματική εξίσωση [5,6]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (2.2.1)$$

όπου $c^2 = T/\mu$ ταχύτητα διάδοσης της εγκάρσιας διαταραχής στην χορδή, T η τάση και μ η γραμμική πυκνότητα της. Η κυματική εξίσωση περιγράφει και την διαμήκη ταλάντωση της χορδής αντικαθιστώντας την ταχύτητα διάδοσης στην εγκάρσια διεύθυνση με αυτήν της διαμήκου, $c^2 = ES/\mu$, όπου E το μέτρο ελαστικότητας της χορδής και S η διατομή (πr^2).

Η γενική λύση της κυματικής εξίσωσης στο πεδίο του χρόνου δίδεται με χρήση της μεθόδου d'Alembert [6] και εκφράζεται με την μορφή:

$$y(x,t) = y^+(t - x/c_t) + y^-(t + x/c_t) \quad (2.2.2)$$

Όπου τα y^+ και y^- είναι συναρτήσεις που περιγράφουν δύο όμοια κύματα που οδεύουν κατά μήκος της χορδής (x) με αντίθετη φορά. Στην ιδανική διέγερση του παραδείγματος όπου η δύναμη F εφαρμόζεται στιγμιαία σε ένα σημείο της χορδής προκαλώντας εγκάρσια μετατόπιση, οι δονήσεις μπορούν να θεωρηθούν ως δύο παλμοί που οδεύουν με αντίθετη φορά. Τα οδεύοντα κύματα ανακλώνται στα άκρα της χορδής και εφαρμόζοντας τις συνοριακές συνθήκες [6,7] προκύπτει πως η ανάκλασή τους στα άκρα έχει ως αποτέλεσμα την αναστροφή της φάσης τους. Με άλλα λόγια ένας θετικός παλμός ανακλάται ως αρνητικός και αντίστροφα. Η γενική λύση της εξίσωσης για την ιδανική χορδή του παραδείγματος είναι το άθροισμα όλων των κανονικών τρόπων δόνησης αυτής:

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(2\pi f_n t + \phi_n) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (2.2.3)$$

Από την λύση της εξίσωσης προκύπτει πως οι «δυνατοί» τρόποι δόνησης είναι ημιτονικής μορφής με δεσμούς ταλάντωσης στα πακτωμένα άκρα της χορδής. Η σχέση που διέπει την συχνότητα των τρόπων δόνησης μιας ιδανικής χορδής πακτωμένης και στα δύο άκρα της είναι η γνωστή:

$$f_n = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (2.2.4)$$

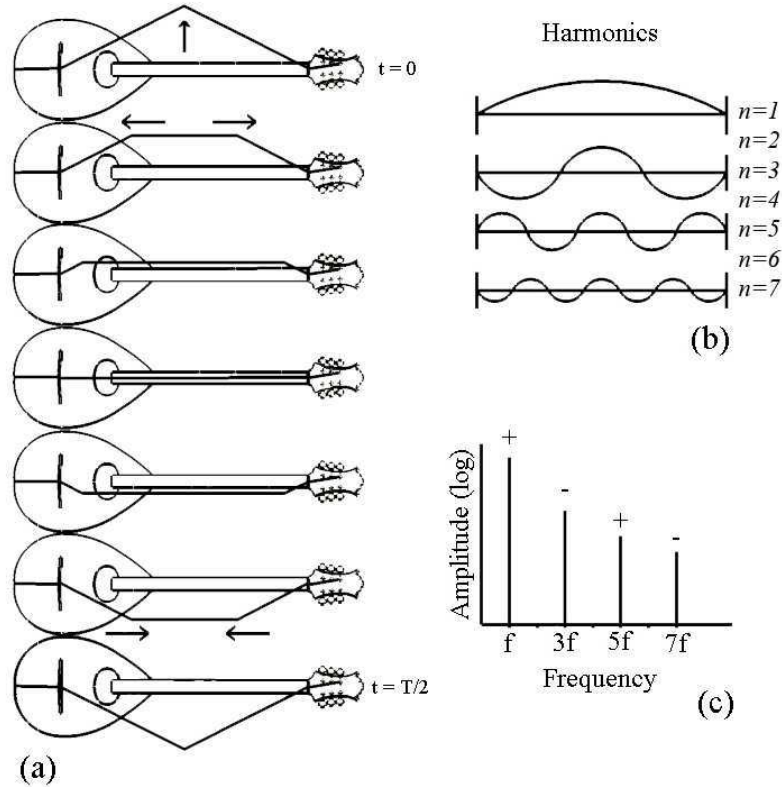
Όπου f η συχνότητα, n ο δείκτης του τρόπου δόνησης L το ενεργό μήκος της χορδής, T η τάση και μ η γραμμική πυκνότητα.

Από την ανάλυση Fourier της γενικής λύσης μπορούν να υπολογιστούν και τα αρχικά πλάτη ταλάντωσης των τρόπων δόνησης A_n :

$$A_n = \frac{2h}{n\pi^2} \frac{L^2}{l(L-l)} \sin\left(\frac{n\pi l}{L}\right) \quad (2.2.5)$$

Όπου h_0 η αρχική απόκλιση και l_0 η απόσταση του σημείου εφαρμογής της δύναμης f από το ένα άκρο της.

Η κίνηση αυτή περιγράφεται στην εικόνα που ακολουθεί για το πρώτο μισό του κύκλου της μαζί με τους πρώτους 7 τρόπους δόνησης.



Εικόνα 2.2 : Κίνηση ιδανικής χορδής που δέχεται εγκάρσια μετατόπιση στο κέντρο της: Στιγμιότυπα κατά το πρώτο μισό του κύκλου της κίνησης (a), κανονικοί τρόποι δόνησης (b) και μετασχηματισμός στο πεδίο της συχνότητας με + και - να συμβολίζει την αρχική φάση των αρμονικών (c).

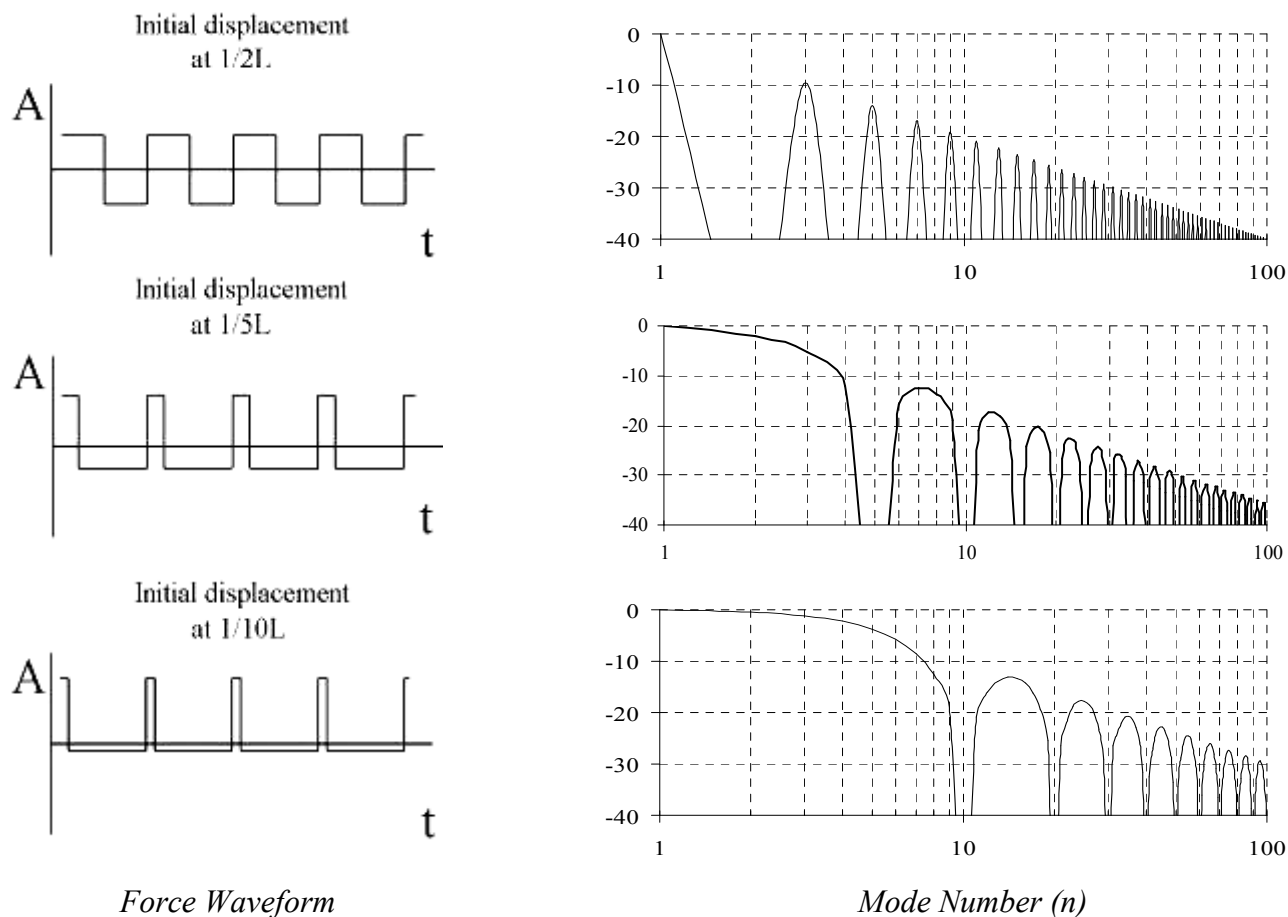
Παρατηρείται από την εικόνα ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της κίνησης της χορδής που είναι η απουσία των τρόπων δόνησης που αντιστοιχούν σε άρτια πολλαπλάσια του δείκτη n . Γενικά προκύπτει από την λύση της εξίσωσης στο πεδίο της συχνότητας πως όταν η χορδή μήκους L δέχεται αρχική διέγερση σε ένα σημείο της l (που είναι η απόσταση ένα άκρο της) τότε τα αρμονικά στοιχεία με δείκτη $n(L/l)$ έχουν μηδενικό πλάτος ταλάντωσης όταν L/l είναι ακέραιος .

Η δύναμη της εγκάρσιας ταλάντωσης της χορδής που εφαρμόζεται στο ένα άκρο της $F = T (dy/dx)_{x=0}$ έχει την μορφή :

$$F(t) = A \sum_n \left[\frac{\sin(n\pi l / L)}{n} \right] \cos n\omega t \quad (2.2.6)$$

Όπου ω η συχνότητα της πρώτης αρμονικής συνιστώσας.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η κυματομορφή και η φασματική περιβάλλουσα της δύναμης που ασκεί σε ένα άκρο της η εγκάρσια ταλάντωση της ιδανικής χορδής για τρεις διαφορετικές θέσεις διέγερσης κατά μήκος (L).



Εικόνα 2.3: Δύναμη που εφαρμόζεται στα άκρα της χορδής: Κυματομορφές (αριστερά), φασματική περιβάλλουσα (δεξιά).

2.2.2 Η «πραγματική» χορδή

2.2.2.1 Χορδές και σκληρότητα

Από την κυματική εξίσωση της απλής χορδής αναφέρεται πως η χορδή είναι ιδανικά ελαστική και δεν επιφέρει δυνάμεις αντίστασης στην παραμόρφωσή της από την αρχική κατάσταση στην θέση ισορροπίας. Με άλλα λόγια, το μέτρο ελαστικότητας είναι ισούται με μηδέν [7]. Κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό να ισχύει για τις πραγματικές χορδές και η κυματική εξίσωση της «ιδανικής» χορδής που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο τροποποιείται στην[5,8]:

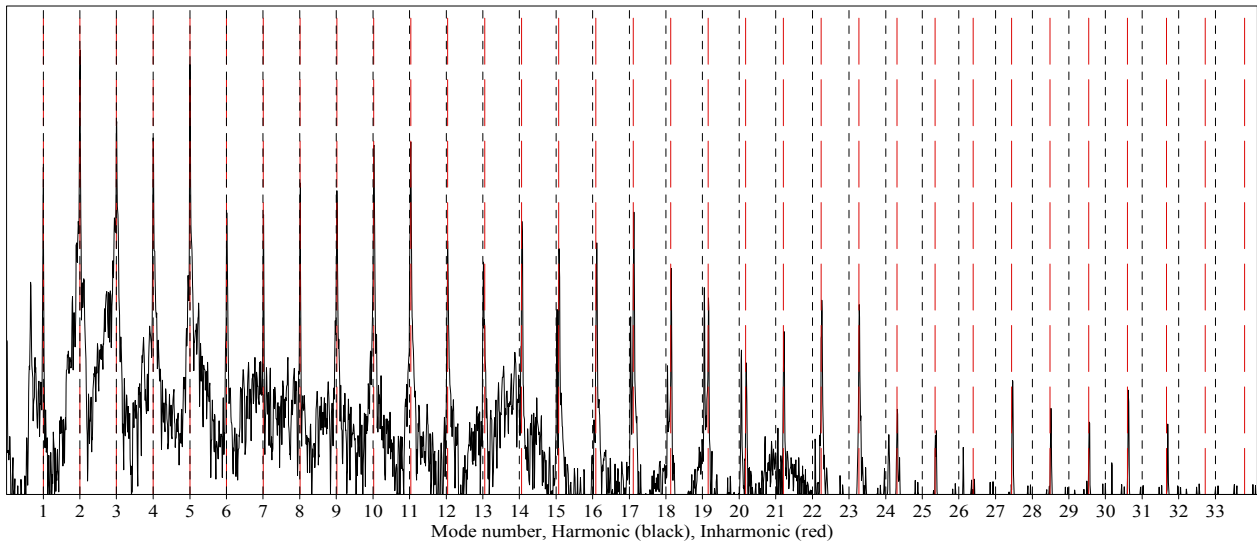
$$\sigma S \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{ESr^2}{4} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.2.7)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα, και σ είναι η «ειδική» παραμόρφωση της χορδής που ισούται με T/S .

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση προκύπτει πως οι συχνότητες των τρόπων δόνησης αποκλίνουν από την αρμονική σχέση (ακέραια πολλαπλάσια μιας θεμελίου) φαινόμενο που είναι γνωστό με τον όρο αναρμονικότητα (inharmonicity)[9]. Οι συχνότητες των τρόπων δόνησης των χορδών συνοπολογίζοντας την σκληρότητα (εκ του stiffness) δίδονται από την σχέση:

$$\omega_n \approx n\omega_1 \left(1 + \frac{n^2 \pi^3 E r^4}{8TL^2} \right) \quad (2.2.8)$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση (2.2.8) για την νότα D5 (588Hz) της ομώνυμης χορδής στον μπαγλαμά φαίνεται πως κυρίως οι υψηλότεροι τρόποι δόνησης «αποκλίνουν» από την αρμονική σχέση επιβεβαιώνοντας την θεωρία. Ωστόσο, για μεγαλύτερη ευκολία, στην παρούσα εργασία οι τρόποι δόνησης των οργάνων χαρακτηρίζονται τις περισσότερες φορές ως «αρμονικοί» παρά τις εμφανείς αποκλίσεις.



Εικόνα 2.4: Φασματική ανάλυση της νότας D5 (588Hz) στην ομώνυμη χορδή του μπαγλαμά 2: Αρμονικοί δείκτες (μαύρες γραμμές), μη αρμονικοί δείκτες (κόκκινες γραμμές) υπολογισμένοι με βάση τις προηγούμενες σχέσεις. Η τιμή της τάσης που χρησιμοποιήθηκε αντιστοιχεί σε 51,2N (πίνακας 1.2).

Μία ακόμα σημαντική ιδιότητα που είναι αποτέλεσμα της «ακαμψίας» (stiffness) της χορδής είναι η αδυναμία της «ιδανικής» σημειακής διέγερσης που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στην πραγματικότητα λόγω της πεπερασμένης σκληρότητάς τους, οι χορδές καμπυλώνονται ομαλά γύρω από το αντικείμενο με το οποίο διεγείρονται με αποτέλεσμα την κατανομή μικρότερης ενέργειας ταλάντωσης στους υψηλότερους τρόπους δόνησης. Η καμπύλωση

της χορδής είναι αντιστρόφως ανάλογη ως προς την σκληρότητα και ανάλογη με την στατική της τάση.

Ωστόσο, σημειώνεται πως η αρχική μορφή της χορδής εξαρτάται άμεσα και από την επιφάνεια και την σκληρότητα του υλικού που την διεγείρει. Γενικά ισχύει πως οι τρόποι δόνησης των χορδών των οποίων το μήκος κύματος είναι ίσο ή μικρότερο από το πλάτος της πέννας που διεγείρει την χορδή δεν θα διεγερθούν [10]. Όσο μεγαλύτερο το πλάτος της πέννας, τόσο χαμηλότερη είναι η ενέργεια που κατανέμεται στα υψηλότερα αρμονικά στοιχεία και το αντίστροφο. Επίσης, όσο πιο σκληρό είναι το υλικό που προκαλεί την αρχική διέγερση τόσο περισσότερο θα διεγερθούν οι υψηλότεροι τρόποι δόνησης. Στην κιθάρα, η ύπαρξη σκληρότητας στις χορδές δεν επιτρέπει διέγερση των τρόπων δόνησης με αριθμό μεγαλύτερο από 40-50 ακόμα και αν αυτή η διέγερση επιτρεπόταν από το πλάτος της επιφάνειας της πέννας ή του νυχιού του εκτελεστή που διεγείρει την χορδή [10].

2.2.2.2 Ενεργειακές απώλειες

Στις πραγματικές χορδές αναπτύσσονται μηχανισμοί τριβής με αποτέλεσμα την απόσβεση του πλάτους ταλάντωσης των τρόπων δόνησης που συνήθως συμβαίνει με εκθετικό ρυθμό. Οι βασικές αιτίες που προκαλούν απώλειες στην ενέργεια ταλάντωσης των χορδών οφείλονται σε τριβές με τον αέρα, σε εσωτερικές τριβές (θερμοκρασιακές απώλειες) και σε απώλειες μέσω των στηριγμάτων [7].

Η αλληλεπίδραση της ταλαντούμενης χορδής με την ιξώδη ροή του αέρα έχει ως αποτέλεσμα την απόσβεση της ενέργειας και επηρεάζει περισσότερο τους υψηλότερους τρόπους δόνησης των χορδών το πλάτος των οποίων φθίνει με ταχύτερο ρυθμό. Οι εσωτερικές τριβές χαρακτηρίζονται από το μέτρο ελαστικότητας της χορδής και επιδρούν σε μεγαλύτερο βαθμό στις υψηλότερες συχνότητες αφού η χορδή κάμπτεται σε μεγαλύτερο βαθμό και με μεγαλύτερη ταχύτητα. Τέλος, οι ενεργειακές απώλειες μέσω των στηριγμάτων εξαρτώνται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Συχνά, αυτή η σχέση της χορδής με την γέφυρα (στήριγμα) ενός οργάνου περιγράφεται με την μορφή της μιγαδικής μηχανικής αντίστασης, μιας μέτρησης της δύναμης (F) που προκαλεί μια ταλάντωση σε σχέση με την ταχύτητα (u) της ταλάντωσης αυτής [11].

$$\hat{Z} = \frac{\hat{F}}{\hat{u}} \quad (2.2.9)$$

Από την μιγαδική μηχανική αντίσταση των συζευγμένων ταλαντωτών προκύπτουν χρήσιμες σχέσεις για την μετάδοση της ενέργειας. Όσο μεγαλύτερη η αντίσταση τόσο περισσότερη ενέργεια

ανακλάται από το στήριγμα και το αντίθετο. Εκτός από την μηχανική αντίσταση στις μελέτες των μουσικών οργάνων χρησιμοποιείται συχνότερα η αντίστροφη σχέση που ονομάζεται αγωγιμότητα. Το μέτρο της αγωγιμότητας είναι ανάλογο με την μεταφορά ενέργειας στα στήριγματα που μεταφράζεται σε ενεργειακές απώλειες της ταλάντωσης των χορδών.

2.2.2.3 Ενεργό μήκος και διαμόρφωση της τάσης

Στις πραγματικές χορδές το μήκος L , που ορίζεται ως το μήκος της χορδής στην θέση ισορροπίας, δεν παραμένει σταθερό καθόλη την διάρκεια της ταλάντωσης. Συγκεκριμένα, μετατοπίζοντας την χορδή από την θέση ισορροπίας της το μήκος της αυξάνεται κατά δl το οποίο υπολογίζεται από την σχέση [12]:

$$\delta l = \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2} dx - L \quad (2.2.10)$$

Ωστόσο η επιμήκυνση δl μεταβάλλεται περιοδικά με τον χρόνο και με συχνότητα διπλάσια από αυτήν της θεμελίου (όπως προκύπτει παρατηρώντας και την εικόνα 1 όπου η χορδή περνά στιγμιαία από την θέση ισορροπίας 2 φορές κατά την διάρκεια ενός κύκλου ταλάντωσης της).

Η διαμόρφωση του ενεργού μήκους της χορδής προκαλεί ανάλογη διαμόρφωση και στην τιμή της τάσης της που μετατρέπεται σε:

$$T_t = T_0 + \frac{ES\delta l}{L} \quad (2.2.11)$$

Όπου T_0 η στατική τάση της χορδής στην θέση ισορροπίας, E το μέτρο ελαστικότητας και S η διατομή.

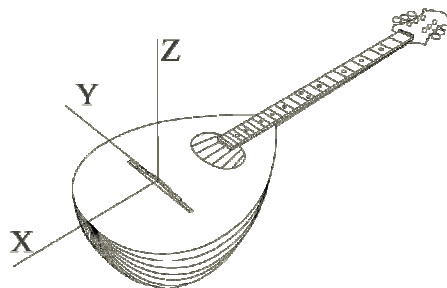
Το φαινόμενο αυτό γνωστό ως διαμόρφωση τάσης (Tension modulation) επιδρά στις χορδές και δημιουργούνται φαινόμενα όπως:

- Η μεταβολή του τονικού ύψους (pitch) των αρμονικών λόγω της βαθμιαίας μείωσης του μήκους και συνεπώς της τάσης της χορδής σε αντιστοιχία με το πλάτος της ταλάντωσης.
- Η μη γραμμική αλληλεπίδραση των τρόπων δόνησης υπό την έννοια της μεταφοράς ενέργειας από έναν ή περισσότερους τρόπους δόνησης σε έναν ή περισσότερους άλλους. Αυτή η μεταφορά ενέργειας μπορεί να παρουσιάσει φαινόμενα όπως η εμφάνιση των τρόπων δόνησης που εξαφανίζονται κατά την διέγερση λόγω της θέσεις διέγερσης κατά μήκος της χορδής [σχέση $n(L/l)$].

- Επίσης, μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα όπως η ενδοδιαμόρφωση των τρόπων δόνησης δημιουργώντας μη αρμονικά στοιχεία στο φάσμα μιας νότας.
- Τέλος, λόγω του ότι η τάση διαμορφώνεται με διπλάσια συχνότητα όταν το πλάτος ταλάντωσης είναι αρκετά μεγάλο εμφανίζονται αρμονικά στοιχεία σε διπλάσια συχνότητα από αυτήν των αντίστοιχων της εγκάρσιας ταλάντωσης.

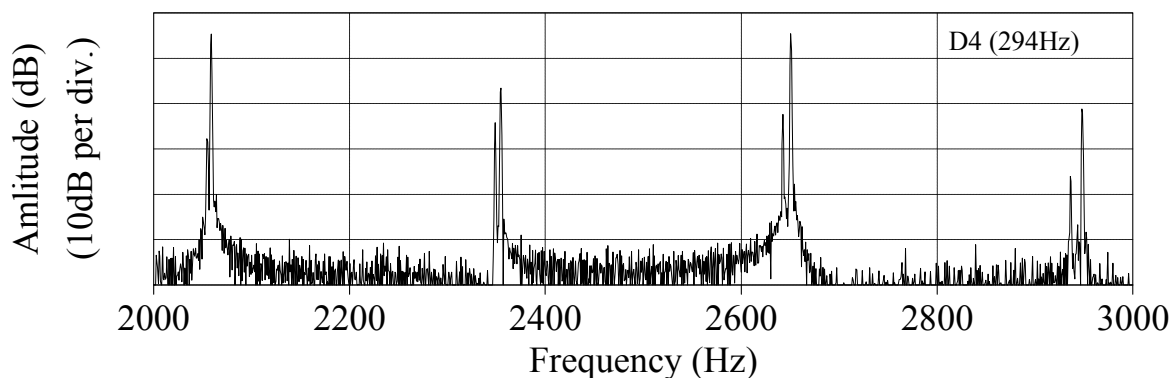
2.2.2.4 Τρισδιάστατη κίνηση της χορδής

Μέχρις στιγμής οι σχέσεις που αναπτύχθηκαν περιγράφουν τα βασικά χαρακτηριστικά μιας χορδής που ταλαντώνεται εγκάρσια σε μία από τις δύο κάθετες συντεταγμένες ως προς τα στηρίγματα, παράλληλα ως προς το καπάκι, y , και κάθετα ως προς αυτό, z . Ωστόσο, καμία από τις κινήσεις της χορδής συνυπολογίζοντας και την διαμήκη ταλάντωση (κατά μήκος x της χορδής) δεν δρα «αυτόνομα». Ακόμα και στις για πολύ μικρές μετατοπίσεις η διαμήκης ταλάντωση των χορδών προκαλεί μη γραμμική σύζευξη των οι δύο εγκάρσιων με αποτέλεσμα την συνεχή μεταφορά ενέργειας από την μια διεύθυνση της κίνησης προς την άλλη. Το φαινόμενο εξαρτάται τόσο από την διέγερση της διαμήκουσ ταλάντωσης όσο και από τα σχετικά πλάτη των εγκάρσιων ταλαντώσεων [6].



Εικόνα 2.4: Οι τρεις διαστάσεις κίνησης της χορδής: Εγκάρσιες διευθύνσεις (y,z) και διαμήκης διεύθυνση ταλάντωσης (x).

Το βασικό χαρακτηριστικό της ταυτόχρονης ύπαρξης δύο εγκάρσιων ταλαντώσεων σε μία χορδή είναι η εμφάνιση τουλάχιστον δύο τρόπων δόνησης σε πολύ κοντινές συχνότητες. Η αλληλεπίδραση αυτών των κοντινών τρόπων δόνησης είναι πολλές φορές αιτία δημιουργίας φαινομένων διαμόρφωσης πλάτους (με την μορφή διακροτημάτων) [13].



Εικόνα 2.5: Αλληλεπίδραση των διαφορετικών διευθύνσεων ταλάντωσης της χορδής στην νότα D4 της A3 χορδής του τετράχορδου μπουζουκιού που εκτελέστηκε μονή (χωρίς το ζεύγος της).

2.2.2.5 Η πραγματική φύση της διέγερσης

Όταν η χορδή φθάνει στο σημείο όπου μεγάλες δυνάμεις επαναφοράς έχουν ως αποτέλεσμα την απομάκρυνσή της από την πένα, τότε, κατά το αρχικό στάδιο η κίνησή της συνήθως γίνεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα έως ότου επέλθει σε μία «σταθερή» κατάσταση. Η σταθερή αυτή κατάσταση ταλάντωσης παράγει το σύνθετο, αρμονικό (κατά προσέγγιση) σήμα διέγερσης που έχει περιγραφεί στα παραπάνω. Ωστόσο, η στιγμιαία απομάκρυνση από την πένα κατά το αρχικό στάδιο της ταλάντωσης έχει ως αποτέλεσμα την, κατά προσέγγιση, στιγμιαία διέγερση του οργάνου μέσω της γέφυρας. Έτσι, το όργανο αποκρίνεται με τον ίδιο τρόπο που θα αποκρινόταν σε ένα σήμα παλμού στην είσοδό του με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη διέγερση όλων των συντονισμών του (τρόπων δόνησης). Γίνεται έτσι κατανοητό πως στο αρχικό φάσμα μιας νότας μπορεί κάποιος να εντοπίσει εκτός άλλων τους συντονισμούς του απλά με την διέγερση από την πένα. Ιδίως όταν αυτή η διέγερση πραγματοποιηθεί σε μια νότα όπου ο πρώτος τρόπος δόνησης της χορδής βρίσκεται σε πολύ υψηλή συχνότητα, τότε τα δονητικά χαρακτηριστικά του οργάνου εντοπίζονται ξεκάθαρα στο φάσμα της κατά τους αρχικούς της χρόνους.

2.2.2.6 Διπλές χορδές

Τα όργανα που απασχολούν την μελέτη αποτελούνται από ζεύγη χορδών που συνεπάγεται σε ταυτόχρονη διέγερση του οργάνου από δύο σύνθετους ταλαντωτές. Η ταυτόχρονη λειτουργία δύο ταλαντωτών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας που μεταδίδεται στο σώμα του οργάνου και ως εκ τούτου παράγεται ήχος μεγαλύτερης έντασης. Ωστόσο, το σχετικό τονικό ύψος των χορδών είναι ένας σημαντικός παράγοντας που διαμορφώνει την σχέση αλληλεπίδρασης τους.

Όταν τα τονικά ύψη των χορδών συμπίπτουν τότε παράγεται ήχος με ισχυρή ένταση στην αρχή που αποσβένει με πολύ ταχύ ρυθμό έως μία χαμηλότερη ένταση και στην συνέχεια αποσβένει με πιο ομαλό ρυθμό. Αυτός ο τρόπος πτώσης της έντασης είναι γνωστός ως «απόσβεση δύο σταδίων» (two stage decay)[6] και παρατηρείται πολύ συχνά στα όργανα της μελέτης.

Οι χορδές που είναι κουρδισμένες με μεγάλη απόκλιση έχουν ως αποτέλεσμα έντονα φαινόμενα διαμόρφωσης της έντασης με την μορφή διακροτημάτων. Χορδές με μικρή απόκλιση στο τονικό ύψος έχουν ως αποτέλεσμα ήχο η ένταση του οποίου αποσβένει με αργό ρυθμό και τα διακροτήματα εμφανίζονται με πολύ αργό ρυθμό.

Ωστόσο, εκτός από τα σχετικά ύψη μεγάλο ρόλο στην σύζευξη διακατέχουν και οι σχετικές φάσεις των τρόπων δόνησης κατά την αρχή της ταλάντωσης. Θεωρώντας τις χορδές κουρδισμένες σε ταυτοφωμία όταν ταλαντώνονται σε φάση παρατηρείται το χαρακτηριστικό της πτώσης σε δύο στάδια που περιγράφηκε παραπάνω. Όταν όμως η αρχική φάση είναι αντίθετη τότε δεν θα υπάρξει μεγάλο πλάτος ταλάντωσης στην αρχή και η πτώση της έντασης θα είναι πιο ομαλή[6,9].

2.2.2.7 Χορδές σε κοινή γέφυρα

Το ότι οι χορδές τερματίζουν σε κοινό στήριγμα (γέφυρα) έχει ως αποτέλεσμα την μεταφορά ενέργειας από μία χορδή που τίθεται σε ταλάντωση προς όλες τις υπόλοιπες μέσω του στηρίγματος αυτού. Έτσι, κάθε φορά που οργανοπαίκτης οδηγεί ένα ζεύγος χορδών σε ταλάντωση, έμμεσα διεγείρονται με μικρότερο πλάτος και τα υπόλοιπα ζεύγη χορδών. Προφανώς η μεγαλύτερη ροή ενέργειας συμβαίνει όταν οι τρόποι δόνησης των ελεύθερων-ανοιχτών χορδών συμπίπτουν με αντίστοιχους των χορδών που διεγείρονται άμεσα (φαινόμενα συντονισμού). Ωστόσο, η πραγματική φύση της διέγερσης από τον οργανοπαίκτη έχει ως αποτέλεσμα την διέγερση των χορδών ακόμα και όταν οι τρόποι δόνησής τους δεν συμπίπτουν σε συχνότητα.

2.3 Τα ελεύθερα τμήματα των οργάνων

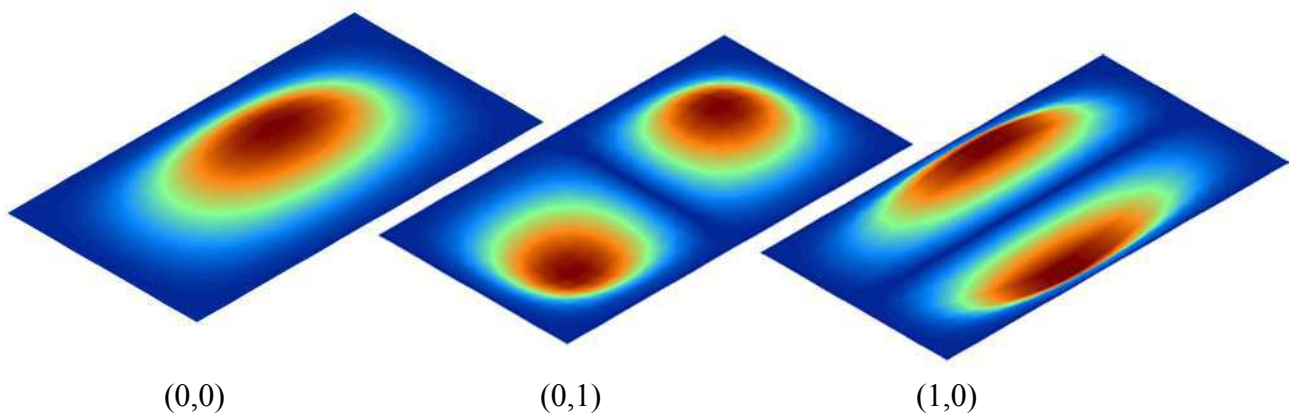
Τα δονητικά χαρακτηριστικά των τμημάτων των μουσικών οργάνων εξαρτώνται από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία κατασκευάζονται, τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Ωστόσο, κατά την μελέτη των τρόπων δόνησης σημαντικός παράγοντας είναι η μέθοδος διέγερσης αλλά και ο τρόπος στήριξής τους. Ακόμα, ο τρόπος με τον οποίο δονούνται τα καπάκια διαμορφώνει και τα χαρακτηριστικά της ηχητικής τους εκπομπής.

Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα τμήματα των οργάνων είναι το ξύλο οι μηχανικές ιδιότητες του οποίου χαρακτηρίζονται από ανισοτροπία, παρουσιάζει δηλαδή διαφορετικές ιδιότητες σε κάθε διεύθυνση κάθετη προς τον κορμό [14]. Η σύνθετη συμπεριφορά

του ξύλου ως υλικό σε συνδυασμό με την πολύπλοκη γεωμετρία των τμημάτων (καπάκι με στηρίγματα, κοιλότητα του σκάφους) διαμορφώνουν την συμπεριφορά στους τρόπους δόνησης οι οποίοι όμως έχουν ερευνηθεί κυρίως για τα όργανα του βιολιού και της κιθάρας και πολλά χαρακτηριστικά τους είναι πλέον γνωστά.

2.3.1 Το καπάκι

Όταν ένα ξύλινο καπάκι δεχθεί ημιτονική διέγερση σε συχνότητα που συμπίπτει με κάποιον από τους τρόπους δόνησής του τότε συμβαίνει το φαινόμενο του συντονισμού. Ανάλογα με τον τρόπο δόνησης του καπακιού η επιφάνεια ταλαντώνεται εγκάρσια σχηματίζοντας περιοχές με μέγιστο πλάτος ταλάντωσης (κοιλίες) και περιοχές με μηδενικό ή πολύ μικρό πλάτος αντίστοιχα (δεσμοί). Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των τρόπων δόνησης στα ελεύθερα καπάκια προκύπτει από τον αριθμό των δεσμών ταλάντωσης που είναι παράλληλοι κατά μήκος και κατά πλάτος ως ένα ζευγάρι ακεραίων (x,y) αντίστοιχα.



Εικόνα 2.6: Οι πρώτοι 3 τρόποι δόνησης ενός παραλληλόγραμμου καπακιού πακτωμένου στα άκρα του. Οι μπλε περιοχές συμβολίζουν το μηδενικό πλάτος ταλάντωσης.

Ο υπολογισμός των τρόπων δόνησης με μία μαθηματική σχέση αντίστοιχης με την χορδή είναι δυνατός για «ιδανικές» συνθήκες (μεμβράνες) αλλά και για απλές δομές [15] ως εφαρμογή της κυματικής εξίσωσης σε περισσότερες διαστάσεις. Ωστόσο, τα πράγματα είναι πολύ σύνθετα στα ολοκληρωμένα καπάκια των οργάνων όπου και με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχουν αναπτυχθεί αριθμητικά μοντέλα (FEM) [6] και οπτικές τεχνικές που βασίζονται σε φωτεινές δέσμες laser, που μπορούν να λύσουν το πρόβλημα τόσο της περιγραφής όσο και του εντοπισμού τους.

Οι οργανοποιοί όμως γνώριζαν την σπουδαιότητα του καπακιού στα μουσικά όργανα αιώνες πριν την ανακάλυψη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των laser. Αυτό αποδεικνύεται από το ότι

έκρουαν τα καπάκια σε διαφορετικά σημεία διεγείροντας διαφορετικούς τρόπους δόνησης και με «γνώμονα» την ακοή και την εμπειρία τους έκαναν τις απαραίτητες διορθώσεις με στόχο το επιθυμητό αποτέλεσμα [16].

Ένα μεγάλο βήμα πραγματοποιήθηκε από τον Ernst Chladni (1787) [16] που παρατήρησε πως όταν ένα υλικό στοιχείο με κόκκους όπως η άμμος απλωθεί πάνω στην δονούμενη επιφάνεια κατά την στιγμή του συντονισμού έχει την τάση να συγκεντρώνεται στις περιοχές όπου υπάρχει πολύ μικρό πλάτος ταλάντωσης διαγράφοντας τους δεσμούς ταλάντωσης και ως εκ τούτου το σχήμα του κάθε διαφορετικού τρόπου δόνησης.

Ωστόσο, η ανάγκη της επιστήμης για τον προσδιορισμό της κατανομής του πλάτους ταλάντωσης πάνω στις δονούμενες επιφάνειες, της αποδέσμευσης από τις δυνάμεις της βαρύτητας (καθώς στην μέθοδο Chladni οι επιφάνειες τοποθετούνται υποχρεωτικά παράλληλα με το έδαφος) και την μελέτη μη επίπεδων επιφανειών ικανοποιήθηκε μέσω της ανακάλυψης της ολογραφικής συμβολομετρίας. Εξέλιξη της προαναφερθείσας τεχνικής αποτελεί και η ολογραφική συμβολομετρία ψηφίδων που είναι η βασική μέθοδος μελέτης στην παρούσα εργασία. Η ολογραφική συμβολομετρία επιτυγχάνει μέσω της συμβολής μιας συνεχούς μονοχρωματικής πηγής φωτός να εξάγει πληροφορίες τόσο για το πλάτος ταλάντωσης όσο και για την κατανομή του σε μια δονούμενη επιφάνεια.

Ο Jansson ήταν ο πρώτος που εφάρμοσε την ολογραφική συμβολομετρία για να εντοπίσει τους τρόπους δόνησης του καπακιού της κιθάρας [17]. Επίσης, κατέγραψε την ηχητική απόκριση συχνότητας της κιθάρας με χρήση μικροφώνων και διέγερση στην γέφυρα του οργάνου και έκανε συσχέτισμό των συντονισμών που σημειώθηκαν στο διάγραμμα της απόκρισης με τους τρόπους δόνησης που κατέγραψε μέσω της ολογραφίας. Η σχέση που εντόπισε ήταν πως οι τρόποι δόνησης των οργάνων συμπίπτουν με τις περιοχές συντονισμών στην απόκριση συχνότητας, κάτι που σήμερα μπορεί να θεωρείται αυτονόητο.

Ωστόσο, σημαντικοί παράγοντες που αφορούν στην θέση τοποθέτησης των μικροφώνων και στην θέση διέγερσης των οργάνων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Η παρατήρηση του Jansson αφορά τους τρόπους που εκπέμπουν ως δίπολα με διαφορά φάσης (όπως οι τρόποι δόνησης του σχήματος 1), οι οποίοι δεν εμφανίζονται όταν η τοποθέτηση του μικροφώνου γίνεται μπροστά από το όργανο. Ωστόσο στην ηχητική εκπομπή μεγάλο ρόλο διακατέχει η συμμετρία με την οποία εμφανίζονται οι τρόποι δόνησης. Σχετικά με την θέση διέγερσης ο Jansson υποδεικνύει πως εάν στο σημείο διέγερσης κάποιος τρόπος δόνησης παρουσιάζει δεσμό ταλάντωσης τότε δεν θα διεγερθεί .

2.3.2 Οι τρόποι δόνησης της αέρινης κοιλότητας

Σημαντικές δονήσεις των οργάνων είναι αυτές του αέρινου όγκου των αντηχείων που ταλαντώνεται περιοδικά δια της ηχητικής οπής σε συγκεκριμένες συχνότητες. Όταν τα τοιχώματα του αντηχείου (καπάκι – σκάφος) θεωρηθούν ακίνητα το σύστημα αέρας – αντηχείο λειτουργεί περίπου ως ένας συντονιστής Helmholtz [18], μια κατασκευή που αποτελείται από μία κοιλότητα σε συνδυασμό με ένα κυλινδρικό επιστόμιο (απλοϊκά, όπως ένα γυάλινο μπουκάλι). Σε αυτήν την περίπτωση η κίνηση του αέρα μπορεί να μελετηθεί με την μορφή ενός απλού αρμονικού ταλαντωτή με έναν βαθμό ελευθερίας. Ως «ελατήριο» θεωρείται ο αέρινος όγκος (V) στο εσωτερικό της κοιλότητας, ενώ ως «μάζα» θεωρείται το τμήμα του αέρα που ταλαντώνεται στο κυλινδρικό στόμιο του συντονιστή και ισούται με $m = \rho Sl$, όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, S η επιφάνεια εγκάρσια τομής (πr^2) του κυλινδρικού στομίου και l το ύψος του αντίστοιχα. Η θεμέλιος συχνότητα του συντονιστή που συναντάται με τον όρο «συχνότητα Helmholtz» ή «συχνότητα του αέρα» είναι μια συνάρτηση των παραπάνω γεωμετρικών χαρακτηριστικών και της ταχύτητας του ήχου στον αέρα (c) και υπολογίζεται από την σχέση [19]:

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}} \quad (2.3.1)$$

Η παραπάνω σχέση όμως δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμη στα μουσικά όργανα κυρίως λόγω της γεωμετρικής ασυμφωνίας του στόμιου με την ηχητική οπή. Συγκεκριμένα, για να ισχύει η σχέση 2.3.1 υπάρχει η προϋπόθεση ότι η επιφάνεια της διατομής της οπής πρέπει να είναι πολύ μικρότερη του τετραγώνου του ύψους της επί την σταθερά του Αρχιμήδη ($S \ll \pi l^2$). Στα μουσικά όργανα όμως για τις διαστάσεις των οπών ισχύει ότι το ύψος του καπακιού (ουσιαστικά είναι το πάχος αλλά αποφεύγεται για να γίνει άμεση σύγκριση με τους συντονιστές), l , είναι της τάξης των mm ενώ η επιφάνεια, S , της τάξης των cm^2 . Σε αυτή την περίπτωση η αέρινη μάζα που ταλαντώνεται εκατέρωθεν της οπής δεν περιορίζεται στα όρια που θέτει το ύψος των καπακιών l αλλά το ξεπερνά τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά ως αποτέλεσμα της αδράνειας που αναπτύσσεται κατά την ταλάντωση. Έτσι, λόγω του ότι η «ενεργή μάζα» του αέρα είναι μεγαλύτερη από αυτήν που υπολογίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπής στο ύψος l προστίθεται ένας διορθωτικός παράγοντας, d , και στην σχέση l το ύψος αντικαθίσταται από το ενεργό ύψος $l_{\text{eff}} = l + d$.

Η διαδικασία αυτή συναντάται στην βιβλιογραφία με τον όρο 'end correction' (διόρθωση των άκρων) λόγω του ότι ο παράγοντας d προσδιορίζεται από τις συνθήκες που επικρατούν στα άκρα της οπής. Στις κιθάρες όπου η αέρινη μάζα ταλαντώνεται εκατέρωθεν μιας κυκλικής οπής που

«τερματίζει» σε επίπεδη επιφάνεια το συνολικό ενεργό μήκος προσδιορίζεται ως $d=1,7r$ [6] όπου r η ακτίνα της οπής. Αυτή η σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στα όργανα της οικογένειας του μπουζουκιού μόνο στην περίπτωση που έχουν κυκλικές οπές.

Στα μπουζούκια όμως η ύπαρξη κυκλικής οπής σπανίζει ενώ εκτός από τις ελλειπτικές οπές που έχουν τα όργανα της μελέτης υπάρχουν και όργανα με οπές που σκαλίζονται από τους οργανοποιούς παίρνοντας διάφορα σχήματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις ως παράγοντας διόρθωσης χρησιμοποιείται η τετραγωνική ρίζα της συνολικής επιφάνειας της οπής και η σχέση που δίνει την συχνότητα Helmholtz μετατρέπεται στην [20]:

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V(l + \sqrt{A})}} \quad (2.3.2)$$

Η προσέγγιση με την οποία υπολογίζεται η συχνότητα Helmholtz μέσω των παραπάνω σχέσεων είναι αρκετά καλή και χρησιμοποιείται από πλήθος οργανοποιών κατά τα στάδια κατασκευής της κιθάρας. Ωστόσο, ο υπολογισμός αυτής της συχνότητας με μεγάλη ακρίβεια θεωρώντας τα άκρα των αντηχείων ακλόνητα είναι αρκετά επισφαλής διότι στην πραγματικότητα τόσο τα καπάκια όσο και τα σκάφη των οργάνων ταλαντώνονται μεταβάλλοντας τον όγκο των αντηχείων εκφυλίζοντας την ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης της αέρινης μάζας. Στις κιθάρες ως βασικός τρόπος δόνησης του αέρα (συχνότητα Helmholtz) θεωρείται το αποτέλεσμα της σύζευξης του ιδανικού ταλαντωτή (με ακλόνητα άκρα) με τον χαμηλότερο τρόπο δόνησης του καπακιού [6].

Εκτός όμως από την συχνότητα Helmholtz που είναι ο χαμηλότερος τρόπος συντονισμού στα περισσότερα έγχορδα μουσικά όργανα η ταλάντωση της αέρινης μάζας συμβαίνει και σε υψηλότερες συχνότητες με αποτέλεσμα την πιθανή σύζευξη κάποιου τρόπου δόνησης του καπακιού και του αέρα.

Η ύπαρξη του αέρα τόσο μέσα όσο και έξω από τα όργανα έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της απόσβεσης των τρόπων δόνησης. Σε μετρήσεις πραγματοποίησε ο Gough [21] στην κιθάρα σε θάλαμο εκκένωσης του αέρα παρατήρησε αύξηση της απόσβεσης στον βασικότερο συντονισμό της κιθάρας. Συγκεκριμένα, ο παράγοντας Q μειώθηκε από 30 σε 17.

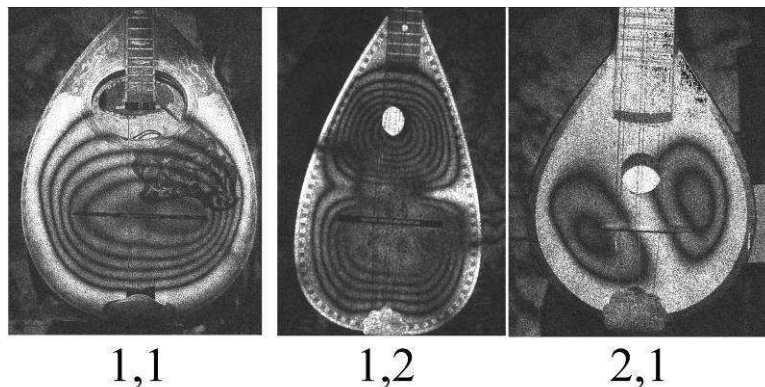
Εκτός όμως από τις τριβές που αναπτύσσονται η ύπαρξη του αέρα επηρεάζει δραστικά και τις συχνότητες ταλάντωσης των τρόπων δόνησης. Αυτό προκύπτει από τις παρατηρήσεις του McLennan [22] που μελέτησε τις συχνοτικές μεταβολές στους 2 χαμηλότερους τρόπους δόνησης του βιολιού σε διοξείδιο του άνθρακα, Ήλιο και διάφορες μίξεις αέρα με Ήλιο.

2.4 Σχέσεις σύζευξης στα ολοκληρωμένα όργανα

Στα ολοκληρωμένα όργανα η συνολική δονητική συμπεριφορά και παραγωγή του ήχου εξαρτάται από την αλληλεπίδραση όλων των τμημάτων τους. Αυτό αποτελεί και την μεγαλύτερη δυσκολία στην αναλυτική περιγραφή της συμπεριφοράς τους καθώς θα πρέπει να «απομονωθούν» όλοι οι παράγοντες και να μελετηθεί η συνεισφορά του καθενός ξεχωριστά. Στην παρούσα εργασία όμως μελετάται η συνολική δονητική συμπεριφορά των οργάνων και ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνεται ως σύζευξη όλων των τμημάτων των οργάνων αποτελεί εξειδικευμένη ακουστική ανάλυση που απέχει από τον βασικό της στόχο.

2.4.1 Τρόποι δόνησης και ονομασία

Οι τρόποι δόνησης που εμφανίζονται στα ολοκληρωμένα όργανα είναι πολλοί πιο σύνθετοι σε μορφή από τους αντίστοιχους των ελεύθερων καπακιών. Οι περιοχές όπου σχηματίζονται δεσμοί και κοιλίες πλάτους ταλάντωσης δεν παρουσιάζονται με την ίδια συμμετρία που έχουν, για παράδειγμα, σε μια παραλληλόγραμμη επιφάνεια. Για τον λόγο αυτό το σύστημα αρίθμησης δεν βασίζεται στην καταμέτρηση των δεσμών ταλάντωσης κατά πλάτος και κατά μήκος της επιφάνειας αλλά ο αριθμός των μεγίστων κατά τους αντίστοιχους άξονες.



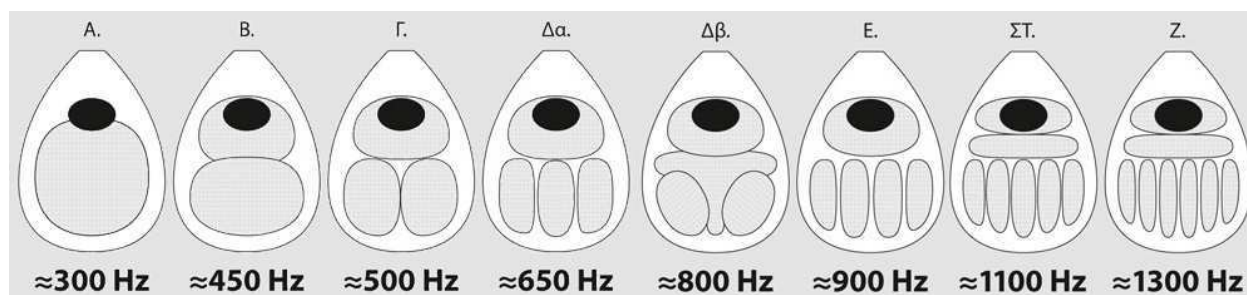
Εικόνα 2.7: Η μέθοδος ονομασίας των τρόπων δόνησης σε ολοκληρωμένα όργανα με βάση τις περιοχές που εντοπίζονται τα μέγιστα πλάτη ταλάντωσης (κοιλίες) κατά πλάτος και κατά μήκος των καπακιών (x,y): Μπουζούκι (1,1), τζουράς (1,2) και μπαλαμάς (2,1).

Η σύζευξη των επιμέρους τμημάτων των οργάνων έχει ως αποτέλεσμα και τον εκφυλισμό των τρόπων δόνησης με αποτέλεσμα κάποιοι να εμφανίζονται περισσότερες φορές από μια σε διαφορετικές συχνοτικές περιοχές. Για παράδειγμα, στην κιθάρα ο τρόπος (1,1) που είναι αντίστοιχος με του μπουζουκιού στην εικόνα 2.6 εμφανίζεται τουλάχιστον δύο (μπορεί και τρεις)

φορές ως αποτέλεσμα της σύζευξης του καπακιού με την αέρια κοιλότητα και την πλάτη*. Για να ξεχωρίζονται αυτοί οι τρόποι χρησιμοποιούνται δείκτες που προκύπτουν από το τμήμα του οργάνου από το οποίο προέρχονται κατά βάση. Έτσι για παράδειγμα η συχνότητα Helmholtz ή αέρια συχνότητα συναντάται με τους δείκτες Η ή Α αντίστοιχα ενώ στους τρόπους που προέρχονται από τον εκφυλισμό βασικών τρόπων δόνησης του καπακιού ο δείκτης που χρησιμοποιούνται είναι το Τ εκ του αγγλικού 'top plate'.

2.4.2 Τρόποι δόνησης στα ολοκληρωμένα όργανα

Οι τρόποι δόνησης ενός τρίχορδου μπουζουκιού χωρίς γέφυρα και χορδές εντοπίστηκαν μέσω των διαγραμμάτων Chlandi από τον οργανοποιό κ.Νίκο Φρονιμόπουλο όπου σε συνεργασία με τον κ.Γιώργο Παντελιά έχουν αναρτήσει στο διαδίκτυο [23] την σχετική ψηφιακή δημοσίευση.



Εικόνα 2.8: Οι τρόποι δόνησης ενός τρίχορδου μπουζουκιού όπως εντοπίστηκαν με την μέθοδο Chlandi [από 23].

Παρατηρώντας τους τρόπους δόνησης του τρίχορδου μπουζουκιού που περιγράφουν οι προαναφερθέντες διακρίνεται πως υπάρχουν τρόποι με 1 έως 8 κοιλίες ταλάντωσης στο εύρος μέχρι τα 1300Hz. Στο άρθρο αναφέρεται επίσης πως ο πρώτος τρόπος δόνησης Α του σχήματος (που ουσιαστικά είναι ο (1,1)Τ του μπουζουκιού) εμφανίζεται και στα 150Hz περίπου.

Από αυτήν την παρατήρηση και σε σχέση με τους αντίστοιχους τρόπους δόνησης της κιθάρας (1,1)Η και (1,1)Τ φαίνεται πως τα όργανα έχουν κοινή συμπεριφορά [6]. Έτσι οι σχέσεις σύζευξης που διέπουν τα όργανα της μελέτης πιθανά να περιγράφονται από τις αντίστοιχες της κιθάρας τουλάχιστον για αυτούς τους πρώτους τρόπους δόνησης των οργάνων. Ωστόσο, διατηρούνται πάντοτε επιφυλάξεις μέχρις αποδείξεως του εναντίου στο μέλλον. Αυτό είναι κατά κύριο λόγο συνέπεια της διαφορετικής γεωμετρίας στο πίσω μέρος των αντηχείων όπου στην κιθάρα είναι μια επίπεδη επιφάνεια (πίσω καπάκι) σε αντίθεση με το κοίλο σκάφος των οργάνων που μελετώνται.

* Σχόλιο: Αναφέρεται, σε περίπτωση που δεν είναι γνωστό, πως η πλάτη στα όργανα της κιθάρας είναι επίπεδη και συναντάται με τον όρο «πίσω καπάκι» και δεν έχει καμία σχέση στην γεωμετρία της με τα σκάφη των οργάνων της μελέτης.

2.4.3 Σύζευξη καπακιού, αέρινης συχνότητας και σκάφους (στην κιθάρα)

Τα χαρακτηριστικά της σύζευξης των τμημάτων που απαρτίζουν την κιθάρα προέρχονται από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε ολοκληρωμένα όργανα «απομονώνοντας» όσο το δυνατό την επιρροή μεμονωμένων τμημάτων. Από τις έρευνες αυτές προέκυψε ότι οι πρώτοι δύο τρόποι δόνησης της κιθάρας (1,1)T και (1,1)H είναι αποτέλεσμα της σύζευξης της αέρινης συχνότητας με τον πρώτο τρόπο δόνησης του καπακιού [24,6]. Συγκεκριμένα, η σύζευξη του πρώτου τρόπου δόνησης του καπακιού με τον αέρινο όγκο έχει ως αποτέλεσμα την μικρή μεταβολή της συχνότητάς του προς τα πάνω. Αντίθετα, η συχνότητα του αέρα μειώνεται λίγο από την «δανική» κατάσταση (που περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους). Η σχέση που συνδέει τις μη συζευγμένες συχνότητες των τρόπων αυτών με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από την σύζευξη είναι [25]:

$$f_T^2 + f_H^2 = f_-^2 + f_+^2 \quad (2.4.1)$$

Το πίσω καπάκι της κιθάρας επιδρά και αυτό στην συχνότητα του πρώτου τρόπου δόνησης του καπακιού μειώνοντας της συχνότητά του όταν η θεμέλιος του πίσω καπακιού είναι μικρότερη από αυτήν του καπακιού ($f_B < f_T$) και αυξάνοντάς την στην αντίθετη περίπτωση ($f_B > f_T$) [6].

Στις υψηλότερες συχνότητες υπάρχει μεγάλη ομοιότητα των τρόπων δόνησης με τους αντίστοιχους των ελευθέρων καπακιών ωστόσο οι συχνότητες και κυρίως οι παράγοντες απόσβεσης μεταβάλλονται από την σύζευξη [26].

2.4.4 Σύζευξη χορδής καπακιού

Όπως αναφέρθηκε (2.2.2.2 «Ενεργειακές απώλειες») η σύζευξη της χορδής με το καπάκι είναι μια μέτρηση της αγωγιμότητας, του βαθμού δηλαδή με τον οποίο αποκρίνεται ένα σημείο διέγερσης (με την μορφή της ταχύτητας ταλάντωσης που αναπτύσσει) προς μια δύναμη που εφαρμόζεται σε αυτό (το αντίστροφο της αντίστασης στην σχέση 2.2.9). Είναι προφανές από τα όσα έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής πως η αγωγιμότητα είναι συχνοτικά εξαρτώμενη με αποτέλεσμα το καπάκι να αποκρίνεται διαφορετικά στους διαφορετικούς τρόπους της χορδής ακόμα και όταν αυτοί έχουν ίδιο πλάτος.

Στις περιπτώσεις όπου η χορδή οδηγεί το καπάκι σε συχνότητες το οποίο δεν αποκρίνεται (αδύναμη σύζευξη) τότε οι συχνότητες των τρόπων δόνησης της χορδής διαταράσσονται ομαλά ενώ αύξηση παρατηρείται και στον ρυθμό πτώσης της έντασής τους.

Έχει παρατηρηθεί επίσης πως οι συχνοτικές σχέσεις των τρόπων δόνησης των χορδών με τους αντίστοιχους του καπακιού επιδρούν στην σχετική φάση με την οποία ταλαντώνονται τα δύο συστήματα. Σε έναν τρόπο δόνησης της χορδής που συμβαίνει σε χαμηλότερη συχνότητα από έναν αντίστοιχο του καπακιού η γέφυρα κινείται συμφασικά με το καπάκι με αποτέλεσμα την αύξηση του ενεργού μήκους της χορδής που συνεπάγεται σε μείωση της συχνότητας συντονισμού. Αντίθετα, όταν ένας τρόπος δόνησης της χορδής συμβαίνει σε υψηλότερη συχνότητα από έναν αντίστοιχο του καπακιού η γέφυρα κινείται σε αντίθετη φάση με το καπάκι με αποτέλεσμα την μείωση του ενεργού μήκους της χορδής που συνεπάγεται σε αύξηση της συχνότητας συντονισμού [27].

Την περίπτωση που ένας τρόπος της χορδής συμπίπτει σε συχνότητα με έναν αντίστοιχο του καπακιού εξέτασε πρώτος ο Gough [28,26] ο οποίος όρισε μια τιμή K που αντιστοιχεί στον βαθμό σύζευξης και δίδεται από την σχέση:

$$K = \frac{2Q_B}{n\pi} \sqrt{\frac{2m}{M_{eff}}} \quad (2.4.2)$$

Όπου Q_B ο παράγοντας Q του τρόπου δόνησης του καπακιού, n ο δείκτης του τρόπου δόνησης της χορδής, m η μάζα της χορδής και M_{eff} η ενεργή μάζα του τρόπου δόνησης του καπακιού.

Έτσι, με βάση τον βαθμός σύζευξης προκύπτουν δύο περιπτώσεις που διέπουν τα χαρακτηριστικά της:

- Όταν ο βαθμός σύζευξης $K < 1$ τότε η σύζευξη δεν επιδρά σημαντικά στις ιδιοσυχνότητες των τρόπων δόνησης αλλά αυξάνεται ο ρυθμός απόσβεσης.
- Όταν όμως υπάρχει δυνατή σύζευξη, με $K > 1$, το αποτέλεσμα είναι η συμμετρική διχοτόμηση των τρόπων δόνησης γύρω από τις ιδιοσυχνότητες των ταλαντωτών (χορδής και καπακιού) και την διαμόρφωση του παράγοντα ποιότητας σε $2Q_B$ και για τους δύο. Στην χαμηλότερη συχνότητα η χορδή και το καπάκι ταλαντώνονται σε φάση ενώ στην υψηλότερη με αντίθετη φάση.

Ο Wright [26] επεκτείνει τις παρατηρήσεις του Gough σε περιπτώσεις όπου οι συχνότητες των δύο τρόπων δόνησης δεν συμπίπτουν συχνοτικά αλλά βρίσκονται σε μικρή απόσταση. Το συμπέρασμά του είναι πως στην περίπτωση της πολύ ισχυρής σύζευξης $K \gg 1$ ο συζευγμένος τρόπος που βρίσκεται πιο κοντά στην φυσική συχνότητα συντονισμού της χορδής κυριαρχεί στην απόκριση μεταβάλλοντας σημαντικά την φυσική συχνότητα συντονισμού του ταλαντωτή.

Τα χαρακτηριστικά που αναπτύχθηκαν παραπάνω αφορούν ωστόσο μια δύναμη που εφαρμόζεται σε μία διεύθυνση προς το καπάκι. Η ιδιότητα των χορδών να ταλαντώνονται και

στους τρεις άξονες έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικούς τρόπους σύζευξης με τα καπάκια καθώς η αγωγιμότητα εξαρτάται και από την κατεύθυνση. Από τις τρεις διευθύνσεις της ταλάντωσης της χορδής (x,y,z) έχει παρατηρηθεί πως η κάθετη προς το καπάκι (z) είναι και αυτή που συζεύγνυται πιο ισχυρά με αυτό [26]. Η παρατήρηση αυτή φαίνεται λογική λόγω του ότι το καπάκι ταλαντώνεται κατά κύριο λόγο προς αυτήν την διεύθυνση.

Προκύπτει από τα παραπάνω πως ο εκτελεστής εκτός από την θέση κατά μήκος της χορδής μπορεί να ελέγξει και την αρχική γωνία με την οποία θα απομακρύνει την χορδή από την θέση ισορροπίας διεγείροντας αντίστοιχα περισσότερο την κάθετη ή την παράλληλη κίνηση της χορδής σε σχέση με το καπάκι και ως εκ τούτου και διαφορετικούς τρόπους δόνησης ανάλογα με τον σχηματισμό τους πάνω στο καπάκι. Σύμφωνα με τον Jansson [29] οι χορδές στην κιθάρα που διεγείρονται με παράλληλη φορά προς το καπάκι συζεύγνυται σχεδόν αποκλειστικά με τους τρόπους της μορφής (2,1) (εικόνα 2.6, μπαλαμάς). Οι δυνάμεις που ασκούνται κατά μήκος της χορδής (διαμήκης ταλάντωση) συζεύγνυται με τον (1,2) (εικόνα 2.6, τζουράς) να κυριαρχεί, ενώ η κάθετη ταλάντωση έχει σχεδόν αποκλειστική σύζευξη με τον (1,1)_T (εικόνα 2.6, τρίχορδο μουζούκι).

2.5.5 Σύνδεση ήχου και δονητικών χαρακτηριστικών των οργάνων

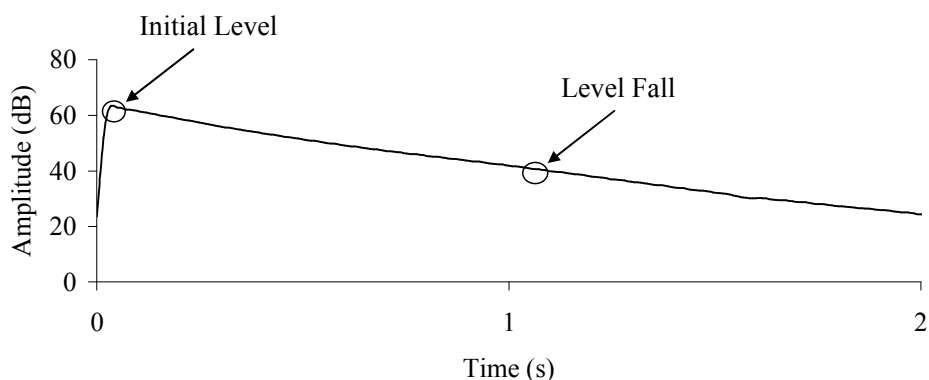
Οι Caldersmith και Jansson [30,16,6] ερεύνησαν τις ηχητικές ιδιότητες της κιθάρας σε σχέση με τις αντίστοιχες δονητικές σε ολοκληρωμένα όργανα. Ηχογραφήθηκαν νότες μιας οκτάβας σε κάθε χορδή και η μέθοδος επαναλήφθηκε. Στην ανάλυση που ακολούθησε πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της περιβάλλουσας έντασης για τα αρμονικά στοιχεία κάθε νότας και επιλέχθηκαν δύο τιμές από κάθε περιβάλλουσα. Το λεγόμενο αρχικό επίπεδο έντασης που είναι η μέγιστη τιμή της περιβάλλουσας (initial level) και η ένταση ένα δευτερόλεπτο μετά από την χρονική τιμή που αντιστοιχεί στο μέγιστο (initial level fall). Ταυτόχρονα, πραγματοποιήθηκαν λήψεις της ηχητικής απόκρισης των οργάνων και της συνάρτησης αγωγιμότητας σε μία θέση πάνω στην γέφυρα.

Συγκεντρώνοντας αυτές τις τιμές μέγιστης αρχικής έντασης και της αντίστοιχης μετά από ένα δευτερόλεπτο και σχεδιάζοντάς τις ως συνάρτηση της συχνότητας παρατηρήθηκαν δύο σημαντικά χαρακτηριστικά που διέπουν τον ήχο των οργάνων σε σχέση με τις δονήσεις τους:

- 1) Συγκρίνοντας τις τιμές της αρχικής έντασης ανά συχνότητα με τις ηχητικές αποκρίσεις και τις συναρτήσεις αγωγιμότητας παρατηρήθηκε μεγάλος βαθμός συσχέτισης στις περιοχές όπου υπάρχουν τα μέγιστα των διαγραμμάτων.
- 2) Συγκρίνοντας τις τιμές της έντασης ένα δευτερόλεπτο μετά από την μέγιστη με τις ηχητικές αποκρίσεις και τις συναρτήσεις αγωγιμότητας παρατηρήθηκε η αντίθετη

συμπεριφορά. Εκεί που στις συναρτήσεις ηχητικής απόκρισης και αγωγιμότητας υπήρχαν μέγιστα (που αντιστοιχούν στους συντονισμούς των οργάνων), στο διάγραμμα της πτώσης της έντασης υπήρχαν τοπικά ελάχιστα αφού λόγω της μεγάλης αγωγιμότητας το καπάκι μετατρέπει την ενέργεια ταλάντωσης των χορδών σε ακουστική ενέργεια σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα με αποτέλεσμα την ταχεία απόσβεση.

Οι σχέσεις αυτές που παρατηρήθηκαν είναι πολύ σημαντικές και αποτελούν μια ποιοτική εκτίμηση των σχέσεων που περιέγραψε ποσοτικά ο Gough και αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Στην συνέχεια της εργασίας αντίστοιχες σχέσεις παρατηρούνται και στα όργανα της μελέτης καθώς εκτός από την καταγραφή των βασικών δονητικών και ηχητικών χαρακτηριστικών τους ένας βασικός της στόχος είναι και ο προσδιορισμός των σχέσεων που τις συνδέουν.



Εικόνα 2.9: Οι τιμές αρχικής έντασης (Initial Level) και έντασης πτώσης (Level Fall) στην περιβάλλουσα έντασης μιας νότας τρίχορδου μπουζουκιού που αρχικά μελετήθηκαν από τους Caldersmith και Jansson σε όργανα κιθάρας [30].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ ΔΟΝΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι μέθοδοι και οι τρόποι εφαρμογής τους στην παρούσα εργασία με στόχο την συλλογή δεδομένων σχετικών με τα ακουστικά χαρακτηριστικά των οργάνων.

3.1 Καταγραφή και ανάλυση της ηχητικής εκπομπής των οργάνων

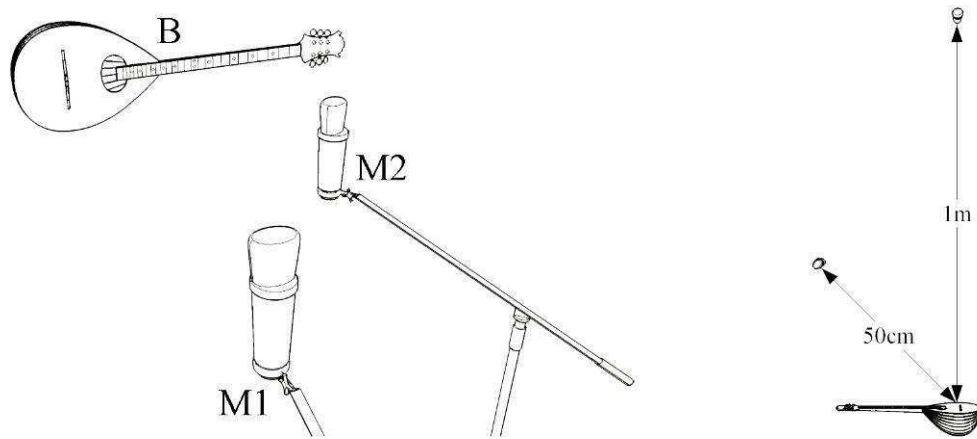
3.1.1 Διαδικασία της δειγματοληψίας

Η καταγραφή της ηχητικής εκπομπής των οργάνων επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας της δειγματοληψίας. Τα όργανα που μελετήθηκαν εκτελέστηκαν από επαγγελματία οργανοπαίκτη στο επαγγελματικό studio του γράφοντος το δωμάτιο ηχογραφήσεων του οποίου έχει υψηλά ποσοστά απορρόφησης του ήχου σε ολόκληρο το ακουστικό εύρος και κυρίως πάνω από τα 180Hz. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά πυκνωτικά μικρόφωνα μεγάλου διαφράγματος και γραμμικής συχνοτικής απόκρισης (σε λογικά πλαίσια)* που τοποθετήθηκαν σε δύο διαφορετικές θέσεις ως προς το όργανο και σε κατάσταση παντοκαντευθυντικής λήψης (omni-directional).

Ως κέντρο των οργάνων ορίστηκε το σημείο μεταξύ γέφυρας και οπής. Η θέση του πρώτου μικροφώνου (Neumann U87) επιλέχθηκε 1m μπροστά από το κέντρο των οργάνων και συναντάται ως «θέση 1» στην συνέχεια της εργασίας, ενώ το δεύτερο (AKG C-414) τοποθετήθηκε υπό γωνία 45ο ως προς το κέντρο των οργάνων και σε απόσταση 50cm και για λόγους συντομίας θα συναντάται με την ονομασία «θέση 2».

Ο οργανοπαίκτης εκτέλεσε έναν μεγάλο αριθμό δειγμάτων στα όργανα που αφορούν τόσο μεμονωμένες νότες όσο και ολοκληρωμένα κομμάτια υπό διαφορετικές συνθήκες και τεχνικές εκτέλεσης που περιγράφονται στην συνέχεια της παραγράφου. Η καταγραφή των δειγμάτων έγινε ψηφιακά σε Η/Υ μέσω εξωτερικής κάρτας ήχου (RME-FW400) σε συχνότητα δειγματοληψίας 48KHz και δυναμικό εύρος 24bit . Ο προενισχυτής του μικρόφωνου της θέσης 1 είναι ο M-5 της εταιρίας Avalon ενώ για το 2ο μικρόφωνο χρησιμοποιήθηκε ο προενισχυτής της κάρτας ήχου που σίγουρα δεν έχει τα χαρακτηριστικά του πρώτου αλλά παρουσιάζει ωστόσο ευθεία συχνοτική απόκριση (σε «κανονικά» επίπεδα ενίσχυσης) με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εταιρείας.

* Αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά της συχνοτικής απόκρισης των μικροφώνων και γενικά του ηλεκτροακουστικού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε κατά την διαδικασία της δειγματοληψίας εντοπίζονται στους δικτυακούς τόπους των αντίστοιχων εταιριών.



Εικόνα 3.1: Διάταξη της ηχογράφησης

3.1.1.1 Επιλογή των θέσεων λήψης.

Η επιλογή των δύο και γενικότερα περισσότερων του ενός μικροφώνων έχει πάντα ως στόχο την πληρέστερη περιγραφή των ηχητικών χαρακτηριστικών των μουσικών οργάνων για το λόγο ότι η ηχητική τους εκπομπή διαφοροποιείται σε συνάρτηση με την κατεύθυνση.

Η επιλογή της θέσης 1 γίνεται με βάση την θέση που συνήθως επιλέγεται σε αντίστοιχες μελέτες των μουσικών οργάνων [31,25]. Γενικά, η απόσταση του ενός μέτρου από το όργανο ικανοποιεί τόσο την συνθήκη μιας «αντικειμενικής θέσης ακρόασης» ενώ παράλληλα εξασφαλίζει ικανοποιητικό λόγο σήματος προς θόρυβο δεδομένου πως τα όργανα εκτελούνται σε κάποια φυσιολογική ένταση (και όχι ppp). Στην θέση 2 η απόσταση επιλέχθηκε να είναι μικρότερη από την θέση 1 εξασφαλίζοντας λίγο μεγαλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο που για τις περισσότερες μετρήσεις ξεπέρασε τα 78dB (στο εύρος 20-20000Hz) με βάση τους αντίστοιχους δείκτες της κάρτας ήχου. Η τοποθέτηση γίνεται υπό γωνία με κύριο στόχο την παρατήρηση της μεταβολής της ηχητικής εκπομπής των οργάνων σε μία πολύ διαφορετική θέση λήψης ανεξαρτήτως με το πόσο «ρεαλιστική» είναι ως θέση ακρόασης, που είναι και το ζητούμενο της εργασίας.

3.1.1.2 Τα ηχητικά δείγματα της μελέτης

Με τον όρο φυσική ή πραγματική εκτέλεση περιγράφεται ο τρόπος διέγερσης των μουσικών οργάνων που όπως αναφέρθηκε στην παρούσα εργασία γίνεται από επαγγελματία οργανοπαίκτη.

Το βασικότερο μειονέκτημα της φυσικής εκτέλεσης των οργάνων είναι η αδυναμία της καταγραφής των παραμέτρων που εξαρτώνται από τον οργανοπαίκτη όπως η ταχύτητα, η δύναμη διέγερσης (πίεση που ασκείται πάνω στην πένα) και η γωνία μεταξύ πένας και χορδών που εξαρτώνται από την εμπειρία και τις δυνατότητες του εκτελεστή όπως και άλλοι παράγοντες που

αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2. Για τον λόγο αυτό σε έναν αριθμό μετρήσεων πραγματοποιήθηκε επανάληψη με στόχο τον προσδιορισμό του «σφάλματος»* και την επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, είναι γνωστό πως το «σφάλμα» του εκτελεστή είναι κατά πολύ μικρότερο από τις δραματικές επιπτώσεις που μπορεί να έχουν στον ήχο τα φαινόμενα σύζευξης χορδών-καπακιού [30] χωρίς βέβαια να εννοείται πως ο οργανοπαίκτης δεν συμβάλει δραστικά στην διαμόρφωση της ποιότητας του τόνου.

Τα δείγματα που καταγράφηκαν από τα υπό μελέτη όργανα αφορούν σε ένα πλήθος διαφορετικών συνθηκών και τεχνικών που συγκεντρώνονται στους πίνακες που ακολουθούν. Ωστόσο, κάποια σημαντικά στοιχεία που αφορούν στην περιγραφή αναφέρονται και είναι απαραίτητα για τον χαρακτηρισμό των δειγμάτων.

Καταρχήν οι νότες που εκτελέστηκαν δεν είχαν όλες κοινή διάρκεια. Άλλες καταγράφηκαν στην πλήρη τους διάρκεια και άλλες καταγράφηκαν με συγκεκριμένες διάρκειες με στόχο την μείωση του απαιτούμενου χρόνου της δειγματοληψίας. Έτσι, στους πίνακες δίπλα από τον αριθμό των νοτών καταγράφεται η διάρκεια της κάθε νότας σε δευτερόλεπτα. Για παράδειγμα χρόνος 1s αντιστοιχεί σε νότες διάρκειας ενός δευτερολέπτου (και λίγο μεγαλύτερες), 2s σε δύο κ.ο.κ. . Όταν η μέτρηση αφορά την πλήρη διάρκεια των νοτών χρησιμοποιείται το σύμβολο FD (εκ του αγγλικού full duration).

Ο αριθμός των νοτών εκφράζει το πόσες νότες καταγράφηκαν σε κάθε μέτρηση. Συνήθως είναι 39 για τα τρίχορδα όργανα και 52 για το τετράχορδο μπουζούκι που συμβολίζουν πως η μέτρηση έγινε για μία οκτάβα σε κάθε χορδή (13 νότες). Έτσι στην συνέχεια της εργασίας, όπου αναφέρεται η φράση «39 νότες» εννοείται 1 οκτάβα σε κάθε χορδή για τα τρίχορδα όργανα και 52 για το τετράχορδο μπουζούκι αντίστοιχα. Οι αριθμοί 51 και 64 για τα τρίχορδα όργανα και για το τετράχορδο αντίστοιχα συμβολίζουν την καταγραφή μιας επιπλέον οκτάβας στην πρώτη χορδή κάθε οργάνου. Για παράδειγμα όταν στο μπουζούκι εμφανίζεται ο αριθμός 51 εννοείται πως στην D4 χορδή εκτελέστηκαν οι νότες από D4 έως D6 (293-1175Hz).

Τα δυναμικά επίπεδα που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις συμβολίζονται με τους όρους που χρησιμοποιούνται στην δυτική μουσική σημειογραφία ως pp, p ,mf, f και ff που χαρακτηρίζουν νότες με πολύ χαμηλή, χαμηλή, μέση προς δυνατή, δυνατή και πολύ δυνατή ένταση αντίστοιχα. Τέλος η επανάληψη των μετρήσεων όπου αυτή συμβαίνει συμβολίζεται με 'x' και τον αριθμό της επανάληψης.

Οι ονομασίες που χρησιμοποιούνται στους πίνακες για τα όργανα είναι B1 και B2 για τα τρίχορδα μπουζούκια 1 και 2, B4 το τετράχορδο μπουζούκι, T1 και T2 για τα όργανα τζουρά 1 και 2 και τέλος οι όροι Ba1, Ba2 για τα όργανα μαγλαμά 1 και 2 αντίστοιχα.

* Σχόλιο: Με τον όρο «σφάλμα» εννοείται η απόκλιση στα χαρακτηριστικά του ήχου που κατά την διαδικασία της επανάληψης μιας μέτρησης που οφείλεται στις παραμέτρους της διέγερσης των οργάνων που ελέγχονται από τον οργανοπαίκτη.

Ωστόσο, σημειώνεται πως ο μπαλαμάς 1 ηχογραφήθηκε σε διαφορετική θέση από τα υπόλοιπα όργανα και συγκεκριμένα στα 0,4m μπροστά από αυτόν. Η προσέγγιση αυτή ακολουθήθηκε για το συγκεκριμένο όργανο έτσι ώστε να παρατηρηθούν οι σχέσεις δονήσεων και ήχου σε μια λήψη που είναι πιο σχετική με αυτήν της ηχογράφησης του οργάνου για μια μουσική παραγωγή παρά για μια τυπική θέση ακρόασης.

Ως παράδειγμα όλων των παραπάνω εξηγείται το πρώτο κελί του πίνακα 3.1 όπου αριστερά γράφεται η μέθοδος εκτέλεσης που αφορά νότες που εκτελέστηκαν με μονές χορδές. Κοιτάζοντας στο αντίστοιχο κελί του τρίχορδου μουζουκιού 1 (B1) παρατηρείται πως καταγράφηκαν 51 νότες πλήρους διάρκειας και η μέτρηση επαναλήφθηκε. Συγκεκριμένα καταγράφηκε μια οκτάβα στην χορδή D3, μια στην A3 και δύο οκτάβες στην D4.

	B1	B2	B4	T1	T2	<i>Ba1</i>	Ba2
Νότες με μονές χορδές (mf)	51 FD x2		52 FD	51 4s	39 4s	39 6s	39 FD
Νότες σε pp		-39 1s	52 3s				39 FD
Νότες σε p	-39 3s x2 -39 1s	-39 1s		39 2s			39 2s
Νότες σε mf	-51 FD -51 2s -39 1s	-39FD -39 1s	-64 FD -52 4s	51 FD	-51 FD -39 2s		-39 2s -39 FD
Νότες σε f	39 FD x2	39 FD		39 2s	39 2s		51 FD
Νότες σε ff	-39 1s -39 3s	39 1s	52 3s				

Πίνακας 3.1: Γενικά ηχητικά δείγματα

Στον πίνακα αναγράφονται όλα τα ηχητικά δείγματα που καταγράφηκαν για τα μουσικά όργανα ώστε να μελετηθούν τα τυπικά χαρακτηριστικά του ήχου τους. Η γωνία διέγερσης των οργάνων είχε μικρή απόκλιση από την παράλληλη (ως προς το καπάκι) διέγερση και η φορά του χεριού του οργανοπαίκτη ήταν προς τα κάτω στον μέγιστο αριθμό των νοτών που ηχογραφήθηκαν. Η απόσταση από την γέφυρα ήταν σε μια τυπική θέση εκτέλεσης περίπου στο $1/12$ * του ενεργού μήκους χορδής του κάθε οργάνου.

Παρατηρείται πως για τα περισσότερα όργανα καταγράφηκαν νότες με μονές χορδές καθώς η αλληλεπίδραση των διπλών χορδών απασχολεί την εργασία από την στιγμή που αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό των οργάνων που μελετώνται. Με τον όρο μονές χορδές δεν εννοείται πως αφαιρέθηκαν τα ζεύγη τους, καθώς κάτι τέτοιο θα άλλαζε δραστικά την συμπεριφορά των οργάνων, αλλά απομονώθηκαν (όσο το δυνατό) και ο οργανοπαίκτης διέγειρε μία μόνο χορδή σε

* Η ακριβής θέση αλλάζει μπορεί να μεταβάλλεται από όργανο σε όργανο ανάλογα και με την σωματική διάπλαση του οργανοπαίκτη.

κάθε ζεύγος. Στα ζεύγη που είναι κουρδισμένα στην οκτάβα διεγέρθηκε μόνο η πιο μπάσα χορδή. Επίσης, καταγράφηκαν δείγματα για διπλές χορδές κυρίως σε μέση ένταση αλλά και για ακραία δυναμικά επίπεδα (pp,ff) που έχουν χρήση στην περιγραφή ακραίων φαινομένων στα χαρακτηριστικά του ήχου και δεν εκφράζουν την τυπική συμπεριφορά των οργάνων. Βέβαια το κατά πόσο συναντιόνται ακραία δυναμικά επίπεδα στο ρεπερτόριο των οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού θα μπορούσε να αποτελέσει ολοκληρωμένη μελέτη από μόνο του και δεν θα απασχολήσει περισσότερο την παρούσα εργασία.

Εκτός από τις νότες που ηχογραφήθηκαν με τυπικές συνθήκες πραγματοποιήθηκε λήψη ηχητικών δειγμάτων με διαφορετικές τεχνικές και συνθήκες. Με τον όρο τεχνικές εννοούνται οι παράμετροι που ελέγχει ο οργανοπαίκτης όπως η διαφορετική γωνία διέγερσης με την πένα και η θέση διέγερσης κατά μήκος των χορδών. Με τον όρο συνθήκες εννοούνται παράμετροι που δεν ελέγχει ο οργανοπαίκτης και αφορούν την εκτέλεση νοτών και μουσικών κομματιών με την ηχητική οπή σφραγισμένη ή με διαφορετικό σχετικό κούρδισμα στις χορδές.

Τα δείγματα που καταγράφηκαν με αυτές τις τεχνικές και συνθήκες συγκεντρώνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

	B1	B2	B4	Ba2
Πένα 1,2mm	39 5s x2	Κομμάτι διάρκειας 1':10'' x2	52 FD	39 FD
Πένα 1mm	39 5s x2	Κομμάτι διάρκειας 1':10'' x2	52 3s	39 FD
Πένα 0,8mm	39 5s x2	Κομμάτι διάρκειας 1':10'' x2		39 2s
Πένα 0,5mm	39 5s x2	Κομμάτι διάρκειας 1':10'' x2	64 FD	-39 2s -39 FD
Απόσταση από την γέφυρα 1cm			52 2s	
Απόσταση από την γέφυρα 5cm		Κομμάτι διάρκειας 1':10'' x2	52 2s	
Απόσταση από την γέφυρα 8cm		Κομμάτι διάρκειας 1':10'' x2		
Απόσταση από την γέφυρα 13cm		Κομμάτι διάρκειας 1':10'' x2	52 2s	
Οπή κλειστή			52 4s	
Πένα με φορά προς τα πάνω	39 x2			
Κάθετη γωνία διέγερσης	39			39
Παράλληλη γωνία διέγερσης	39			39

Πίνακας 3.2: Ειδικά ηχητικά δείγματα

Εκτός από τα παραπάνω πραγματοποιήθηκε και μία μέτρηση με στόχο την μελέτη της σχέσης της αλληλεπίδρασης των χορδών με το σχετικό τους κούρδισμα όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα. Καταγράφηκαν 13 νότες στην D4 χορδή του τετράχορδου μπουζουκιού (B4) με

μονή χορδή, με διπλές χορδές κουρδισμένες σε ταυτοφωνία, με διπλές χορδές με διαφορά θεμελίου 1Hz, 2-3Hz και 3-4Hz.

Εκτός από τα παραπάνω δείγματα πραγματοποιήθηκε και ηχογράφηση ολοκληρωμένων κομματιών στο τρίχορδο μπουζούκι με στόχο την παρατήρηση χαρακτηριστικών του ήχου κατά την πραγματική εκτέλεση των οργάνων που όμως είναι αρκετά εξειδικευμένες για τον στόχο της εργασίας.

3.1.2 Ανάλυση των ηχητικών δειγμάτων

Τα χαρακτηριστικά της χροιάς των οργάνων μελετώνται μέσω της ανάλυσης των ηχητικών δειγμάτων που καταγράφηκαν στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιείται με χρήση των λογισμικών PRAAT [32] και dBFa32 της εταιρείας Metranib που είναι εγκατεστημένο στους υπολογιστές του εργαστηρίου οπτικής απεικόνισης δονήσεων του τμήματος μουσικής τεχνολογίας και ακουστικής στο Ρέθυμνο..

Κάνοντας έναν πρόχειρο υπολογισμό, ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων που καταγράφονται ξεπερνά κατά πολύ τα 3200. Γίνεται έτσι σαφές πως τουλάχιστον για την παρούσα εργασία κρίνεται πολύ εξειδικευμένη η λεπτομερής ανάλυση του κάθε δείγματος και ο υπολογισμός όλων των χαρακτηριστικών του που ενδεχομένως να αποτελέσει ξεχωριστή εργασία στο μέλλον. Για τον λόγο αυτό αναπτύσσεται ειδικός προγραμματιστικός κώδικας στις περιπτώσεις όπου απαιτείται η μαζική επεξεργασία των δειγμάτων για τον εντοπισμό των γενικών χαρακτηριστικών που καλείται να προσδιορίσει η εργασία εκτός βέβαια από τα ειδικά παραδείγματα όπου η ανάλυση πραγματοποιείται σε μεμονωμένα ηχητικά δείγματα.

3.1.2.1 Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας

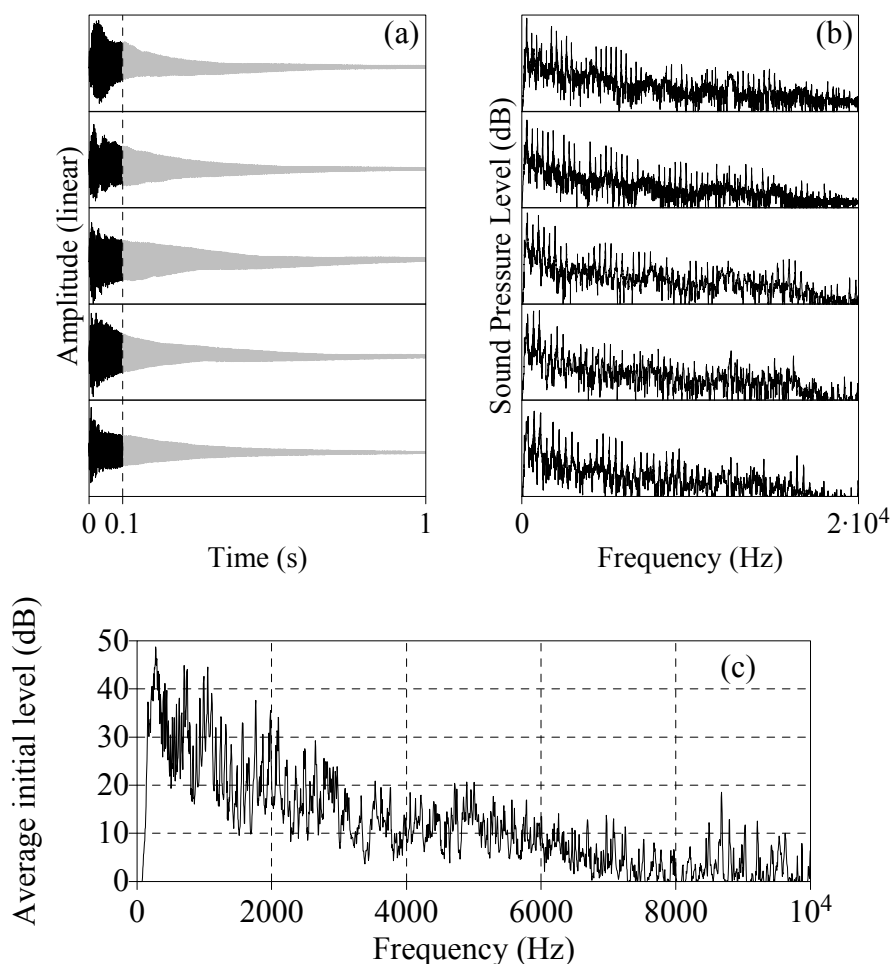
Η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας κλασσικές τεχνικές Μετασχηματισμού Fourier. Ωστόσο, σημειώνεται πως οι χρόνοι ολοκλήρωσης του μετασχηματισμού των σημάτων που καταγράφηκαν επιλέγονται ανά περίπτωση:

Όταν επιδιώκεται η μακροσκοπική περιγραφή της επίδρασης που έχει μια παράμετρος στην ενεργειακή κατανομή του συχνοτικού φάσματος των οργάνων γίνεται χρήση μεγάλων χρόνων ολοκλήρωσης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου εξετάζεται η μεταβολή της ενεργειακής κατανομής στο συχνοτικό φάσμα ενός μουσικού κομματιού που εκτελείται με ανοιχτή ή κλειστή οπή σε ένα όργανο, τότε ο μετασχηματισμός μπορεί να εφαρμοστεί στην συνολική διάρκεια του που μπορεί να είναι από μερικά δευτερόλεπτα έως και λεπτά. Αυτού του είδους τα διαγράμματα

είναι γνωστά με τον όρο Long Term Average Spectrum (LTAS) και χρησιμοποιούνται συχνά στην μακροσκοπική επεξεργασία ηχητικών δειγμάτων από μουσικά όργανα [16].

Όταν εξετάζεται το σχετικό πλάτος έντασης των αρμονικών μιας νότας τότε τα χρονικά παράθυρα επιλέγονται να είναι πολύ μικρότερα (της τάξης των 50-100ms) και ο μετασχηματισμός πραγματοποιείται σε διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα ανάλογα με επιθυμητό σημείο παρατήρησης. Στην μαζική επεξεργασία, που χρησιμοποιείται κατά κόρων στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται ο λογαριθμικός φασματικός μέσος όρος που προκύπτει από τα διαφορετικά φασματογραφήματα που συγκεντρώνονται από ένα μεγάλο αριθμό νοτών (συνήθως μια οκτάβα σε κάθε χορδή των οργάνων) καλύπτοντας έτσι την γενική συμπεριφορά του ήχου των οργάνων στο μεγαλύτερο εύρος τους.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρατηρείται ο φασματικός μέσος όρος του τρίχορδου μπουζουκιού για 39 νότες (μία οκτάβα σε κάθε χορδή) στο αρχικό στάδιο (0-100ms) καθώς και ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται σε 5 νότες.



Εικόνα 3.2: Πάνω, 5 νότες του τρίχορδου μπουζουκιού 1 στην θέση 2, κυματομορφές 1s (a), φάσμα στα πρώτα 100ms (b). Κάτω, φασματικός μέσος όρος για 39 νότες στα πρώτα 100ms για όλες τις νότες(c).

Όπως φαίνεται από την εικόνα 3.2 όλες οι νότες ρυθμίζονται χειροκίνητα έτσι ώστε να έχουν κοινό χρόνο έναρξης και στην συνέχεια πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός τους στο αρχικό στάδιο (0-100ms). Από τα φάσματα που εξάγονται στο πεδίο της συχνότητας υπολογίζεται το μέσο φάσμα στο κάτω μέρος της εικόνας 3.2. Τα μέσα αυτά φάσματα δείχνουν την γενική συγκέντρωση της ενέργειας γύρω από κάποιες συχνοτικές περιοχές και για λόγους συντομίας στην περιγραφή τους συχνά χρησιμοποιούνται οι έννοιες «φασματικός μέσος όρος» ή «ενεργειακή κατανομή» που περιγράφουν τα παραπάνω.

Επίσης για λόγους συντομίας όταν οι παραπάνω μετρήσεις αντιστοιχούν στο αρχικό στάδιο όλων των νοτών χρησιμοποιείται ο όρος «αρχική ενέργεια» αντί του «ηχητική ενεργειακή κατανομή ανά συχνότητα για x αριθμό νοτών στο αρχικό τους στάδιο, 0-100ms». Αντίστοιχα όταν οι αναλύσεις εφαρμόζονται σε χρόνο 0,95-1,05s ονομάζονται «φάσματα ενέργειας πτώσης» ή «πτώσης ενέργειας» στο 1s και αντίστοιχα σε άλλα χρονικά στιγμιότυπα όπως 2s, 3s, 4s κλπ.

Σημειώνεται τέλος πως η ανάλυση γίνεται και σε συχνοτικές ζώνες 1/3 της οκτάβας που διευκολύνουν στην ανάγνωση της συμπεριφοράς των οργάνων παρά την έλλειψη λεπτομερούς πληροφορίας που τις διακρίνει.

3.1.2.2 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

Η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου περιλαμβάνει τόσο την εξαγωγή της περιβάλλουσας έντασης για τις νότες που καταγράφηκαν όσο και της αντίστοιχης των βασικότερων αρμονικών στοιχείων τους. Οι περιβάλλουσες έντασης των δειγμάτων περιέχουν την πληροφορία της εξέλιξης της έντασης μιας νότας ή του εκάστοτε αρμονικού της στοιχείου στο πεδίο του χρόνου. Κατά την αντίστροφη διαδικασία γνωρίζοντας τις χρονικές τιμές στις οποίες συμβαίνουν συγκεκριμένες μεταβολές της έντασης μπορεί να σχηματιστούν οι αντίστοιχες περιβάλλουσες.

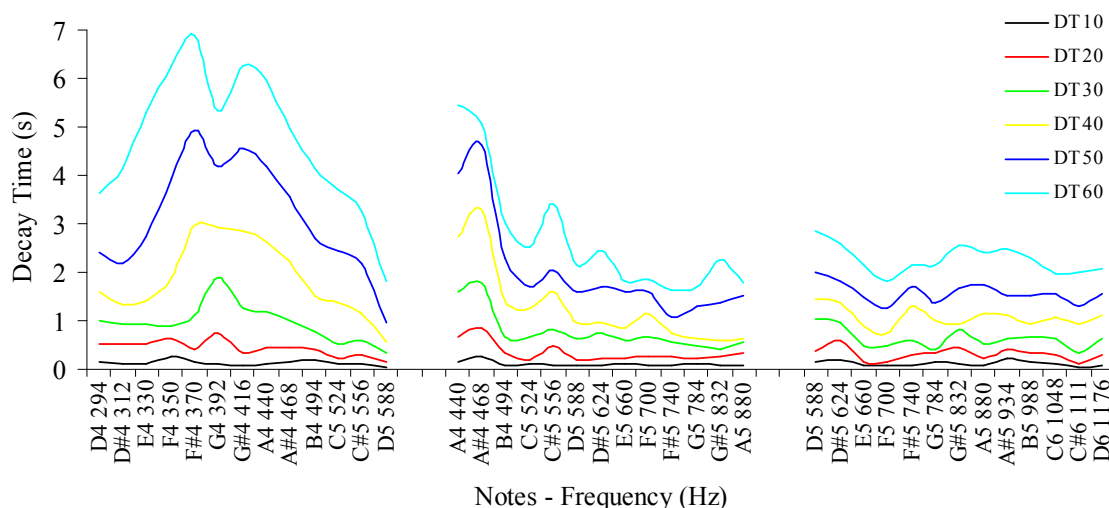
Όσο αφορά στην μαζική επεξεργασία των ηχητικών δειγμάτων η περιβάλλουσα έντασης στην παρούσα εργασία προσεγγίζεται με την τελευταία σχέση όπου εξάγονται οι χρόνοι στους οποίους αντιστοιχεί συγκεκριμένη μεταβολή της έντασης από την μέγιστη τιμή της. Οι χρόνοι που ελέγχονται αφορούν πτώση της έντασης σε εύρος 60dB με βήμα 10dB. Έτσι, οι τιμές DT10, DT20...DT60 χρησιμοποιούνται αρκετές φορές για να περιγράψουν τα χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας έντασης για περισσότερες από μια νότες. Ο αλγόριθμος που εκτελεί την μαζική επεξεργασία είναι ουσιαστικά ένα απλό script που αυτοματοποιεί λειτουργίες που υπάρχουν ήδη στο πρόγραμμα PRAAT και λειτουργεί ως εξής:

Σε πρώτο στάδιο επιλέγονται όλα τα αρχεία ήχου που βρίσκονται μέσα σε ένα φάκελο και για κάθε αρχείο πραγματοποιείται εξαγωγή και ανάλυση της περιβάλλουσας έντασης και του τονικού ύψους σε Hz. Από την ανάλυση εντοπίζεται η μέγιστη ένταση καθώς και η χρονική τιμή στην οποία

αντιστοιχεί η οποία ορίζεται ως αρχική (0s). Στην συνέχεια εντοπίζονται οι χρόνοι που αντιστοιχούν σε πτώση έντασης έως 60dB με βήμα 10 και τοποθετούνται αυτόματα σε ένα πίνακα. Από τις τιμές αυτές δημιουργούνται διαγράμματα όπως αυτό της εικόνας 3.3 που ακολουθεί όπου στον άξονα των x τοποθετούνται οι 13 νότες που αντιστοιχούν σε κάθε χορδή με την πιο μπάσα χορδή του οργάνου να τοποθετείται πάντα στα αριστερά για όλα τα όργανα στα οποία πραγματοποιούνται τέτοιου είδους αναλύσεις.

Εκτός από την περιβάλλουσα έντασης της κάθε νότας, αντίστοιχα διαγράμματα χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν και τις περιβάλλουσες έντασης των θεμελίων (πρώτων αρμονικών) των νοτών όπου απαιτείται τέτοιου είδους επεξεργασία.

Ωστόσο, ο γράφων δεν έχει εντοπίσει τέτοιου είδους διαγράμματα σε σχετική βιβλιογραφία αλλά αυτός κρίθηκε ο καλύτερος τρόπος για την μαζική παρουσίαση της γενικής συμπεριφοράς της μεταβαλλόμενης έντασης. Ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.3: Οι χρόνοι DT10 έως 60 για 39 νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές με πολύ δυνατή ένταση (ff) στον μπαγλαμά 2 στην θέση 1.

Από το διάγραμμα φαίνεται η γενική συμπεριφορά της περιβάλλουσας έντασης για 39 νότες εκτελεσμένες με διπλές χορδές στον μπαγλαμά 2. Η ανάλυση του γραφήματος δίδει χρήσιμα στοιχεία για την συμπεριφορά των οργάνων που αναλύονται σε επόμενα κεφάλαια. Ωστόσο, το γράφημα παρατίθεται με στόχο την εξοικείωση του αναγνώστη με τον τρόπο παρουσίασης που επιλέγεται από τον γράφοντα για την μαζική επεξεργασία των δειγμάτων όπου: Στα αριστερά βρίσκονται οι νότες της πιο μπάσας χορδής του μπαγλαμά (D4), στο κέντρο οι νότες της A4 και δεξιά της D5 αντίστοιχα. Από τα γραφήματα διακρίνεται ο τρόπος με τον οποίο μειώνεται η ένταση ανά 10 dB που δείχνει πως ο μπαγλαμάς έχει συνολικά μικρές διάρκειες ενώ χαρακτηριστικά τα

μεγαλύτερα ποσοστά έντασης αποσβένουν σε μικρό χρονικό διάστημα, αφού οι χρόνοι DT10-20-30 είναι πιο «πυκνά» συγκεντρωμένοι κάτω από το 1s κατά μέσο όρο.

Σχολιασμός

Όταν πρόκειται για την περιγραφή της περιβάλλουσας που βασίζεται σε νότες που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές οι περιβάλλουσες έντασης των νοτών αναπαριστώνται με μεγάλη ακρίβεια από τις 6 τιμές της ανάλυσης. Υπάρχει βέβαια και ένας μικρότερος αριθμός νοτών στις οποίες υπάρχει ισχυρή σύζευξη των τρόπων δόνησης των χορδών με αντίστοιχους των καπακιών αλλά και αλληλεπίδραση μεταξύ των 2 εγκάρσιων τρόπων δόνησης των χορδών που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία διακροτημάτων και μη γραμμικής μεταφοράς ενέργειας πίσω στην χορδή με αποτέλεσμα η ανάλυση να αποδίδει λιγότερο. Σε αυτές τις περιπτώσεις κάποιες φορές ο εντοπισμός πραγματοποιείται χειροκίνητα και κάποιες όχι με την πιθανότητα κάποιες τιμές να «υποτιμώνται». Ωστόσο, όπως φαίνεται από το σύνολο της εργασίας η μέθοδος αποδίδει στον στόχο αν και στο μέλλον θα πρέπει να δημιουργηθεί πιο ειδικός προγραμματιστικός κώδικας που να υπολογίζει το σφάλμα αυτό είτε μέσω τεχνικών αποδιαμόρφωσης (demodulation) είτε μέσω υπολογισμού του ρυθμού πτώσης της έντασης σε σχέση με την μεταβολή μιας μέσης τιμής.

Εκτός από τους χρόνους που περιγράφουν την μεταβολή της έντασης του ήχου των οργάνων μετά την μέγιστη τιμή της στην εργασία υπολογίζονται και κάποιοι χρόνοι ανόδου (attack time) των νοτών. Ο εντοπισμός βασίζεται στην φυσική ανάλυση του σήματος και όχι στον τρόπο με τον οποίο γίνονται αντιληπτές από το ανθρώπινο αυτί. Έτσι, στην παρούσα εργασία ως χρόνος ανόδου θεωρείται το διάστημα από την αρχή μιας ενός ηχητικού δείγματος (onset) έως το πρώτο απόλυτο μέγιστο στην κυματομορφή του.

3.2 Μέθοδοι μελέτης των δονητικών χαρακτηριστικών

3.2.1 Χρονικά Ολοκληρωμένη Ηλεκτρονική Συμβολομετρία Ψηφίδων ((ESPI)

Η χρονικά ολοκληρωμένη ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων (time-averaged Electronic Speckle Pattern Interferometry) είναι μη-καταστρεπτική συμβολομετρική οπτική τεχνική μέσω της οποίας μελετώνται οι δονήσεις ή οι παραμορφώσεις αντικειμένων. Η τεχνική βασίζεται στην ιδέα της συμβολής δύο σύμφωνων φωτεινών πεδίων τυχαίας φάσης πριν και μετά την παραμόρφωση ενός αντικειμένου [33] και εφαρμόζεται ήδη από το 1971 [34]. Ο όρος «ψηφίδα» στην ονομασία της τεχνικής χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κοκκιδωτή τυχαία φύση της κατανομής έντασης που χαρακτηρίζει το ανακλώμενο από ένα αντικείμενο φως.

Η βασική λειτουργία της ESPI είναι η καταγραφή δύο φωτεινών δεσμών από έναν οπτικό αισθητήρα που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι μια κάμερα CCD. Οι δύο δέσμες προκύπτουν από την διχοτόμηση μια αρχικής δέσμης laser αλλά ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές. Η πρώτη που ορίζεται ως δέσμη αναφοράς προσπίπτει στον αισθητήρα της κάμερας οδηγούμενη από ένα σύστημα φακών και καθρεπτών. Η δεύτερη είναι η ανακλώμενη από το υπό μελέτη αντικείμενο που προσπίπτει και αυτή στον αισθητήρα της κάμερας. Οι φωτογραφίες που συλλέγονται από την κάμερα αφαιρούνται διαδοχικά καθώς το υπό μελέτη αντικείμενο μετατοπίζεται και με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται συμβολογράμματα τα οποία σχετίζονται με την μετατόπιση του.

Η τεχνική ESPI και οι εφαρμογές της για τη μελέτη δονούμενων αντικειμένων έχουν παρουσιαστεί λεπτομερώς σε πολλά αξιόλογα άρθρα και βιβλία αναφοράς [35-38]. Σε ότι αφορά το αντικείμενο της εργασίας η εφαρμογή της χρησιμοποιούμενης τεχνικής σε καπάκια Κρητικής λύρας έχει περιγραφεί αναλυτικά σε προηγούμενα άρθρα [39,40] και έχει εφαρμοσθεί σε 12 ολοκληρωμένα όργανα Κρητικής λύρας από τον γράφοντα [3]. Στην παράγραφο που ακολουθεί περιγράφεται η διάταξη της μεθόδου, οι μαθηματικές σχέσεις που την διέπουν καθώς και ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία.

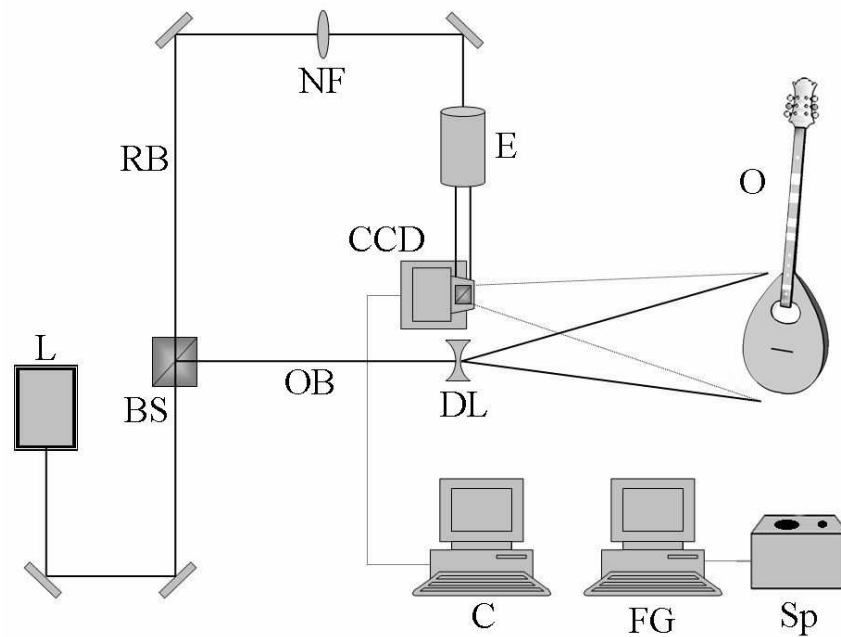
3.2.1.2 Πειραματική διάταξη της ESPI

Στο εικόνα 3.4 που ακολουθεί απεικονίζεται η διάταξη της ESPI του εργαστηρίου ακουστικής και οπτικής τεχνολογίας του τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης (Ρέθυμνο). Σε πρώτο στάδιο το υπό μελέτη αντικείμενο (O) στηρίζεται πάνω σε τράπεζα απορρόφησης κραδασμών ώστε να αποφευχθεί η επιρροή εξωτερικών δονήσεων κατά την διαδικασία λήψης των μετρήσεων. Χρησιμοποιείται πηγή laser (L) της εταιρείας Cobolt Samba™ συνεχούς μήκους κύματος, μονού εγκάρσιου και διαμήκους ρυθμού. Το μήκος κύματος εκπομπής είναι 532 nm (πράσινο) και η μέγιστη ισχύς 150 mW.

Στην συνέχεια η δέσμη φωτός laser διαχωρίζεται σε δύο δέσμες μέσω οπτικού διαχωριστή (BS) με αναλογία 80/20. Η μικρότερης έντασης δέσμη χρησιμοποιείται ως δέσμη αναφοράς (RB) και οδηγείται μέσω ανακλάσεων σε ψηφιακή κάμερα υψηλής ανάλυσης (CCD), αφού έχει υποστεί παράλληλη χωρική μεγέθυνση (E). Η μεγαλύτερης έντασης δέσμη χρησιμοποιείται για να φωτίσει το αντικείμενο και ονομάζεται δέσμη αντικειμένου (OB). Για να φωτιστεί ομοιόμορφα το υπό μελέτη αντικείμενο (O) η δέσμη αντικειμένου διαμορφώνεται από αποκλίνοντα φακό (DL). Η ανάκλαση της δέσμης αντικειμένου από την υπό μελέτη επιφάνεια συλλέγεται μαζί με την δέσμη αναφοράς και διαμορφώνεται περνώντας από διαχωριστή δέσμης 50/50 που βρίσκεται μεταξύ του φακού και του αισθητήρα της κάμερας και εξασφαλίζει την ευθύγραμμη πρόσπτωση και των δύο δεσμών στον αισθητήρα. Για να επιτευχθεί η επιζητούμενη σχέση έντασης των δύο φωτεινών

δεσμών γίνεται χρήση φίλτρου μεταβλητής διαπερατότητας (NF) το οποίο χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την ένταση της δέσμης αναφοράς κατά την διαδικασία ισοστάθμισης της διάταξης.

Τα δεδομένα από την ψηφιακή κάμερα συλλέγονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (C) όπου επεξεργάζονται και αποθηκεύονται σε πραγματικό χρόνο, μέσω ειδικού λογισμικού που έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον LabView. Τέλος, για την διέγερση των υπό μελέτη αντικειμένων γίνεται χρήση monitor ηχείου (Sp) που είναι συνδεδεμένο με την κάρτα ήχου υπολογιστή που στέλνει ημιτονικά σήματα και λειτουργεί ως γεννήτρια συχνοτήτων (FG).



Εικόνα 3.4: Πειραματική διάταξη ESPI: L-λείζερ, BS-διαχωριστής δέσμης, NF-φίλτρο μεταβλητής απορρόφησης, E-παράλληλοπαιχτής δέσμης, CCD-κάμερα CCD, DL-αποκλίνων φακός, O-αντικείμενο, C-σύστημα καταγραφής, FG - H/Y που λειτουργεί ως γεννήτρια συχνοτήτων, Sp-αυτοεπιισχυρόμενο ηχείο.

3.2.1.3 Μαθηματική Θεώρηση

Θεωρούμε ότι μία επιφάνεια δονείται εγκάρσια. Η μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας, w , σε κάθε σημείο της (x,y) για κάθε χρονική στιγμή, t , δίνεται από τη σχέση:

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

Όπου $A(x,y)$ είναι η κατανομή του πλάτους ταλάντωσης πάνω στην υπό μελέτη επιφάνεια, ω η κυκλική συχνότητα της ταλάντωσης και $\phi_0(x,y)$ η κατανομή της φάσης. Θεωρώντας ότι t είναι ο

χρόνος έκθεσης της κάμερας, η κατανομή της φωτεινής έντασης που ανιχνεύει οπτικός αισθητήρας (CCD) δίνεται από τη σχέση:

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \left\{ I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cdot \cos \left[\phi + \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta) A \cos(\omega t + \phi_0) \right] \right\} dt \quad (3.2)$$

όπου I_A και I_B είναι οι κατανομές έντασης των δεσμών αναφοράς και αντικειμένου αντίστοιχα, ϕ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των παραπάνω δεσμών, θ είναι η γωνία ανάκλασης από το αντικείμενο. Στην περίπτωση μας $\theta \approx 0$. Θέτοντας $\Gamma = (2\pi / \lambda) (1 + \cos \theta)$ και $\tau = 2m\pi/\omega$, όπου m είναι ακέραιος, και ολοκληρώνοντας η εξίσωση (2) γίνεται [35-37]:

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

όπου J_0 είναι η συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης πρώτου είδους. Σε αυτό το στάδιο σημειώνεται πως λόγω της χρονικής ολοκλήρωσης στην (3.2) χάνεται η πληροφορία για την φάση της δόνησης (ϕ_0). Καθώς η ταλάντωση του αντικειμένου συνεχίζεται, υποθέτουμε ότι το πλάτος της ταλάντωσης αλλάζει, λόγω αστάθμητων παραγόντων, και από A μετατρέπεται σε $A + \Delta A$. Τότε μια δεύτερη εικόνα καταγράφεται, της οποίας η ένταση φωτός μπορεί παρομοίως να εκφραστεί, μετά από ανάπτυγμα Taylor, ως [37]:

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

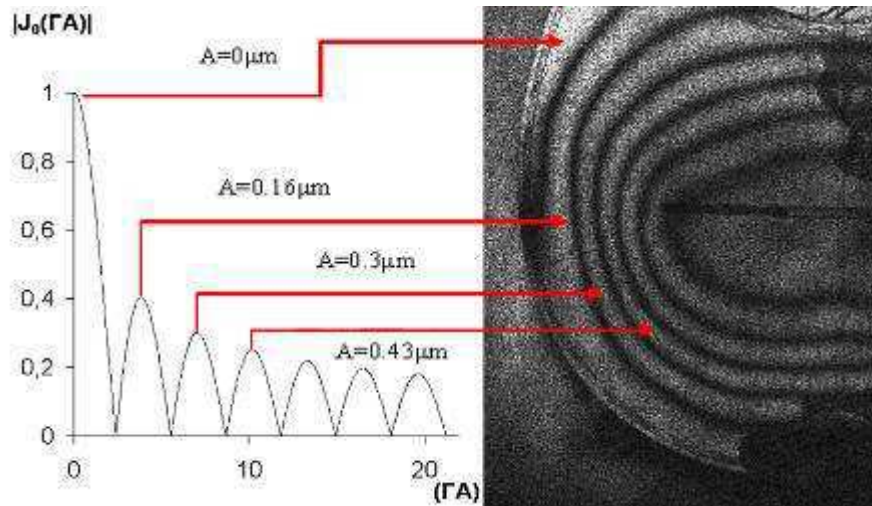
Οι διαδοχικές εικόνες I_1 και I_2 αφαιρούνται μέσω κατάλληλου λογισμικού που αναπτύχθηκε πλήρως στο εργαστήριο, και το αποτέλεσμα εκφράζεται με την σχέση:

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

Η εικόνα $I(x,y)$ καταγράφεται συνεχώς καθώς αλλάζει η συχνότητα της διέγερσης. Σε κάθε συχνότητα καταγράφονται αρκετές εικόνες με κυμαινόμενους χρόνους του κλείστρου από 200ms έως 1sec ανάλογα με τον τρόπο που εμφανίζονται οι συντονισμοί. Όταν η συχνότητα διέγερσης από το ηχείο πλησιάζει στην συχνότητα του εκάστοτε συντονισμού το όργανο αρχίζει να δονείται με σταδιακά αυξανόμενο πλάτος και εμφανίζονται κροσσοί, με τον αριθμό τους να μεγιστοποιείται ακριβώς στη συχνότητα συντονισμού όπου υπάρχει και το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης της

δονούμενης επιφάνειας. Με αυτό τον τρόπο εντοπίστηκαν και οι συχνότητες συντονισμού αλλά και η κατανομή των τρόπων ταλάντωσης των ελεύθερων καπακιών και των οργάνων της μελέτης.

Από την εξίσωση (3.5) παρατηρείται πως το χρονικά ολοκληρωμένο συμβολόγραμμα, I , που προκύπτει από την αφαίρεση των διαδοχικών εικόνων διαμορφώνεται από την συνάρτηση Bessel $|J_0(\Gamma A)|$. Οι φωτεινοί κροσσοί αντιστοιχούν στα μέγιστα της συνάρτησης $|J_0(\Gamma A)|$, με τον φωτεινότερο κροσσό συμβολής να αντιστοιχεί σε δεσμό πλάτους ταλάντωσης ($A=0$) και τους υπόλοιπους σε βαθμιαία αυξανόμενα πλάτη ταλάντωσης.



Εικόνα 3.5: Αντιστοιχία μεγίστων της συνάρτησης Bessel $|J_0(\Gamma A)|$ με την κατανομή του πλάτους ταλάντωσης που μετρήθηκε με την τεχνική ESPI στο καπάκι ενός μπουζουκιού.

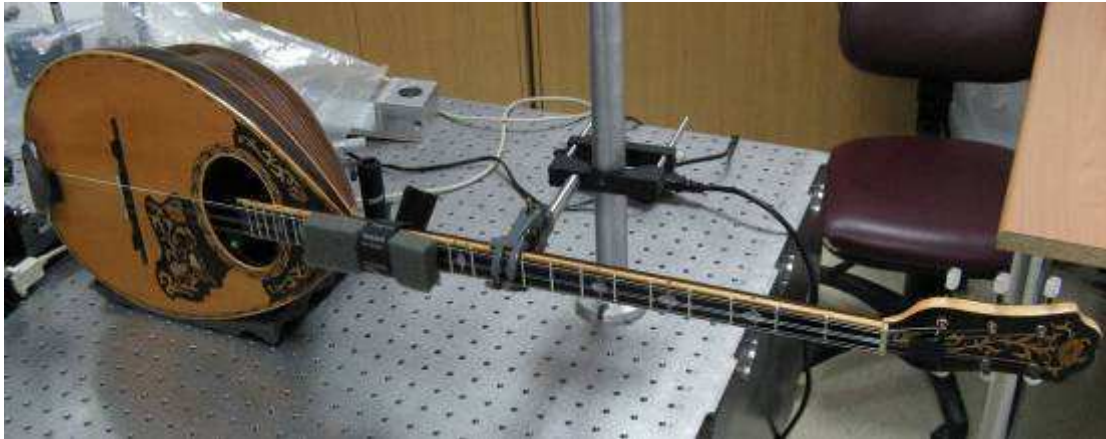
3.2.1.4 Τρόπος εφαρμογής στα πειράματα της μελέτης

Μέθοδος στήριξης

Η χρήση της ESPI όπως κάθε οπτικής μεθόδου προϋποθέτει πως τα όργανα ή τμήματα που εξετάζονται θα πρέπει να είναι ακίνητα κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων. Στην συγκεκριμένη μελέτη η επιλογή της μεθόδου στήριξης πραγματοποιείται με βάση δύο κριτήρια: α) να προσομοιώνει όσο το δυνατό την φυσική θέση του οργάνου κατά την εκτέλεση και β) να αποφευχθεί η εξωγενής εφαρμογή δυνάμεων πάνω στις δονούμενες επιφάνειες.

Στην εικόνα που ακολουθεί (3.6) φαίνεται η μέθοδος στήριξης του τρίχορδου μπουζουκιού. Διακρίνεται πως το όργανο διατηρείται σταθερό από μια ειδική μεταλλική δαγκάνα που τοποθετείται στο μπράτσο κοντά στο 12ο τάστο. Στο εσωτερικό της έχει απορροφητικό υλικό ώστε να αποτρέψει την σχετική ταλάντωση του οργάνου με το σύστημα στήριξης αλλά και να μην

φθαρεί το μπράτσο των οργάνων. Το σώμα του οργάνου στηρίζεται σε απορροφητικό υλικό όπως στο πόδι του οργανοπαίκτη. Τέλος, η ταλάντωση των χορδών μονώνεται με χρήση απορροφητικού



Εικόνα 3.6: στήριξη των οργάνων κατά την μέθοδο της ESPI στο εργαστήριο ακουστικής και οπτικής τεχνολογίας του Τμήματος Μ.Τ.Α του Τ.Ε.Ι. Κρήτης (Ρέθυμνο).

υλικού που εφαρμόζεται τόσο στο ελεύθερο τμήμα από την γέφυρα ως τον πάνω καβαλάρη όσο και στο τμήμα από τον χορδοδέτη έως την γέφυρα. Τα όργανα κουρδίζονται πριν την εφαρμογή της μεθόδου έτσι ώστε να ασκούνται στα καπάκια δυνάμεις αντίστοιχες με αυτές που ασκούνται κατά την διαδικασία της εκτέλεσης.

Μέθοδος διέγερσης

Η διέγερση των οργάνων και των καπακιών πραγματοποιείται με χρήση monitor ηχείου (Genelec 8040A) που ακτινοβολεί σε απόσταση 40cm από τα όργανα και τα καπάκια που μελετώνται. Το σήμα της διέγερσης είναι ημιτονικό με εύρος από τα 80Hz έως τα 2000Hz.

Η επιλογή του συγκεκριμένου τρόπου διέγερσης έχει συγκεκριμένα προτερήματα και μειονεκτήματα έναντι του βασικού «ανταγωνιστή» του που είναι η διέγερση με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο. Το ηχείο που χρησιμοποιείται έχει (βάση προδιαγραφών) περίπου γραμμική συχνοτική απόκριση τουλάχιστον στο εξεταζόμενο εύρος συχνοτήτων. Ωστόσο, τα στάσιμα κύματα που δημιουργούνται στο εργαστήριο μπορεί να επηρεάσουν την ακουστική ισχύ που προσπίπτει στις υπό μελέτη επιφάνειες οδηγώντας τις σε ταλάντωση. Από την άλλη μεριά η διέγερση με ηχείο είναι μη καταστρεπτική υπό την έννοια του ότι δεν προστίθεται επιπλέον βάρος στα όργανα που μπορεί να παραμορφώσει την δονητική τους συμπεριφορά και για τον λόγο αυτό είναι η κατεξοχήν μέθοδος διέγερσης που χρησιμοποιείται σε αντίστοιχες μεθόδους [41].

Αντίθετα, ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος δεν επηρεάζεται από την δονητική συμπεριφορά του χώρου του εργαστηρίου αλλά εξαρτάται άμεσα από την δονητική συμπεριφορά των οργάνων.

Συγκεκριμένα, ισχύει μια σχέση αντίστοιχη με αυτήν που παρουσιάστηκε στην διέγερση της χορδής που περιγράφηκε στο κεφάλαιο της θεωρίας: Όταν η θέση του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου αντιστοιχεί σε κάποιο δεσμό ταλάντωσης ενός τρόπου δόνησης τότε ο αντίστοιχος τρόπος δεν θα διεγερθεί [17]. Ισχύει βέβαια και το αντίστροφο όπου κάποιοι τρόποι ταλάντωσης έχουν μέγιστα στην θέση διέγερσης με αποτέλεσμα να διεγείρονται με μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης. Ως αποτέλεσμα, υπερεκτιμάται η συμβολή τους στην διαμόρφωση της δονητικής συμπεριφοράς των οργάνων όταν αντιπαρατίθενται με άλλους τρόπους δόνησης (πιθανά ισχυρότερους) τα μέγιστα των οποίων βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις από την θέση διέγερσης. Επιπροσθέτως, το βάρος του κρυστάλλου επηρεάζει τόσο τα χαρακτηριστικά των συντονισμών (πλάτος, εύρος, συχνότητα) όσο το σχηματισμό των τρόπων δόνησης αφού προσθέτοντας μάζα πάνω στις επιφάνειες μεταβάλλονται και οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

3.2.2 Απόκριση σε στιγμιαία διέγερση

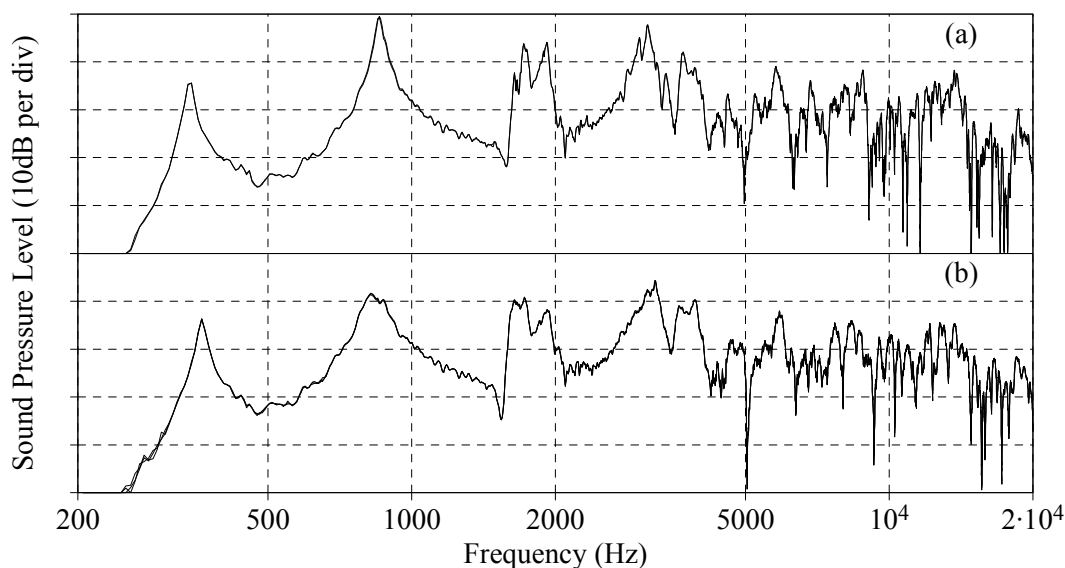
Μαζί με τους βασικούς τρόπους δόνησης και τα ηχητικά χαρακτηριστικά των οργάνων στην παρούσα εργασία μελετάται και η απόκρισή τους σε στιγμιαία διέγερση με στόχο την καταγραφή της ηχητικής εκπομπής των τρόπων δόνησης και την διασταύρωσή τους με τα χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου ήχου.

3.2.2.1 Διέγερση με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο

Σε αυτήν την σειρά μετρήσεων τα όργανα τοποθετούνται στο έδαφος πάνω σε απορροφητικό υλικό. Πάνω στα όργανα τοποθετείται πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος (της εταιρείας Pi) σε σημείο κοντά στην γέφυρα αφού κρίθηκε αδύνατη η τοποθέτηση του πάνω σε αυτήν λόγω των πολύ μικρών διαστάσεων. Στην συνέχεια το όργανο τίθεται σε ταλάντωση μέσω του αισθητήρα με ημιτονικό σήμα που καλύπτει το ακουστικό εύρος 20 – 20000Hz (sweep tones). Η απόκριση των οργάνων στο σήμα διέγερσης καταγράφεται από ένα μικρόφωνο που τοποθετείται σε απόσταση 0,5m μπροστά από τα όργανα με διεύθυνση προς το έδαφος. Επιπροσθέτως, καταγράφηκε ένας μικρότερος αριθμός αποκρίσεων στις θέσεις ηχογράφησης των οργάνων (θέσεις 1-2) όμως το όργανο στηρίχθηκε πάνω στο κάθισμα του οργανοπαίκτη και δεν κρατήθηκε από τον ίδιο όπως στις πραγματικές συνθήκες εκτέλεσης.

Το σήμα που καταγράφεται από τα μικρόφωνα διάρκειας 120s υπόκειται σε ειδική επεξεργασία [42] μέσω του λογισμικού dB-Fa32 από όπου προκύπτει η απόκριση στιγμιαίας διέγερσης (impulse response) των οργάνων στις συγκεκριμένες θέσεις διέγερσης. Από την απόκριση στιγμιαίας διέγερσης εξάγεται και η συνάρτηση μεταφοράς των οργάνων που είναι ο μετασχηματισμός στο

πεδίο της συχνότητας. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται 5 τυπικές συναρτήσεις μεταφοράς για τον μπαγλαμά 2 μεταβάλλοντας τον όγκο του οργάνου κατά 60ml.



Εικόνα 3.7: Συνάρτηση μεταφοράς του μπαγλαμά 2 όταν οδηγείται στο κέντρο χωρίς χορδές και γέφυρα με θέση λήψης στα 0,5m: δύο επικαλυπτόμενες συναρτήσεις μεταφοράς (a), τρεις επικαλυπτόμενες συναρτήσεις μεταφοράς όταν στο αντηχείο προστίθεται πλαστελίνη όγκου 60ml (b).

Παρατηρείται από το διάγραμμα πως η μέθοδος με μηχανική διέγερση παρουσιάζει εκπληκτική ακρίβεια κατά την επανάληψη των μετρήσεων και συγκεκριμένα οι μέγιστες διαφορές που παρατηρούνται κατά την επανάληψη της μέτρησης είναι της τάξης ± 1 dB στο εύρος 100Hz-20000Hz, σφάλμα που θεωρείται αμελητέο σε τέτοιου είδους μετρήσεις. Έτσι στην εικόνα 3.7 μπορεί να παρατηρούνται 2 συναρτήσεις μεταφοράς με «γυμνό» μάτι αλλά στην πραγματικότητα είναι 5 και οι μέγιστες διαφορές παρατηρούνται στα πολύ χαμηλά και στα πολύ υψηλά στοιχεία του φάσματος. Σημειώνεται πως τα όργανα του μπαγλαμά δεν αποκρίνονται σε χαμηλές συχνότητες και για λόγους ευκρίνειας η σχεδίαση αρχίζει από τα 200Hz.

Παρά το πλεονέκτημα της μεγάλης ακρίβειας υπάρχουν και αρκετά χαρακτηριστικά της μεθόδου που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων όπως:

1. Η τοποθέτηση μάζας πάνω στα καπάκια των οργάνων μπορεί να διαταράξει τα χαρακτηριστικά κάποιων τρόπων δόνησης όπως το πλάτος ταλάντωσης, την κεντρική συχνότητα, το εύρος ταλάντωσης.
2. Η απόκριση συχνότητας είναι ισχυρά εξαρτώμενη από την θέση τοποθέτησης του διεγέρτη. Μικρές μεταβολές στην θέση τοποθέτησης μπορεί να μεταβάλλουν δραστικά τα διαγράμματα της συνάρτησης μεταφοράς δύναμης/ακουστικής πίεσης. Ισχύει ότι

αναφέρθηκε στην προηγούμενο παράγραφο σχετικά με την εναλλακτική διέγερση των οργάνων (Βλέπε 3.2.2.2).

3. Επίσης, σε τέτοιου είδους μετρήσεις πρέπει πάντα να υπολογίζεται η συχνοτική απόκριση του κρυστάλλου, η οποία όμως θεωρείται γραμμική στο εύρος που γίνεται εφαρμογή της μεθόδου και κυρίως μετά τα 130Hz και έως τα 8KHz με βάση τις χαρακτηριστικές καμπύλες που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν τον κρύσταλλο που λειτουργεί ως αισθητήρας. Στην παρούσα εργασία που χρησιμοποιήθηκε με στόχο να διεγείρει τα όργανα, δεν είναι γνωστό το κατά πόσο είναι δυνατό να παράγει σταθερή δύναμη σε ολόκληρο το ακουστικό εύρος. Παρόλα αυτά φαίνεται να συμφωνεί με τα χαρακτηριστικά των τρόπων δόνησης δίδοντας χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά τους.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι φυσικές συνέπειες της διάταξης και δεν πρέπει να εκλαμβάνονται ως αδυναμίες του συστήματος. Αν το ζητούμενο της μεθόδου είναι η απόκριση του οργάνου στις δυνάμεις της χορδής τότε είναι προφανές πως η παραπάνω μέθοδος δεν αποδίδει δεδομένου πως η τοποθέτηση έγινε πάνω στα καπάκια ενώ θα έπρεπε να γίνει πάνω στην γέφυρα και να διεγείρει τα όργανα και για τις τρεις διευθύνσεις στις οποίες είναι ελεύθερη να ταλαντώνεται η χορδή (x,y,z) [43].

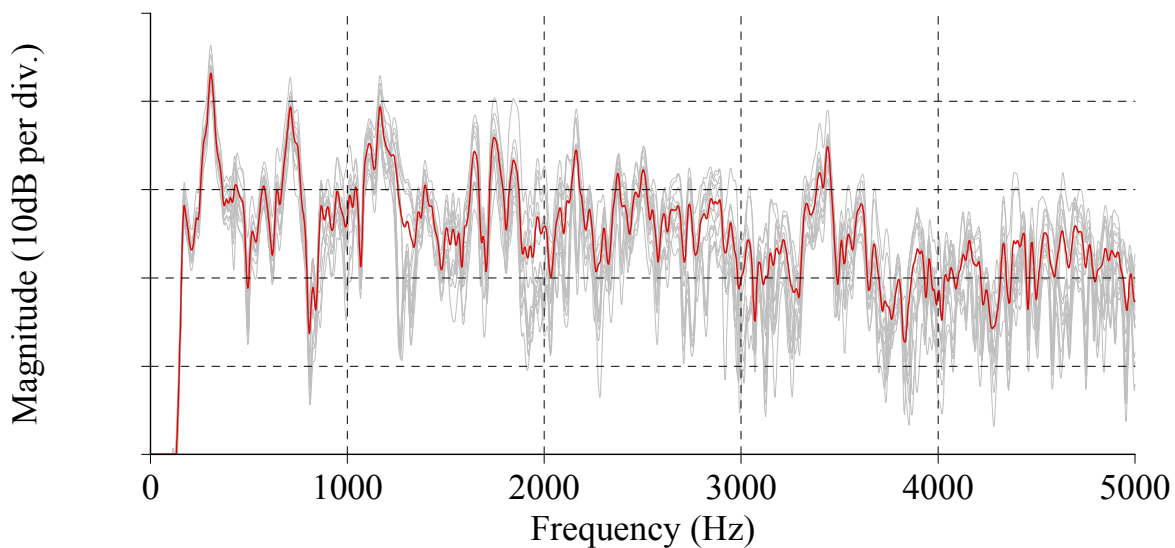
3.2.2.2 Διέγερση με κρούση στην γέφυρα των οργάνων

Για την καλύτερη παρατήρηση του τρόπου με τον οποίο αποκρίνονται τα όργανα όταν διεγείρονται στιγμιαία στο σημείο της γέφυρας (στην θέση που οδηγούνται σε ταλάντωση από τις χορδές) πραγματοποιείται λήψη της ηχητικής απόκρισης των μουσικών οργάνων με κρούση μεταλλικού αιχμηρού σφυριού με διάμετρο άκρου 0,5 mm. Η κρούση στην γέφυρα έχει αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έναντι της μηχανικής διέγερσης. Το βασικότερο πλεονέκτημα όπως αναφέρθηκε αφορά στο ότι η διέγερση του οργάνου πραγματοποιείται στις περιοχές στις οποίες οι ίδιες οι χορδές οδηγούν το όργανο. Συνεπώς, τα σήματα που καταγράφονται θα έχουν μεγαλύτερο βαθμό συσχέτισης με τα χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου ήχου, εφόσον βέβαια και η διέγερση από τον οργανοπαίκτη έχει την ίδια (κάθετη προς το καπάκι) διεύθυνση. Ωστόσο, το βασικότερο μειονέκτημα αφορά στο ότι η διέγερση με ανθρώπινο χέρι είναι πρακτικά αδύνατο να είναι «στιγμιαία» και συνεπώς το σήμα διέγερσης θα είναι συχνοτικά εξαρτώμενο με την διάρκεια του παλμού της εκάστοτε διέγερσης. Προκύπτει λοιπόν πως η διέγερση με κρούση πιθανά να παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές κατά την επανάληψη της διαδικασίας των μετρήσεων. Το ότι ο αισθητήρας ανάδρασης του κρουστικού σφυριού δεν λειτουργεί καθιστά αδύνατη την ακριβή εκτίμηση της συμπεριφοράς του οργάνου στις υψηλότερες συχνότητες. Ένας ακόμη σημαντικός

παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι η πιθανή ανάδραση του σφυριού στο σημείο της γέφυρας που μπορεί να δημιουργήσει ακυρώσεις πλάτους στο φάσμα της απόκρισης αντίστοιχες με αυτές που δημιουργούνται από τα φίλτρα τύπου χτένας.

Παρά τους διαφορετικούς παράγοντες που μπορεί να εισάγουν θόρυβο στις μετρήσεις η μέθοδος χρησιμοποιείται καθώς συναντάται σε αξιόλογα διεθνή άρθρα για την μελέτη μουσικών οργάνων [31] έχει αποδεδειγμένα αποδεκτά αποτελέσματα στην περιγραφή της απόκρισης των οργάνων και χρησιμοποιείται για την σύνθεση του ήχου μουσικών οργάνων μέσω τεχνικών της φυσικής μοντελοποίησης [44]. Ωστόσο, για τον έλεγχο των παραγόντων που μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις η κρουστική απόκριση σε κάθε θέση διέγερσης πραγματοποιείται περισσότερες από 50 φορές για κάθε θέση διέγερσης της γέφυρας στα όργανα που πραγματοποιείται. Οι πιο αντιπροσωπευτικές αποκρίσεις επιλέγονται με βάση τον λογαριθμικό μέσο όρο των διαφορετικών παλμών. Οι θέσεις λήψης των μικροφώνων είναι οι αντίστοιχες με την ηχογράφιση (θέσεις 1-2) ενώ κατά την διάρκεια της λήψης τα όργανα διατηρούνται σταθερά στα χέρια του οργανοπαίκτη ώστε οι συνθήκες στήριξης να είναι κοινές με αυτές της πραγματικής εκτέλεσης.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται 15 διαφορετικές συναρτήσεις μεταφοράς που προκύπτουν από τις αντίστοιχες καταγεγραμμένες κρουστικές αποκρίσεις των οργάνων.



Εικόνα 3.8: Κρουστική απόκριση του τρίχορδου μπουζουκιού 1 στην θέση 2 με κάθετη φορά προς το καπάκι, 15 επικαλυπτόμενες κρούσεις (γκρι), η συνάρτηση που χρησιμοποιείται ως αντιπροσωπευτική για το κάθε όργανο (κόκκινο).

Παρατηρείται από την εικόνα 3.8 πως οι συναρτήσεις μεταφοράς παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές από μέτρηση σε μέτρηση και σε αυτό συμβάλλουν οι παράγοντες που προαναφέρθηκαν. Ωστόσο, είναι ξεκάθαρη η τάση της ενέργειας να συγκεντρώνεται γύρω από τις περιοχές που

υπάρχουν ισχυροί συντονισμοί του οργάνου που είναι και το ζητούμενο της εφαρμογής της στην παρούσα εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΡΙΧΟΡΔΟ ΜΠΟΥΖΟΥΚΙ (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ)

Για λόγους απλοποίησης της ανάγνωσης τα πειραματικά αποτελέσματα χωρίζονται σε τρία διαφορετικά κεφάλαια. Ωστόσο, η μέθοδος συγγραφής παρουσιάζει μια «συνέχεια» λόγω του ότι τα χαρακτηριστικά που αναλύονται είναι κοινά σε όλα τα όργανα. Έτσι, η επανάληψη βασικών χαρακτηριστικών που εντοπίζονται αρχικά στο τρίχορδο μπουζούκι και ισχύουν και στα υπόλοιπα όργανα της οικογένειας αποφεύγεται.

Σημειώνεται επίσης σχετικά με την παρουσίαση πως ο όρος «τρόποι δόνησης του καπακιού» δεν αναφέρεται σε ελεύθερα καπάκια αλλά προτιμάται προς χάριν συντομίας από όρους όπως «τρόποι δόνησης του οργάνου» ή το επιστημονικά ορθότερο «οι τρόποι δόνησης που παρατηρούνται στο καπάκι και είναι αποτέλεσμα της σύζευξης όλων των τμημάτων που απαρτίζουν το όργανο».

Επίσης, λόγω του ότι στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν 2 θέσεις λήψης του ηχητικού υλικού και των αποκρίσεων αν και τις περισσότερες φορές σημειώνεται η θέση λήψης, υπάρχουν και περιπτώσεις όπου ίσως να μην αναφέρεται και όλες αυτές αντιστοιχούν στην θέση 1 (1m μπροστά από τα όργανα).

Ακόμα, λόγω του ότι η προσέγγιση που ακολουθείται στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται για πρώτη φορά στα συγκεκριμένα όργανα κρίθηκε επιτακτική, όπως έχει αναφερθεί, η σύγκριση τουλάχιστον δύο οργάνων σε κάθε ομάδα εκτός του τετράχορδου μπουζουκιού το οποίο δεν φαίνεται να διαφοροποιείται δραματικά στην γεωμετρική του δομή ώστε να εμφανιστούν μεταβολές αντίστοιχες με αυτές που παρατηρούνται ανάμεσα στα τρίχορδα μπουζούκια και τα όργανα του τζουρά για παράδειγμα. Έτσι, επαναλαμβάνεται πως ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν 2 όργανα σε κάθε ομάδα (εκτός από το τετράχορδο μπουζούκι) δεν είναι για να συγκριθούν τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους αλλά για να γίνει διασταύρωση των αποτελεσμάτων με στόχο την παρατήρηση των πιθανών μεταβολών στα χαρακτηριστικά τους.

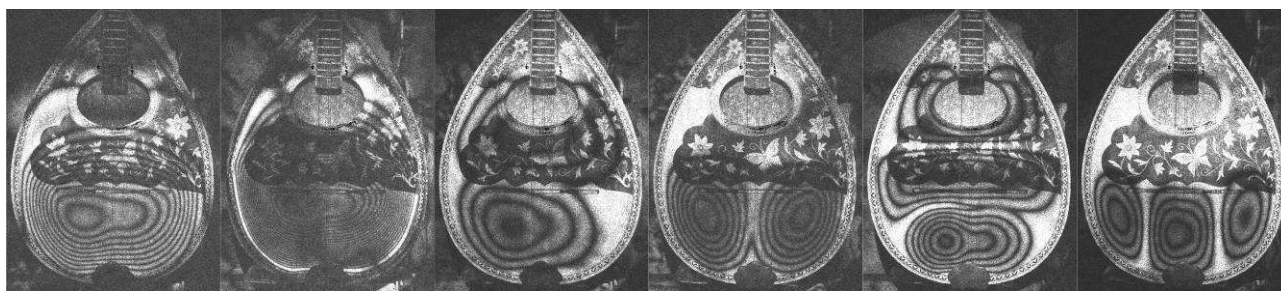
4.1 Δονητικά χαρακτηριστικά

Στην παράγραφο που ακολουθεί αναλύονται τα δονητικά χαρακτηριστικά του τρίχορδου μπουζουκιού όπως προκύπτουν από τα αποτελέσματα των μεθόδων που εφαρμόστηκαν. Η περιγραφή πραγματοποιείται αρχικά στο πρώτο τρίχορδο μπουζούκι και εν συνεχεία στο δεύτερο διασταυρώνοντας τα αποτελέσματα και καταλήγοντας στον προσδιορισμό των βασικότερων δονητικών χαρακτηριστικών του οργάνου.

4.1.1 Τρίχορδο μπουζούκι 1

Τρόποι δόνησης

Οι βασικότεροι τρόποι δόνησης του τρίχορδου μπουζουκιού 1 με βάση τα σχετικά πλάτη ταλάντωσης με τα οποία εντοπίστηκαν είναι 6. Ουσιαστικά είναι τρόποι δόνησης με 1,2 και 3 εστίες ταλάντωσης και εμφανίζονται έως τα 750Hz περίπου. Ωστόσο, το μπουζούκι παρουσιάζει σύνθετη δονητική συμπεριφορά που περιγράφεται στην συνέχεια και περισσότεροι από 20 τρόποι εντοπίστηκαν στο εξεταζόμενο εύρος (60Hz-2000Hz).



(1,1)_H

(1,1)_T

(1,2)

(2,1)

(1,3)

(3,1)

Εικόνα 4.1: Οι βασικότεροι τρόποι δόνησης του τρίχορδου μπουζουκιού 1

Διεγείροντας το τρίχορδο μπουζούκι 1 από την πολύ χαμηλή περιοχή των 60Hz δεν παρατηρείται σημαντική δραστηριότητα στο καπάκι μέχρι τα 148Hz περίπου όπου το πλάτος αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά. Ο πρώτος ισχυρός συντονισμός που εντοπίζεται είναι αυτός του αέρινου όγκου που βρίσκεται στα 161Hz. Ο συντονισμός αυτός εμφανίζεται στο καπάκι με την μορφή (1,1)_H ωστόσο σημειώνεται πως είναι ο αέρας που ταλαντώνεται δια της οπής που διακατέχει καίριο ρόλο στην δόνηση και λιγότερο η ταλάντωση του καπακιού.

Καθώς η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται υπάρχει ομαλή αύξηση και μείωση του πλάτους ταλάντωσης γύρω από την συχνότητα των 260Hz ενώ η κατανομή του πλάτους δεν αλλάζει σχήμα. Στην συνέχεια εμφανίζεται ο (1,1)_T του τρίχορδου μπουζουκιού που βρίσκεται στα 290Hz. Ο (1,1)_T είναι με μεγάλη διαφορά ο ισχυρότερος τρόπος δόνησης του μπουζουκιού και διεγείρεται ακόμα και όταν το ηχείο εκπέμπει με πολύ μικρή ένταση. Σημειώνεται επίσης ότι συνεχίζει να δονείται με αξιοσημείωτο πλάτος (σε σχέση με τους υπόλοιπους) έως και τα 330Hz.

Στην συνέχεια υπάρχει σταδιακή μείωση του πλάτους ταλάντωσης έως τα 360Hz περίπου όπου αρχίζει να δημιουργείται ο τρόπος (1,2) που έχει μέγιστο στα 400Hz. Εδώ το καπάκι «χωρίζεται» σε δύο περιοχές που ταλαντώνονται με μεγάλο πλάτος δημιουργώντας δεσμό ταλάντωσης με διεύθυνση παράλληλη ως προς την γέφυρα και λίγο πάνω από αυτήν. Η εμφάνιση πλάτους ταλάντωσης γύρω από την περιοχή της οπής δείχνει πως η αέρινη μάζα θα μπορούσε να συμβάλει

ενεργά στον τρόπο με τον οποίο το όργανο εκπέμπει ηχητική ενέργεια γύρω από την συγκεκριμένη συχνοτική περιοχή.

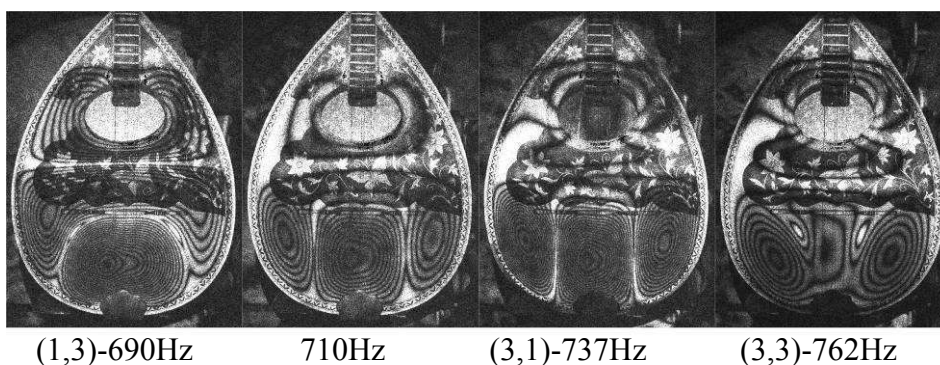
Ο επόμενος τρόπος δόνησης (2,1) εμφανίζεται σε πολύ κοντινή συχνότητα στα 450Hz όπου το κάτω μέρος του καπακιού χωρίζεται σε 2 περιοχές δημιουργώντας δεσμό που περνά κάθετα στην γέφυρα.

Στις συχνότητες 470Hz με 600Hz υπάρχει πολύ χαμηλή δραστηριότητα πάνω στο καπάκι γύρω από έναν τρόπο της μορφής (1,3). Κοντά στα 650Hz το πλάτος ταλάντωσης αρχίζει να αυξάνει σταδιακά και το μέγιστο του (1,3) εντοπίζεται στα 690Hz. Σε αυτόν τον τρόπο δόνηση του καπάκι χωρίζεται σε τρεις περιοχές και όπως φαίνεται και από την εικόνα 1 το μέγιστο πλάτος συγκεντρώνεται στο χαμηλότερο τμήμα του οργάνου (από την γέφυρα έως τον χορδοδέτη).

Και ενώ παρατηρείται μια μικρή μείωση στο πλάτος ταλάντωσης ο (1,3) μετασχηματίζεται σε έναν τρόπο της μορφής (3,1) στα 710Hz που έχει τρεις εστίες ταλάντωσης στο κάτω τμήμα του οργάνου σχηματίζοντας δύο δεσμούς που περνούν κάθετα στην γέφυρα. Ο (3,1) όμως δεν είναι ο ισχυρότερος τρόπος δόνησης με 3 εστίες στο κάτω μέρος του καπακιού καθώς το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης του εντοπίζεται στα 737Hz. Η κατανομή του πλάτους ταλάντωσης της μορφής (3,1) διατηρείται στο μπουζούκι έως και τα 820Hz με σταδιακά μειούμενο πλάτος στην κεντρική εστία και μικρή διέγερση στο κέντρο του οργάνου και πάνω από την οπή έτσι ώστε μπορεί να χαρακτηριστεί ως (3,3) στα 762Hz.

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό που εντοπίζεται στους βασικότερους τρόπους δόνησης του τρίχορδου μπουζουκιού είναι πως τόσο οι τρόποι με δύο εστίες δόνησης (1,2) και (2,1) όσο και οι αντίστοιχοι με τρεις (1,3) και (3,1) εμφανίζονται σε πολύ κοντινές συχνότητες με αποτέλεσμα να είναι πολύ πιθανή η εμφάνιση φαινομένων επικάλυψης. Αν κάποιος υπολογίσει το πόσο κοντά σε συχνότητα βρίσκονται οι τρόποι αυτοί σε σχέση με τα μουσικά διαστήματα μπορεί να δει πως οι τρόποι (1,2) και (2,1) απέχουν κατά ένα διάστημα ενός τόνου ενώ οι (1,3) και (3,1) λίγο περισσότερο από 1 ημιτόνιο.

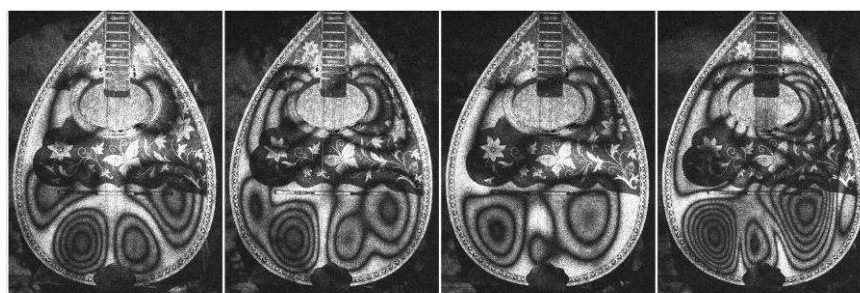
Στην εικόνα που ακολουθεί διακρίνεται η μετατροπή του τρόπου (1,3) στα 690Hz στον (3,1) στα 710Hz και στην συνέχεια ο (3,1) στα 737Hz το πλάτος του οποίου φθίνει στα 762Hz.



Εικόνα 4.2: Τρόποι δόνησης με τρεις εστίες δόνησης

Σχετικά με τις ονομασίες που δίδονται από τον γράφοντα στους τρόπους δόνησης θα μπορούσε κάποιος διακρίνοντας στην εικόνα την κατανομή του πλάτους ταλάντωσης γύρω από την οπή του οργάνου να χαρακτηρίσει τον τρόπο της 2^{ης} εικόνας ως (3,2) αφού εμφανίζει μικρή διέγερση γύρω από την οπή. Αντίστοιχα ο (3,1) που όπως φαίνεται παρουσιάζει 3 περιοχές ταλάντωσης κατά μήκος του καπακιού θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και αυτός ως (3,3) όπως χαρακτηρίζεται ο τρόπος δόνησης της 4^{ης} εικόνας. Η ονομασία όμως δίδεται με βάση τα σχετικά πλάτη, από όπου φαίνεται πως μόνο στον τρόπο δόνησης (3,3) είναι σχετικά κοντά. Ειδικά όμως στον (3,1) η διέγερση στο πάνω μέρος του καπακιού γύρω από την οπή θεωρείται αμελητέα σε σχέση με τις 3 εστίες δόνησης στο κάτω τμήμα του.

Οι βασικοί τρόποι που παρουσιάστηκαν παραπάνω διεγείρονται εύκολα κατά την εφαρμογή της μεθόδου και τα πλάτη που εμφανίζονται στις δύο εικόνες είναι σχετικά (διεγέρθηκαν με σταθερή ένταση εκπομπής στο ηχείο). Ωστόσο, μετά τα 800Hz το συνολικό πλάτος ταλάντωσης μειώνεται αισθητά και πολλοί από τους υψηλότερους τρόπους δεν διεγείρονται καθόλου με αποτέλεσμα να αυξηθεί η ένταση του ηχείου κατά 12dB*. Έτσι, από τα 800 έως τα 1000Hz σχηματίζονται διαδοχικά οι τρόποι δόνησης (2,3) στα 860Hz, (4,2)₁ στα 890Hz, και (4,2)₂ στα 960Hz που όπως φαίνεται στην εικόνα αρχίζει να δημιουργείται από τα 925Hz με την μορφή (2,2). Ωστόσο, αυτός ο τελευταίος τρόπος δεν θα ήταν λάθος αν χαρακτηριζόταν ως (2,2) του τρίχορδου μπουζουκιού λόγω του πολύ μικρού πλάτους ταλάντωσης που έχουν οι δύο από τις τέσσερις εστίες δόνησης στο κάτω μέρος του καπακιού.

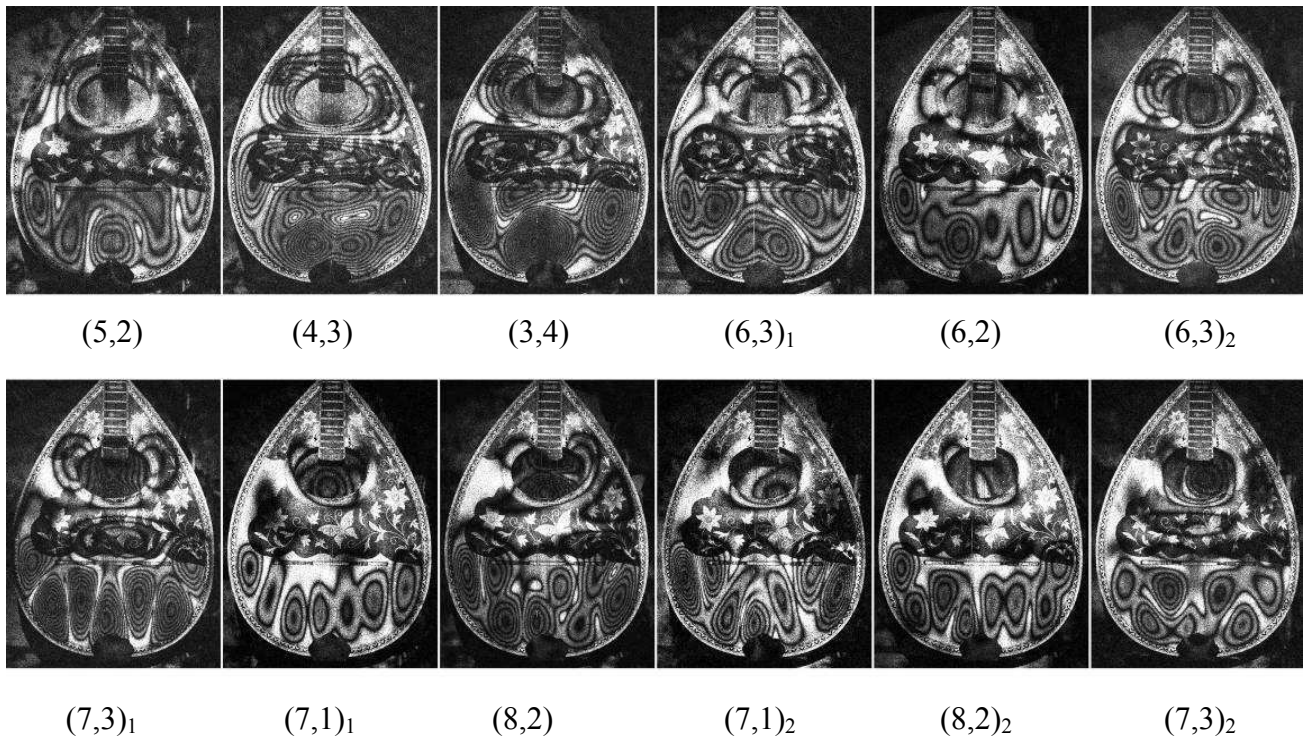


(2,3) (4,2) 925Hz (4,2)₂

Εικόνα 4.3: Τρόποι δόνησης στο εύρος 800-1000Hz

* Η αναφορά στις εντάσεις προκύπτει από την σχετική διαβάθμιση της κάρτας ήχου καθώς δεν τοποθετήθηκε κάποιο μικρόφωνο δίπλα στο όργανο που να καταγράφει την στάθμη ηχητικής πίεσης. Κάθε τρόπος δόνησης καταγράφηκε σε τουλάχιστον 2 διαφορετικές εντάσεις για να μπορούν να εξαχθούν οι σχετικές τιμές πλάτους. Συνολικά το αρχείο περιλαμβάνει για τα 2 μπουζούκια 140 φωτογραφίες τρόπων δόνησης και ενδιάμεσων καταστάσεων, ωστόσο στην παρούσα μελέτη λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων παρουσιάζονται κυρίως οι βασικότεροι τρόποι δόνησης (αυτοί με το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης) που συμβάλλουν ενεργά στην διαμόρφωση των ηχητικών χαρακτηριστικών των οργάνων.

Συνεχίζοντας την ανάλυση έως τα 2KHz σημειώνεται επίσης ένας μεγάλος αριθμός τρόπων δόνησης όπου στο κάτω τμήμα του καπακιού σχηματίζονται από 5 έως και 8 εστίες ταλάντωσης που φαίνονται στην εικόνα 4.4 που ακολουθεί και περιγράφονται στην συνέχεια.



Εικόνα 4.4: Τρόποι δόνησης στο εύρος 1000-2000Hz

Πάνω από τα 1000Hz γενικά παρατηρείται μικρό πλάτος ταλάντωσης που σταδιακά αυξάνεται έως τα 1020Hz όπου σχηματίζεται ο τρόπος (5,2). Πέντε εστίες ταλάντωσης σχηματίζονται με διαφορετικά πλάτη στο κάτω μέρος του καπακιού με μικρή διέγερση γύρω από την οπή και την γέφυρα. Στην συνέχεια όμως η μια εστία ταλάντωσης μετατοπίζεται σταδιακά προς το την γέφυρα του οργάνου και ταυτόχρονα υπάρχει πολύ μεγάλη αύξηση του πλάτους ταλάντωσης που κορυφώνεται στα 1070Hz. Αυτός ο τρόπος δόνησης ουσιαστικά έχει 4 εστίες ταλάντωσης κατά πλάτος του καπακιού και 3 κατά μήκος (συμπεριλαμβανομένης και της ταλάντωσης γύρω από την οπή) και ορίζεται ως ο (4,3). Ωστόσο είναι εμφανές πως η διάταξη των περιοχών ταλάντωσης δεν είναι δυνατό να αποδοθεί εξ ολοκλήρου από το σύστημα των 2 ακεραίων. Χωρίς να μειώνεται το πλάτος ταλάντωσης οι δύο χαμηλότερες περιοχές ταλάντωσης (πάνω από τον χορδοδέτη) μετασχηματίζονται σε μια φθάνοντας σε έναν επίσης ισχυρό τρόπο ταλάντωσης που συμβαίνει στα 1160Hz και είναι ο (3,4) του τρίχορδου μπουζουκιού. Αυτοί οι δύο τρόποι δόνησης [(4,3) και (3,4)] είναι και οι ισχυρότεροι που εντοπίστηκαν στο εύρος 1-2KHz αλλά και οι μοναδικοί όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4 που εμφανίζουν αξιόλογο πλάτος γύρω από την γέφυρα του οργάνου.

Καθώς η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται υπάρχει ομαλή μείωση του πλάτους ταλάντωσης ενώ σχηματίζεται ο τρόπος (6,3) στα 1220Hz που εξελίσσεται στον (6,2) στα 1285Hz. Το όργανο συνεχίζει να δονείται με 6 εστίες ταλάντωσης στην χαμηλότερη περιοχή έως και τα 1320Hz όπου σχηματίζεται ένας τρόπος δόνησης που μοιάζει κατά πολύ με τον (6,3) με την διαφορά πως οι δύο χαμηλότερες εστίες ταλάντωσης εμφανίζουν πιο ευδιάκριτα δεσμό ταλάντωσης. Στην συνέχεια εμφανίζεται ένας ισχυρός συντονισμός στα 1480Hz με 7 εστίες ταλάντωσης στο χαμηλότερο τμήμα του οργάνου και μικρό πλάτος στο κέντρο και γύρω από την οπή αντίστοιχα. Αυτός ο τρόπος περιγράφεται ως (7,3) του μπουζουκιού και μετασχηματίζεται στον (7,1)₁ στα 1630Hz. Ένας τρόπος με 8 εστίες ταλάντωσης και πολύ μικρό πλάτος γύρω από την οπή σχηματίζεται γύρω από τα 1690Hz και ονομάζεται (8,2)₁ ενώ στα 1720Hz εμφανίζεται πάλι ένας τρόπος της μορφής (7,1) με λίγο διαφορετική διάταξη στις 7 εστίες ταλάντωσης. Στην συχνότητα των 1820Hz εμφανίζεται πάλι ένας τρόπος ταλάντωσης με 8 εστίες στην χαμηλότερη περιοχή με μικρότερο πλάτος από τον (8,2)₁ και ονομάζεται (8,2)₂. Τέλος, και ενώ το πλάτος ταλάντωσης του καπακιού είναι πάρα πολύ μικρό εμφανίζεται στα 1910Hz για ακόμα μια φορά ένας τρόπος ταλάντωσης με 7 εστίες στο χαμηλότερο τμήμα που διαφέρει ωστόσο και από τους υπόλοιπους με 7 εστίες αντίστοιχα. Λόγω του μικρού πλάτους που εμφανίζεται στο κέντρο του οργάνου μπορεί να ονομαστεί ως (7,3)₂.

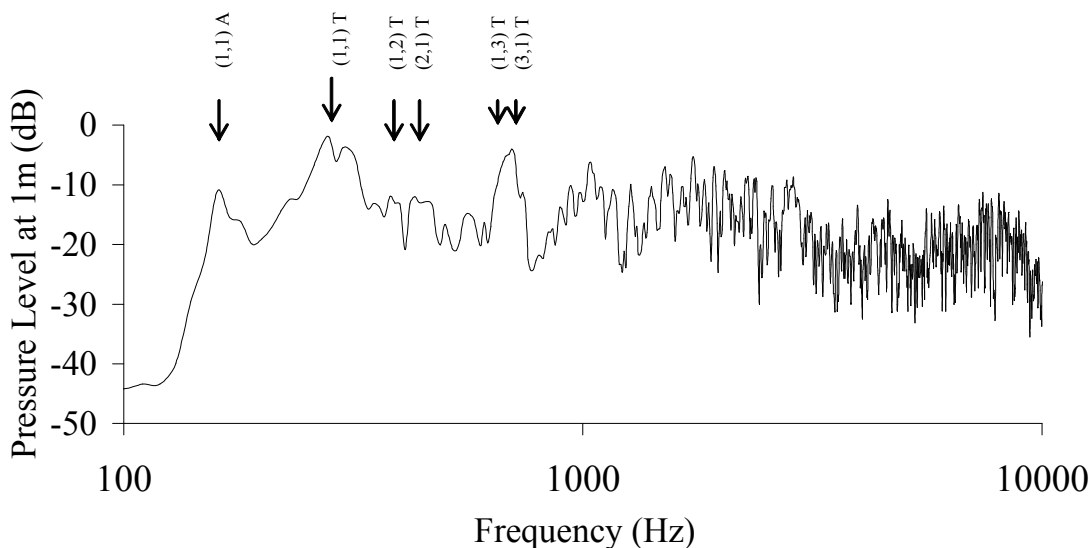
Συχνοτική απόκριση

Παρατηρώντας τα πλάτη ταλάντωσης των τρόπων δόνησης μέσω της ESPI προσδιορίστηκαν 6 ισχυροί τρόποι δόνησης στις χαμηλές συχνότητες του οργάνου μέχρι τα 1000Hz περίπου με τον (1,1)T να έχει αρκετά μεγαλύτερο πλάτος από τους υπόλοιπους. Ωστόσο, το πλάτος με το οποίο ακτινοβολούν αυτοί οι τρόποι δόνησης εξαρτάται από έναν μεγάλο αριθμό παραγόντων όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο της θεωρίας (2.3.1) όπως η επιφάνεια ταλάντωσης, η σχετική φάση των διαφορετικών εστιών ταλάντωσης που διαμορφώνει τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε τρόπου και η θέση διέγερσης της δονούμενης επιφάνειας.

Παρατηρώντας την μορφή των βασικότερων τρόπων δόνησης διακρίνεται πως ο τρόπος 1,1 ακτινοβολεί ως μονόπολο, οι 1,2 και 2,1 ως δίπολα και οι 3,1 1,3 ως τρίπολα (δεδομένου ότι και στον 3,3 είναι 3 οι σημαντικές εστίες δόνησης). Μία θεωρητική προσέγγιση για τον τρόπο με τον οποίο ακτινοβολούν οι τρόποι δόνησης γύρω από τα όργανα στο ελεύθερο πεδίο [6] δεν αντικατοπτρίζει την συμπεριφορά του οργάνου κατά την πραγματική διέγερση όπου του σύνθετο σήμα της χορδής έχει ως αποτέλεσμα διαμόρφωση σύνθετων τρόπων δόνησης πάνω στο καπάκι, η αλληλεπίδραση των οποίων επιδρά και αυτή στα κατευθυντικά χαρακτηριστικά τους. Επίσης, τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά των οργάνων πρέπει να μελετώνται σε ειδικούς ανηχικούς θαλάμους [45] και παρά τα μεγάλα ποσοστά απορρόφησης του recording studio που

πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, θα ήταν σφάλμα να διεξαχθούν συμπεράσματα για τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά οι μετρήσεις των οποίων γίνονται σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 3,5m όπως ορίζει η θεωρία [6,45].

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένας μέσος όρος κρουστικών αποκρίσεων στην γέφυρα ενώ στο γράφημα σημειώνονται οι περιοχές στις οποίες εντοπίστηκαν οι ισχυρότεροι τρόποι δόνησης από την μέθοδο της ESPI.



Εικόνα 4.5 : Φασματικός μέσος όρος σε 40 κρούσεις κάθετες προς το καπάκι πάνω στην γέφυρα στην περιοχή της χορδής A3 (στο κέντρο) στην θέση λήψης 1.

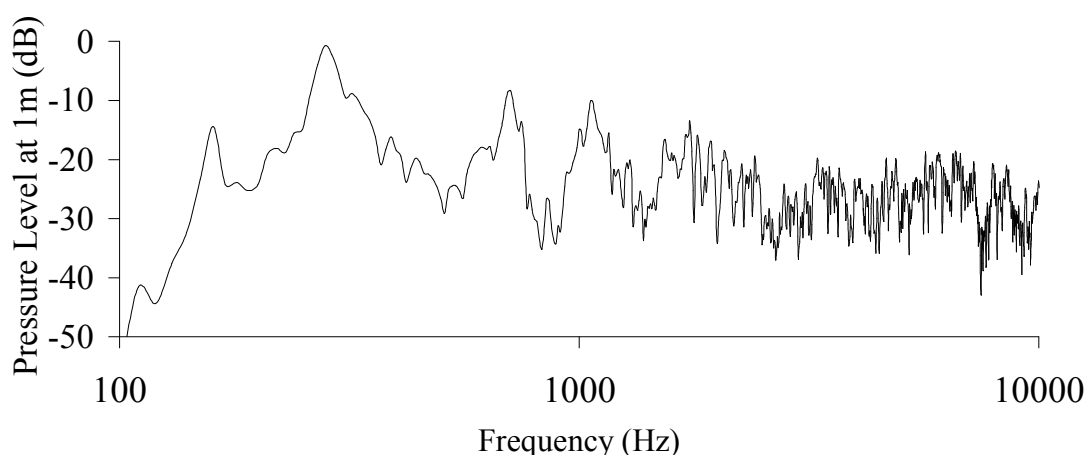
Ξεκινώντας από τις παρατηρήσεις που γίνονται με βάση τις κρουστικές αποκρίσεις με κάθετη διέγερση στην γέφυρα, διακρίνονται τα εξής:

- 1) Ο ισχυρότερος τρόπος δόνησης είναι ο (1,1)T συγκεντρώνοντας μεγάλο πλάτος ταλάντωσης γύρω από την περιοχή των 280 με 303Hz. Ωστόσο, φαίνεται από τα γραφήματα πως δεν υπάρχει μόνο μία κορυφή στο φάσμα αλλά ο τρόπος εμφανίζεται σε δύο κοντινές συχνότητες. Αυτό το φαινόμενο διχοτόμησης που στην βιβλιογραφία εντοπίζεται ως ‘splitting mode’ εμφανίζεται και στις κιθάρες ως αποτέλεσμα της σύζευξης διαφορετικών τμημάτων των οργάνων αλλά σε ψυχοακουστικά πειράματα που έχουν γίνει φαίνεται να διακατέχει δευτερεύοντα ρόλο τόσο στην συμπεριφορά όσο και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ήχου της κιθάρας [6].
- 2) Ο συντονισμός της αέρινης συχνότητας [(1,1)A στο γράφημα] είναι επίσης ισχυρός συνεισφέροντας στην ενίσχυση της έντασης στις χαμηλότερες συχνότητες του οργάνου.
- 3) Οι τρόποι (1,2) και (2,1) δεν εμφανίζονται με ισχυρό πλάτος που να αντικατοπτρίζει την συμπεριφορά τους κατά την μέτρηση της ESPI. Αυτό προκύπτει από την διαφορά φάσης με την οποία δονούνται οι δύο πόλοι που καθιστούν «φτωχή» την ηχητική εκπομπή τους

μπροστά από τα όργανα. Μάλιστα στην κιθάρα κορυφαίοι ερευνητές όπως ο Meyer [6,26] δεν θεωρούν καν τρόπο ταλάντωσης τον (2,1) λόγω του ότι σχηματίζει δεσμό κάθετα στην γέφυρα και έτσι δεν διεγείρεται με μεγάλο πλάτος από την συγκεκριμένη περιοχή.

- 4) Οι τρόποι 3,1 και 1,3 ακτινοβολούν με μεγάλο πλάτος ταλάντωσης και για το λόγο αυτό θεωρούνται πολύ σημαντικοί στην διαμόρφωση της δονητικής συμπεριφοράς του οργάνου. Μάλιστα, η ενέργεια που συγκεντρώνεται γύρω από αυτούς τους τρόπους είναι κατά 3dB μικρότερη από την αντίστοιχη του (1,1)T.
- 5) Στις συχνότητες γύρω από την περιοχή των 1050 με 1180Hz εμφανίζεται συγκέντρωση ενέργειας σε όλες τις κρούσεις που αποδίδεται στους τρόπους δόνησης (3,4) και (4,3) που όπως αναφέρθηκε είναι και οι μόνοι τρόποι στους οποίους συγκεντρώνεται μεγάλο πλάτος ταλάντωσης γύρω από την γέφυρα στο εξεταζόμενο εύρος.
- 6) Τέλος, στα υψηλότερα συχνοτικά στοιχεία του φάσματος φαίνεται πως οι τρόποι δόνησης αλληλεπιδρούν σχηματίζοντας έναν μεγάλο αριθμό κορυφών και βυθισμάτων. Στην κιθάρα η συγκεκριμένη συμπεριφορά στις υψηλότερες συχνότητες έχει χαρακτηριστεί από τον Caldermith ως «ηχητικό συνεχές» (εκ του ‘resonance continuum’)[26].

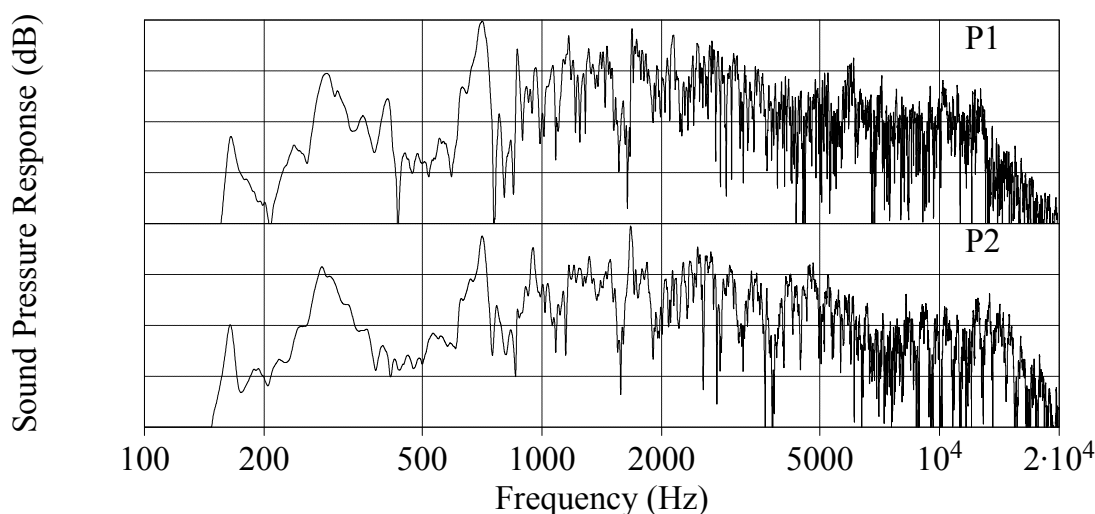
Παρόμοια χαρακτηριστικά εμφανίζονται και στην κοντινή ηχογράφιση με την διαφορά ότι ο (1,1)T φαίνεται να «υπερεκτιμάται» σε σχέση με τους υπόλοιπους με την χαμηλότερη από τις δύο κορυφές που φαίνονται στην θέση 1 να είναι εμφανώς πιο ισχυρή από την 2^η. Επίσης, η συγκέντρωση ενέργειας γύρω από τα 1050Hz είναι πιο μεγάλη σε σχέση με τα υψηλότερα στοιχεία του φάσματος. Οι τρόποι που ακτινοβολούν ως δίπολα (1,2) και (2,1) δεν εμφανίζονται με ισχυρό πλάτος ούτε σε αυτήν την θέση λήψης αν και οι κορυφές τους εντοπίζονται στα 393Hz και στα 460Hz, πολύ κοντά σε σχέση με τα 400Hz και 450Hz που εντοπίστηκαν με την μέθοδο της ESPI.



Εικόνα 4.6 : Φασματικός μέσος όρος σε 40 κρούσεις κάθετες προς το καπάκι πάνω στην γέφυρα στην περιοχή της χορδής A3 (στο κέντρο) στην θέση λήψης 2.

Τέλος, γύρω από την περιοχή των 700 με 740Hz όπου υπάρχουν οι (1,3) και (3,1) υπάρχει η 2^η τάξη συγκέντρωση ενέργειας με μέγιστο πλάτος 9dB κάτω από το αντίστοιχο του (1,1)T.

Οι βασικότεροι τρόποι δόνησης εντοπίζονται επίσης στην συχνοτική απόκριση των οργάνων μέσω μηχανικής διέγερσης στο καπάκι δίπλα από την γέφυρα. Η μέτρηση έγινε χωρίς να μεταβληθούν οι θέσεις των μικροφώνων αλλά το όργανο στηρίχθηκε πάνω στην θέση του εκτελεστή και απομονωθήκαν οι χορδές. Ωστόσο, όπως φαίνεται στα γραφήματα η διέγερση πάνω στο καπάκι υποτιμά τα χαμηλότερα στοιχεία του φάσματος σε αντίθεση με τα υψηλότερα. Επίσης, οι περιοχές όπου εκπέμπουν οι τρόποι (1,2) και (1,2) εντοπίζονται σε χαμηλότερες συχνότητες γύρω από τα 365Hz και 420Hz και κατά πολύ πιο ενισχυμένοι στην θέση 1 έναντι της θέσης 2.

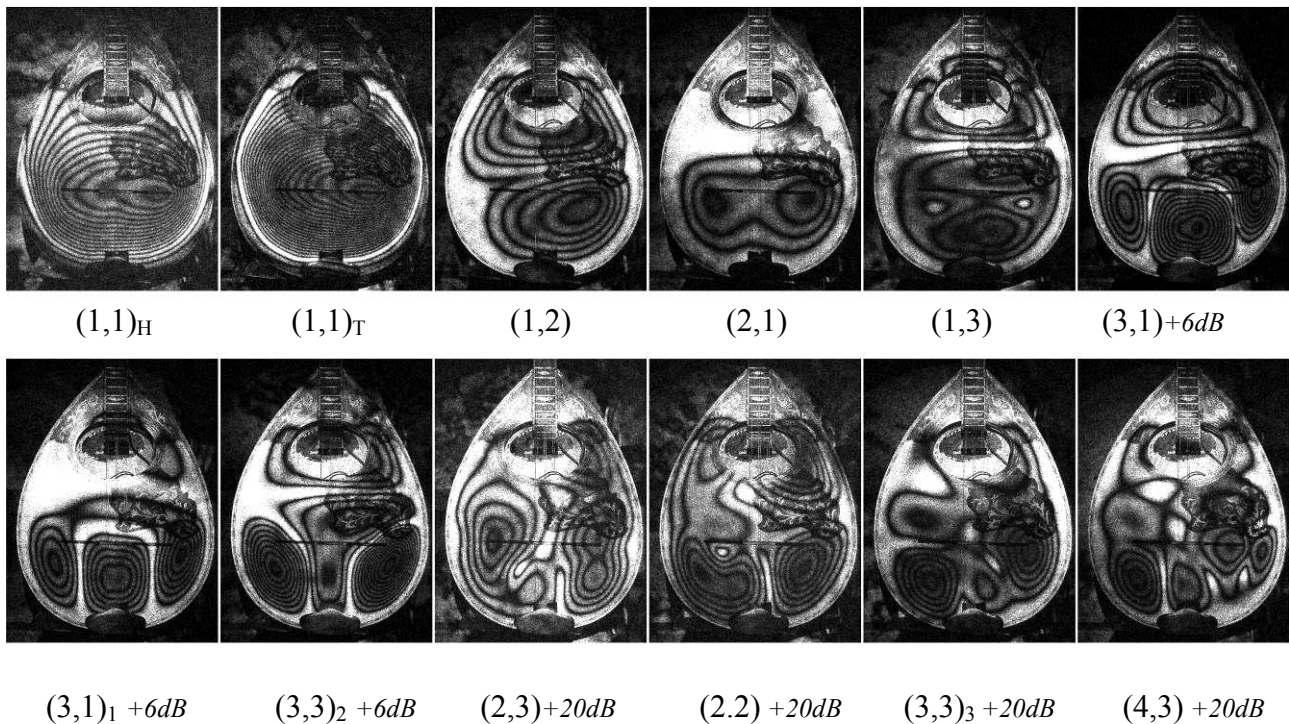


Εικόνα 4.7 : Απόκριση συχνότητας με μηχανική διέγερση πάνω στο καπάκι δίπλα στην γέφυρα. Στην θέση λήψης 1 (P1) και 2 (P2) αντίστοιχα.

Σχετικά με τις συχνοτικές αποκρίσεις που παρουσιάζονται μέχρι στιγμής αναφέρεται πως οι μέσες ενέργειες που εμφανίζονται στα φάσματα όταν εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός δεν αντικατοπτρίζουν πλήρως την συμπεριφορά των τρόπων δόνησης αφού παραμένει άγνωστη η χρονική πληροφορία. Ωστόσο, το ότι τα βασικότερα χαρακτηριστικά που αφορούν την εργασία σε αυτό το στάδιο είναι εμφανή από τους φασματικούς μέσους όρους ικανοποιεί το ζητούμενο της εργασίας και ανάλυσης της απόκρισης στο πεδίο του χρόνου (μέσω STFT) δεν πραγματοποιούνται στην παρούσα εργασία.

4.1.2 Τρίχορδο μπουζούκι 2

Οι βασικότεροι τρόποι που εντοπίστηκαν στο τρίχορδο μπουζούκι 1 εντοπίζονται και στο τρίχορδο μπουζούκι 2 με διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά που αφορούν κυρίως στην συχνότητα και στην κατανομή του πλάτους ταλάντωσης.



Εικόνα 4.8: Τρόποι δόνησης στο εύρος 60-1000Hz

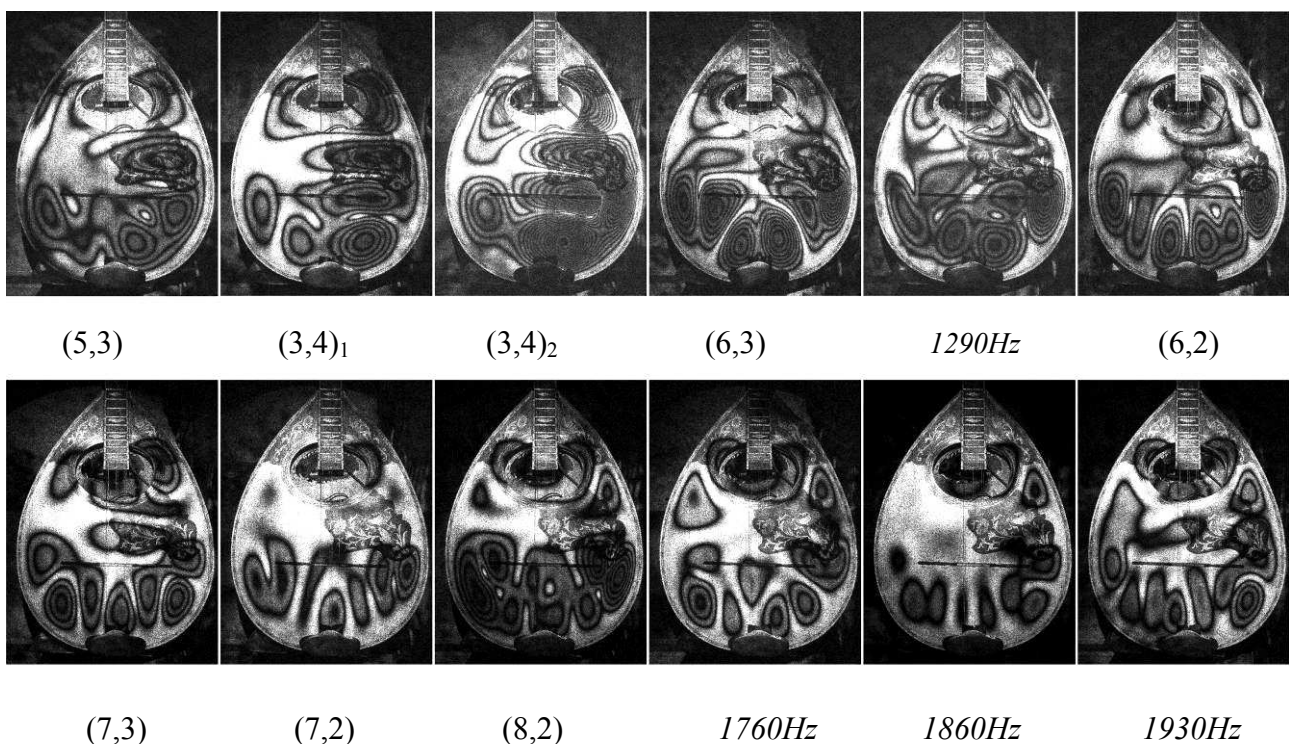
Ο πρώτος τρόπος δόνησης του τρίχορδου μπουζουκιού 2 εμφανίζεται στα 171Hz και είναι αυτός του αέρινου όγκου $(1,1)_H$. Στην συνέχεια εμφανίζεται και εδώ ο ισχυρότερος τρόπος του οργάνου $(1,1)_\Gamma$ στα 293Hz. Μία πρώτη διαφοροποίηση που παρατηρείται σε σχέση με το τρίχορδο μπουζούκι 1 είναι πως το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης του καπακιού και στους δύο αυτούς τρόπους ταλάντωσης εμφανίζεται λίγο μετατοπισμένο προς τα δεξιά πιο κοντά στην χορδή D4.

Ο τρόπος $(1,2)$ εμφανίζεται στα 403Hz ενώ ο $(2,1)$ παίρνει την τελική του μορφή στα 470Hz με πολύ μικρότερο πλάτος ταλάντωσης από τον αντίστοιχο του τρίχορδου μπουζουκιού 1. Και σε αυτό το όργανο υπάρχει μικρή διέγερση στην περιοχή από τα 480 έως τα 680Hz γύρω από έναν τρόπο της μορφής $(1,3)$ που φθάνει στο μέγιστό του στα 720Hz. Μέσα σε ένα πολύ μικρό συχνοτικό εύρος των 20Hz ο $(1,3)$ μετατρέπεται στον $(3,1)$ που έχει μέγιστο στα 750Hz και είναι πολύ ισχυρός σε σχέση με τον $(1,3)$. Όπως φαίνεται από τις διαδοχικές εικόνες το πλάτος του τρόπου δόνησης $(3,1)$ μειώνεται λίγο έως τα 770Hz ενώ στα 800Hz αυξάνεται αλλά μόνο στις δύο ακριανές εστίες δόνησης με ελάχιστο πλάτος στην κεντρική εστία, στο κέντρο του καπακιού και γύρω από την οπή σχηματίζοντας τον αντίστοιχο τρόπο $(3,3)$. Σημειώνεται επίσης πως το πλάτος ταλάντωσης είναι διπλάσιο (στον αριθμό των κροσσών συμβολής) από το σχετικό με τους χαμηλότερους τρόπους δόνησης. Αυτές οι φωτογραφίες προτιμήθηκαν για την παρουσίαση καθώς φαίνεται η μικρή διέγερση γύρω από την οπή και το κέντρο του καπακιού.

Συνεχίζοντας, το πλάτος ταλάντωσης μειώνεται δραματικά όπως και στο τρίχορδο μπουζούκι 1 και παρατηρούνται επίσης τρόποι δόνησης με 2 και 4 εστίες ταλάντωσης. Ο τρόπος $(2,3)$ που

υπάρχει στο μπουζούκι 1 στα 860Hz εμφανίζεται και εδώ στα 870Hz αλλά διαφοροποιημένος αισθητά ως προς την κατανομή του πλάτους ταλάντωσης. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται οι δύο εστίες ταλάντωσης στο κάτω μέρος του καπακιού, 2 εκατέρωθεν της γέφυρας αλλά μόνο μια εστία δεξιά της οπής (αντί για 2 εστίες στον αντίστοιχο τρόπο του μπουζουκιού 1). Στα 905Hz σχηματίζεται ο τρόπος δόνησης (2,2) όπως και στο τρίχορδο μπουζούκι 1. Οδεύοντας προς τα 1000Hz υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην κατανομή του πλάτους ταλάντωσης και εμφανίζονται οι τρόποι δόνησης (3,3)₃ και (4,3) που σχετίζονται με τους (2,2) 920Hz (4,2)₂ του τρίχορδου μπουζουκιού 1 (εικόνα 4.3) αλλά διαφέρουν λίγο ως προς την κατανομή του πλάτους.

Οι τρόποι δόνησης που εντοπίζονται από τα 1000 έως τα 2000Hz σχηματίζονται και σε αυτό το όργανο με 5 έως 8 εστίες ταλάντωσης. Ο τρόπος δόνησης (5,3) εμφανίζεται στα 1030Hz με 5 εστίες



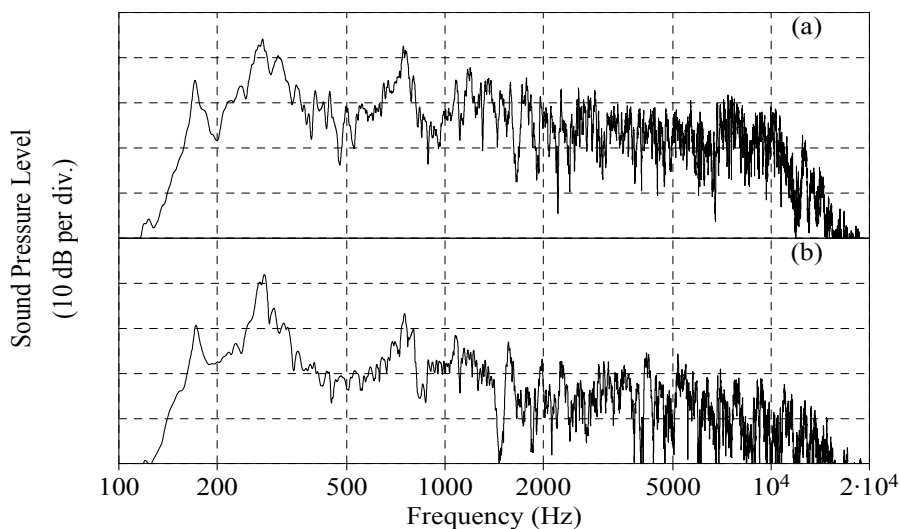
Εικόνα 4.9: Τρόποι δόνησης στο εύρος 1000-2000Hz

ταλάντωσης στην χαμηλότερη περιοχή ενώ στα 1100Hz εμφανίζεται ο τρόπος ταλάντωσης (3,4)₁ που εμφανίζει μεγάλο πλάτος ταλάντωσης γύρω από την περιοχή της γέφυρας. Στην συνέχεια εμφανίζεται ο (3,4)₂ στα 1160Hz που αποτελεί εξέλιξη του (3,4)₁, είναι ωστόσο διαφορετικός τρόπος δόνησης αφού μεταξύ των 2 μεσολαβεί ομαλή πτώση του πλάτους ταλάντωσης. Και σε αυτό το όργανο οι τρόποι (3,4)₁ και (3,4)₂ είναι οι ισχυρότεροι στο εύρος 1-2KHz και οι μόνοι που εμφανίζουν αξιόλογο πλάτος στην περιοχή της γέφυρας.

Από τα 1260Hz έως τα 1340Hz εμφανίζονται τρόποι ταλάντωσης με που συγκεντρώνουν το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης σε 6 εστίες στην χαμηλότερη περιοχή του οργάνου και είναι οι (6,3)

στα 1260Hz και (6,2) στα 1340Hz αντίστοιχα. Στα 1512Hz εμφανίζεται ο πρώτος τρόπος δόνησης με 7 εστίες ταλάντωσης στο χαμηλότερο τμήμα του οργάνου και είναι ο (7,3) ενώ υπάρχει και άλλος ένας τρόπος στα 1637Hz με μικρό πλάτος γύρω από την οπή που προσδιορίζεται ως ο (7,2) του μπουζουκιού. Από τα 1700 έως και τα 1930Hz εμφανίζονται 4 τρόποι δόνησης με 8 εστίες ταλάντωσης ο ισχυρότερος εκ των οποίων είναι ο (8,2) στα 1700Hz.

Από τα διαγράμματα της απόκρισης διακρίνονται πολλά κοινά χαρακτηριστικά με το τρίχορδο μπουζούκι 1.



Εικόνα 4.10: Φασματικός μέσος όρος σε 40 κρούσεις κάθετες προς το καπάκι πάνω στην γέφυρα στην περιοχή της χορδής A3 (στο κέντρο) στην θέση λήψης 1 (a) και θέση 2 (b) αντίστοιχα.

Και εδώ ο ισχυρότερος τρόπος δόνησης του οργάνου είναι ο (1,1)T, ενώ ισχυρό πλάτος έχει και ο συντονισμός του αέρινου όγκου (1,1)H που ενισχύει τις χαμηλότερες συχνότητες του οργάνου. Οι τρόποι που εμφανίζονται ως δίπολα (1,2) και (2,1) δεν ακτινοβολούν με μεγάλο πλάτος ωστόσο ο (1,2) σε αυτό το όργανο εμφανίζεται πιο ισχυρός σε σχέση με τους υπόλοιπους κατά την μέτρηση της ESPI και το σχετικό πλάτος γύρω από αυτήν την περιοχή πιο ενισχυμένο από το αντίστοιχο του τρίχορδου μπουζουκιού 1 αν και υποτιμάται από τον μέσο όρο των κρούσεων στην γέφυρα. Χαρακτηριστική είναι η περιοχή που εντοπίστηκαν οι τρόποι (1,3) και (3,1) στα 720 και 750Hz αντίστοιχα ενώ εδώ ο (3,1) φαίνεται να συγκεντρώνει μεγαλύτερο πλάτος στον μέσο όρο με μία κορυφή ουσιαστικά να διακρίνεται στο φάσμα. Τέλος, χαρακτηριστική είναι και η συγκέντρωση ενέργειας γύρω από τα 1100Hz που εντοπίστηκαν οι τρόποι (3,4)₁ και (3,4)₂ παρά την ασυμμετρία που παρουσιάζουν σε σχέση με τους αντίστοιχους του τρίχορδου μπουζουκιού 1.

4.2 Τρίχορδο μπουζούκι 1- Ήχος και δονήσεις

4.2.1 Μονές χορδές

Η δονητική συμπεριφορά των τρίχορδων μπουζουκιών αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο και σημειώθηκαν οι σημαντικότεροι τρόποι δόνησης και οι κατανομές ενέργειας ανά συχνότητα στην απόκριση με κρούση και πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα. Ωστόσο, τόσο στις μετρήσεις της ESPI όσο και στις αντίστοιχες της συχνοτικής απόκρισης τα σήματα με τα οποία διεγείρεται το όργανο είναι είτε ημιτονικά είτε παλμικά (κατά την διέγερση με κρούση) και διαφέρουν πολύ από τα πραγματικά που είναι οι σύνθετες ταλαντώσεις των χορδών και στις τρεις διαστάσεις. Βέβαια, γνωρίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά της δονητικής συμπεριφοράς της χορδής που αναπτύχθηκαν στο θεωρητικό κεφάλαιο (2.2 -- χορδές) μπορούν να γίνουν συσχετισμοί με τις κρουστικές αποκρίσεις και τους τρόπους δόνησης και έτσι να πραγματοποιηθεί μια γενική εκτίμηση για την ηχητική συμπεριφορά των οργάνων.

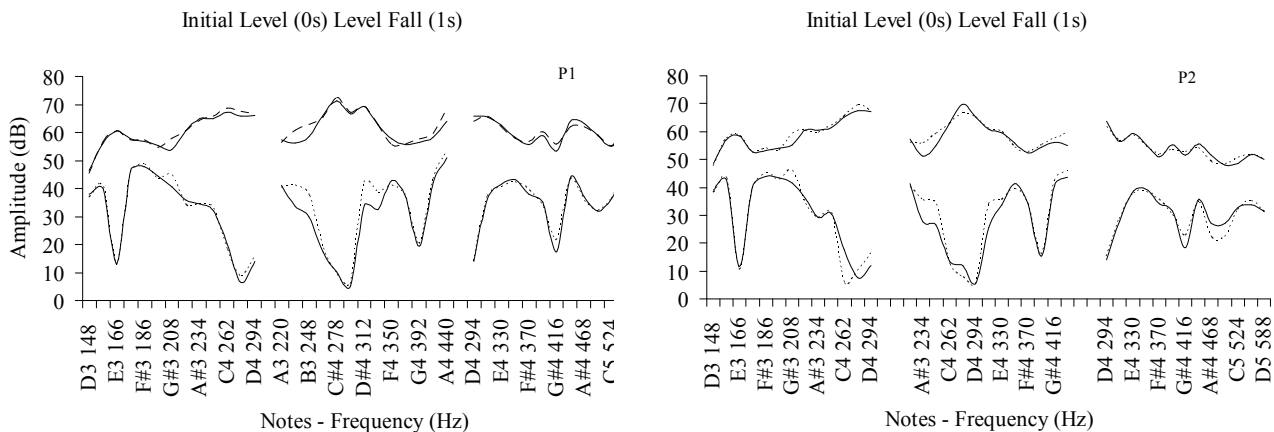
Ωστόσο, τέτοιου είδους εκτιμήσεις μπορεί να απέχουν από την πραγματικότητα από την στιγμή που στα όργανα δεν έχει μελετηθεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που είναι η αγωγιμότητα στο σημείο της γέφυρας και στις τρεις βασικές κατευθύνσεις με τις οποίες οδηγείται σε ταλάντωση από τις χορδές. Η μέτρηση της αγωγιμότητας θα έδινε χρήσιμα στοιχεία για τον τρόπο που συζεύγνυνται οι χορδές με το σώμα των οργάνων αλλά τέτοιες μετρήσεις δεν κατέστη δυνατόν να πραγματοποιηθούν λόγω ελλείψεως του κατάλληλου εξοπλισμού. Παρά ταύτα, γνωρίζοντας τις σχέσεις σύζευξης χορδών-καπακιών (2.4.4 -- Σύζευξη χορδής καπακιού) μία εκτίμηση του φαινομένου μπορεί να πραγματοποιηθεί για τα όργανα με βάση τα δείγματα που καταγράφηκαν και με τον τρόπο αυτό να προσδιοριστούν ποιοτικά τα χαρακτηριστικά τους. Αυτός είναι και ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο στα όργανα εκτελέστηκαν νότες με μονές χορδές απομονώνοντας έτσι δραστικά τα φαινόμενα που χαρακτηρίζουν την σύζευξη των διπλών χορδών όπως η διαμόρφωση πλάτους και η μεταφορά ενέργειας από την μία χορδή ενός ζεύγους στην άλλη.

4.2.1.1 Ενεργειακές κατανομές και σχέσεις σύζευξης

Για να εντοπιστούν τα φαινόμενα σύζευξης χορδών-καπακιού σε όλα τα όργανα η αρχική ανάλυση πραγματοποιείται με βάση τις σχέσεις που πρώτοι εντόπισαν οι Jansson και Caldersmith [30]. Από τις νότες που ηχογραφήθηκαν με μονές χορδές απομονώνονται οι θεμέλιοι (πρώτοι αρμονικοί) και εντοπίζονται 2 τιμές, αυτή της μέγιστης τιμής της έντασης κατά την αρχή μιας νότας (Initial Level) και της έντασης που καταγράφεται ένα δευτερόλεπτο μετά από την μέγιστη (Level

Fall 1s). Λόγω του ότι αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στην εργασία για να περιγράψουν τα φαινόμενα σύζευξης για λόγους συντομίας αναφέρονται ως ‘αρχική ένταση’ και ‘πτώση έντασης’. Σημειώνεται επίσης πως η πτώση έντασης δεν πρέπει να συγχέεται με τον ρυθμό πτώσης της έντασης (dB/s) καθώς ιδιαίτερα στις περιοχές ισχυρής σύζευξης χορδών και καπακιού ο ρυθμός πτώσης είναι σύνθετος και δεν μπορεί να περιγραφεί από μία και μόνο τιμή.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρατίθενται οι τιμές αρχικής έντασης και πτώσης έντασης για 39 νότες που εκτελέστηκαν 2 φορές και για τις 2 θέσεις λήψης.



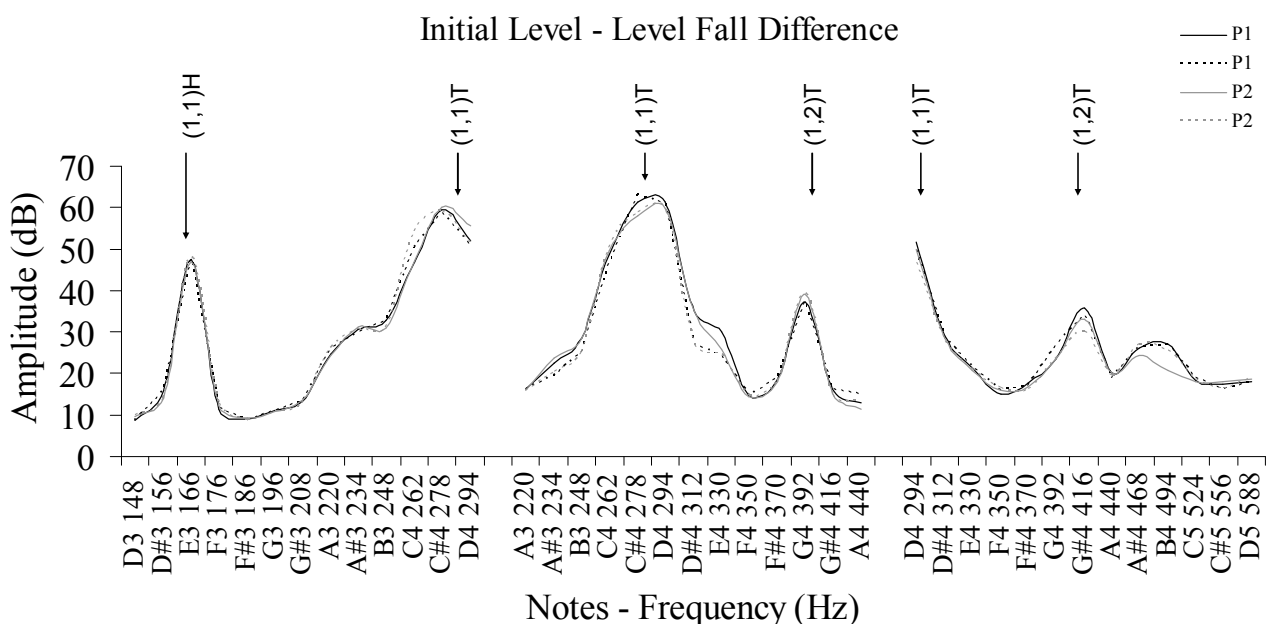
Εικόνα 4.11 : Αρχική ένταση και ένταση πτώσης για τις θεμελίους 39 νοτών που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές (μία οκτάβα σε κάθε χορδή) ξεκινώντας από την πιο μπάσα χορδή D3 στα αριστερά, την μεσαία χορδή A3 στο κέντρο και την πρίμα χορδή D4 στα δεξιά για την θέση λήψης 1 (P1) και στην θέση 2 (P2). Με διακεκομμένες γραμμές στα γραφήματα η επανάληψη της μέτρησης.

Περιγράφοντας τα διαγράμματα γενικά προς διευκόλυνση του αναγνώστη, διακρίνεται πως σε κάθε χορδή υπάρχουν νότες η θεμέλιος των οποίων έχει μεγαλύτερη αρχική ένταση από τις γειτονικές τους σχηματίζοντας τοπικά μέγιστα. Ωστόσο, υπάρχουν και περιοχές όπου η πτώση έντασης (ένταση κάθε θεμελίου 1s μετά την μέγιστη) είναι πολύ μεγαλύτερη από τις γειτονικές της σχηματίζοντας τοπικά ελάχιστα. Αυτές οι κορυφές και τα βυθίσματα που παρατηρούνται στα διαγράμματα συνδέονται άμεσα με τις σχέσεις σύζευξης των τρόπων δόνησης των χορδών με τους αντίστοιχους του καπακιού του οργάνου που εντοπίστηκαν στα προηγούμενα. Επίσης, διακρίνεται από τα διαγράμματα πως ενώ στις δύο θέσεις λήψης η αρχική ένταση κάποιων θεμελίων «υπερεκτιμάται» ή «υποτιμάται» ανάλογα με το ποια θέση λήψης ορίζεται ως αναφορά, η συμπεριφορά της κατανομής της έντασης ανά συχνότητα είναι περίπου η ίδια.

Παρατηρώντας αρχικά τα μέγιστα των διαγραμμάτων σε κάθε χορδή φαίνεται πως υπάρχει συμφωνία με τις περιοχές όπου εντοπίστηκαν οι ισχυρότεροι τρόποι δόνησης:

1. Στην χορδή D3 υπάρχει μεγάλο πλάτος στην αρχική ένταση των θεμελίων των νοτών που βρίσκονται γύρω από την αέρια συχνότητα (1,1)H και αυξάνεται από τα 262Hz έως τα 290Hz όπου υπάρχει ο (1,1)T.
2. Στην χορδή A3 υπάρχει μεγάλο πλάτος στην αρχική ένταση των θεμελίων που βρίσκονται γύρω από τον ισχυρότερο τρόπο δόνησης του οργάνου (1,1)T. Δεν φαίνεται ωστόσο να υπάρχει αντίστοιχα μεγάλο πλάτος ταλάντωσης γύρω από τα δύο δίπολα του οργάνου (1,2) και (2,1) (400-450Hz) γεγονός που συμφωνεί με τα διαγράμματα απόκρισης συχνότητας.
3. Στην χορδή D4 η αρχική ένταση είναι ελαφρώς αυξημένη γύρω από τον τρόπο δόνησης (1,1)T που φαίνεται στην θεμέλιο της νότας D4 (296Hz) ενώ αυξημένο πλάτος αρχικής έντασης φαίνεται να υπάρχει και γύρω από τα 460Hz κοντά στον τρόπο δόνησης (2,1).

Αν τώρα παρατηρηθούν οι τιμές πτώσης έντασης στα δύο διαγράμματα της εικόνας 1 διακρίνεται πως τα τοπικά ελάχιστα εντοπίζονται αντίστοιχα γύρω από τις περιοχές όπου υπάρχουν οι ισχυρότεροι τρόποι δόνησης του οργάνου. Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου ωστόσο παρατίθενται στην εικόνα που ακολουθεί οι διαφορές αρχικής έντασης και έντασης πτώσης των γραφημάτων της εικόνας 4.11 μαζί με τους βασικότερους τρόπους δόνησης στο εύρος 146-588Hz.



Εικόνα 4.12 : Διαφορές αρχικής έντασης και έντασης πτώσης για τις θεμελίους 39 νοτών που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές (μία οκτάβα σε κάθε χορδή) ξεκινώντας από την πιο μπάσα χορδή D3 στα αριστερά, την μεσαία χορδή A3 στο κέντρο και την πρίμα χορδή D4 στα δεξιά για την θέση λήψης 1 (P1) και στην θέση 2 (P2). Με διακεκομμένες γραμμές στα γραφήματα η επανάληψη της μέτρησης.

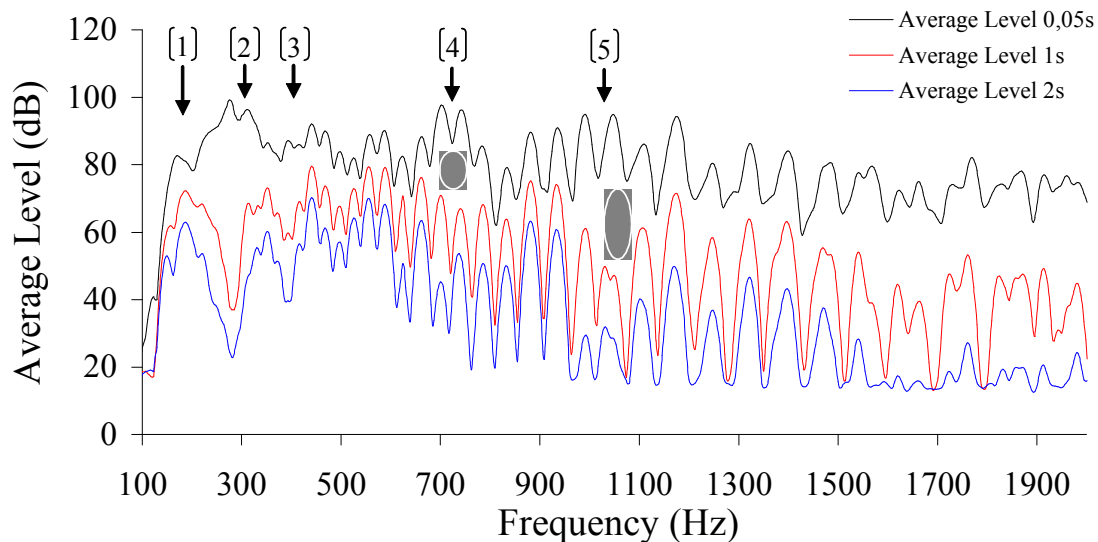
Παρατηρείται από τα διαγράμματα πως στις περιοχές των ισχυρών συντονισμών εμφανίζονται οι μεγαλύτερες διαφορές αρχικής έντασης και πτώσης έντασης γεγονός που υποδεικνύει τον τρόπο σύζευξης χορδών καπακιού. Έτσι, για παράδειγμα στις χορδές D3 και A3 οι θεμέλιοι των νοτών που βρίσκονται γύρω από τον ισχυρότερο τρόπο δόνησης του οργάνου, (1,1)T, έχουν σχεδόν πλήρη απόσβεση της ενέργειάς του σε χρόνο 1s αφού η έντασή τους έχει μειωθεί κατά 60dB περίπου. Αντίστοιχα στην χορδή D4 η θεμέλιος της νότας D4 έχει μειωθεί κατά 50dB στο 1s. Η επίδραση της αέρινης συχνότητας (1,1)H στο όργανο είναι επίσης πολύ ισχυρή καθώς όπως φαίνεται στην χορδή D3 η θεμέλιος της νότας E3 (166Hz) έχει μειωθεί κατά 48dB.

Φαίνεται ακόμα πως υπάρχει ισχυρή σύζευξη με τον τρόπο δόνησης (1,2) στις χορδές A3 και D4 με πτώση έντασης της τάξης των 38-40dB. Ωστόσο, στην χορδή A3 ο (1,2) επηρεάζει περισσότερο την θεμέλιο της νότας G4 ενώ στην χορδή D4 την αντίστοιχη της G#4. Λίγο αυξημένη διαφορά αρχικής-πτώσης έντασης εμφανίζεται γύρω από τα 470Hz στην χορδή D περίπου 20Hz παραπάνω από την συχνότητα που εντοπίζεται ο (2,1), ωστόσο και οι 2 τρόποι που ακτινοβολούν με δύο εστίες ταλάντωσης εμφανίζονται με μικρότερο από το «αναμενόμενο» πλάτος στην αρχική ένταση γεγονός που δείχνει πως οι πόλοι εκπέμπουν με διαφορά φάσης όπως αντίστοιχα συμβαίνει και στα όργανα της κιθάρας.

Αξίζει επιπλέον να σχολιασθεί πως τα φαινόμενα της σύζευξης δεν επηρεάστηκαν ούτε από τον οργανοπαίκτη αλλά ούτε από την θέση λήψης δείχνοντας μια γραμμική συμπεριφορά γεγονός που ενισχύει το κύρος των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, η κοντινή λήψη φαίνεται να «υπερεκτιμά» την αρχική ενέργεια γύρω από τον (1,1)T στα 290Hz και σημειώνεται πως ως θέση αναφοράς προτιμάται η θέση 1 αφού είναι πιο «ρεαλιστική» όσο αφορά την απόσταση που θα βρισκόταν ένας ακροατής αλλά και βρίσκεται πιο κοντά στο ελεύθερο πεδίο [6] δεδομένου του ότι η απόσταση είναι υπερδιπλάσια από την μέγιστη διάσταση των καπακιών χωρίς ωστόσο καμία από τις δύο θέσεις να ικανοποιεί τις συνθήκες ελεύθερου πεδίου ακόμα και αν ο χώρος το επέτρεπε.

Επεκτείνοντας τις σχέσεις αρχικής έντασης και πτώσης έντασης στο μέσο φασματικό όρο για 39 νότες φαίνεται πως αντίστοιχα φαινόμενα σύζευξης ισχύουν τουλάχιστον για δύο ακόμα συχνοτικές περιοχές: 1) Στα 700 με 750Hz όπου εμφανίζονται οι τρόποι (1,3) και (3,1) και γύρω από τα 1050-1150 Hz όπου εμφανίζονται οι τρόποι δόνησης (4,3) και (3,4).

Σχολιάζοντας την συμπεριφορά της ενέργειας στα τρία χρονικά στιγμιότυπα της εικόνας 4.13 που ακολουθεί, παρατηρείται πως οι περιοχές με τους ισχυρούς συντονισμούς σχηματίζουν τοπικά μέγιστα στο φάσμα της αρχικής ενέργειας και τοπικά ελάχιστα αντίστοιχα στους χρόνους 1 και 2s. Χαρακτηριστικό είναι πως οι περιοχές όπου υπάρχουν οι (1,3) και (3,1) (περιοχή 3) και γύρω από τα 1100Hz (περιοχή 5) συγκεντρώνουν ενέργεια περίπου ίση με αυτήν της περιοχής (2) όπου υπάρχει ο ισχυρότερος τρόπος δόνησης (1,1)T.

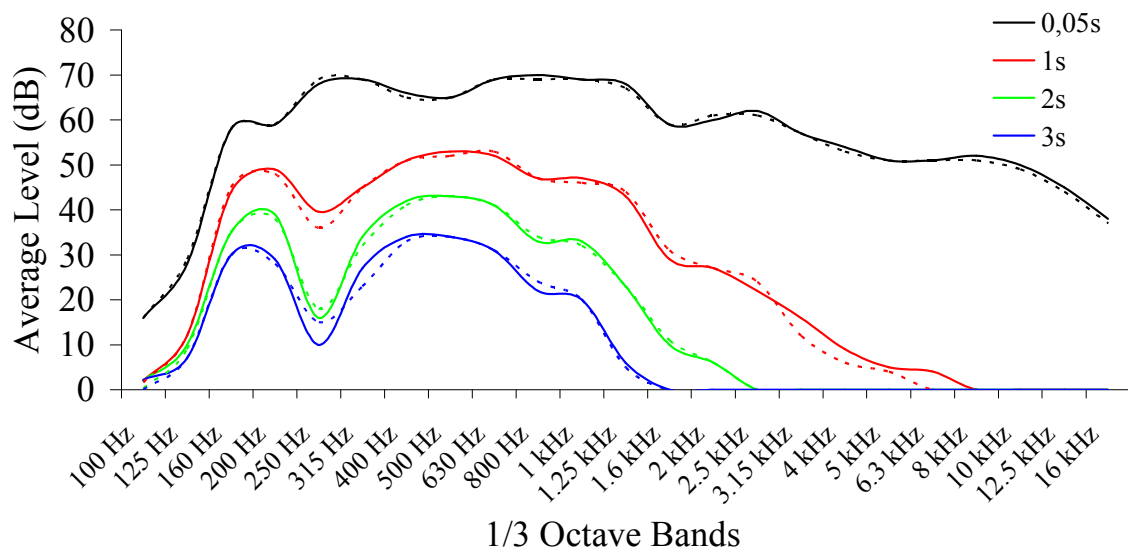


Εικόνα 4.13: Φασματικός μέσος όρος για τις 39 νότες που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές για τρία χρονικά στιγμιότυπα που αντιστοιχούν σε στην «αρχική ενέργεια» (μάυρο), στην ενέργεια πτώσης 1s μετά την αρχική (κόκκινο) και στην ενέργεια πτώσης 2s μετά την αρχική (μπλε).

Ένα χαρακτηριστικό που εντοπίζεται επίσης είναι πως ο ρυθμός πτώσης της ενέργειας δεν είναι σταθερός. Για παράδειγμα, γύρω από τον (1,1)T ενώ παρατηρείται πτώση της μέσης ενέργειας κατά 56dB περίπου στο 1s η αντίστοιχη από το 1s έως τα 2s δεν ξεπερνά τα 10dB αλλά παρόλα αυτά πλησιάζει προς την στάθμη θορύβου του συστήματος ηχογράφησης. Αυτό δείχνει πως ενώ η σύζευξη είναι πολύ ισχυρή και το καπάκι μετατρέπει το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας ταλάντωσης της χορδής σε ακουστική ενέργεια, το σύστημα «σταθεροποιείται» μετά από κάποιον χρόνο και η απόσβεση της ταλάντωσης των χορδών χαρακτηρίζεται ως απόσβεση 2 σταδίων (two stage decay). Βέβαια, είναι προφανές πως ο εκάστοτε αρμονικός που «χάνει» 60dB από την μέγιστη έντασή του σε 1s ουσιαστικά δεν γίνεται πλέον αντιληπτός από τον επίδοξο ακροατή αφού «επικαλύπτεται» από τα υπόλοιπα αρμονικά στοιχεία του φάσματος.

Έχοντας παρατηρήσει τις βασικές σχέσεις σύζευξης στην συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση σε ζώνες τριτοκτάβας για την αρχική ενεργειακή κατανομή και τις αντίστοιχες στα πρώτα 3 δευτερόλεπτα.

Παρατηρείται από τα γραφήματα πως εκτός από τις σχέσεις σύζευξης που εντοπίστηκαν στα προηγούμενα στις υψηλότερες συχνότητες οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στις χορδές έχουν ως αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση της ενέργειας έτσι ώστε: Ένα δευτερόλεπτο μετά την εκτέλεση όλων των νοτών τα μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας συγκεντρώνονται κάτω από τα 5KHz ενώ παρατηρείται ραγδαία πτώση της ενέργειας γύρω από τις τριτοκτάβες των 250 και 315Hz όπου υπάρχει ο τρόπος (1,1)T. Δυο δευτερόλεπτα μετά τα μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας συγκεντρώνονται ουσιαστικά κάτω από την τριτοκτάβα των 1,6KHz ενώ τρία δευτερόλεπτα μετά η ενέργεια περιορίζεται κάτω από τα 1,25KHz.



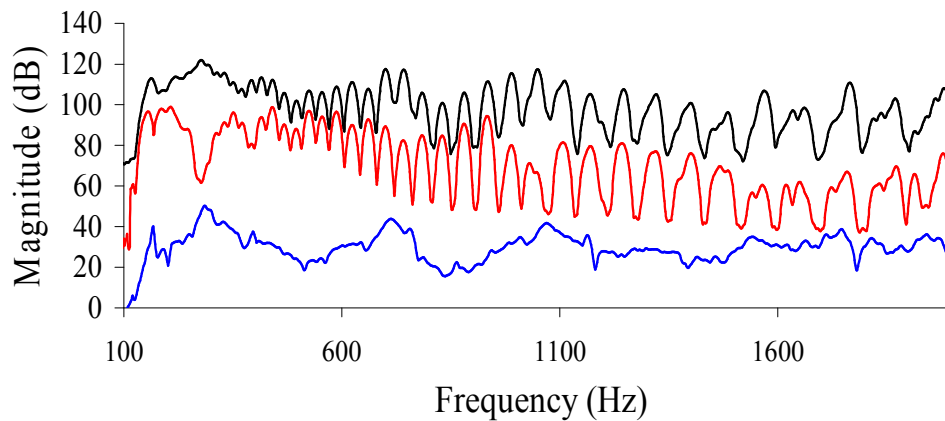
Εικόνα 4.14: Ενεργειακές κατανομές για 39 νότες εκτελεσμένες σε μονές χορδές στην θέση λήψης 1 με ανάλυση τριτοκτάβας και για διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα. Με διακεκομμένες γραμμές παρατίθενται τα αποτελέσματα της επανάληψης των μετρήσεων.

Με όσα έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής φαίνεται πως στο τρίχορδο μπουζούκι η αρχική ενέργεια συμφωνεί με την κρουστική απόκριση ενώ η πτώση της ενέργειας είναι μεγάλη γύρω από τις περιοχές όπου υπάρχει και ισχυρή σύζευξη των τρόπων δόνησης της χορδής με τους αντίστοιχους του καπακιού δίδοντας με αυτόν τον τρόπο μια ποιοτική σχέση τόσο της αγωγιμότητας όσο και τον χαρακτηριστικών της ηχητικής εκπομπής των οργάνων. Για παράδειγμα, το όργανο παρουσιάζει μεγάλη αγωγιμότητα (και αυτό είναι ποιοτική εκτίμηση) γύρω από τον τρόπο (1,2) στα 400Hz γεγονός που φαίνεται από τον ρυθμό απόσβεσης της ενέργειας που είναι αρκετά μεγάλος. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος τρόπος δόνησης δεν είναι ένας ισχυρός «ακτινοβολέας» (τουλάχιστον όσο αφορά τις θέσεις λήψης των μικροφώνων) αφού η μέγιστη ένταση με την οποία ακτινοβολεί δεν είναι αντίστοιχα μεγάλη.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (εικόνα 4.15) φαίνονται οι αντίστοιχες σχέσεις αρχικής ενέργειας και ενέργειας πτώσης στην θέση 2. Μαζί, αντιπαρατίθεται και το διάγραμμα ενός μέσου όρου συχνοτικών αποκρίσεων που προκύπτουν από 30 κρούσεις στην γέφυρα.

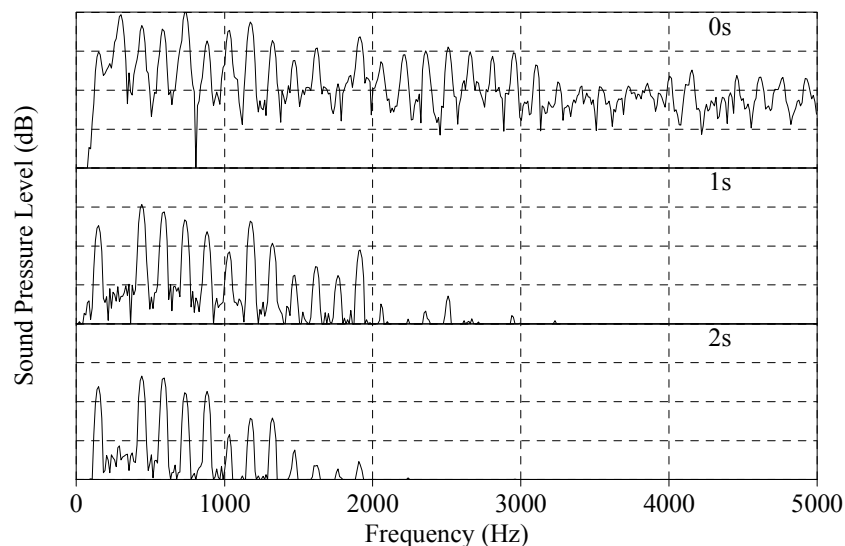
Διακρίνεται από τα διαγράμματα πως από τις χαμηλότερες συχνότητες έως τα 2KHz το τρίχορδο μπουζούκι μπορεί να χαρακτηριστεί από 4 σημαντικές περιοχές όπου συγκεντρώνονται τα μέγιστα της αρχικής ενέργειας ενώ αντίστοιχα υπάρχουν 5 συχνοτικές όπου εμφανίζονται τα τοπικά ελάχιστα κατά την πτώση την μέσης ενέργειας για όλες τις νότες ή την πτώση την έντασης σε κάθε θεμέλιο όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα. Ωστόσο, πιο αναλυτικά συμπεράσματα για την

συμπεριφορά του τρίχορδου μπουζουκιού διεξάγονται έπειτα και από την ανάλυση του 2^{ου} οργάνου στο τέλος του υποκεφαλαίου.



Εικόνα 4.15: Φασματικός μέσος όρος για τις 39 νότες που εκτελέστηκαν σε μόνες χορδές για τρία χρονικά στιγμιότυπα που αντιστοιχούν σε στην «αρχική ενέργεια» (μάυρο), στην ενέργεια πτώσης 1s μετά την αρχική (κόκκινο) και σε 30 κρούσεις με κάθετη ως προς το καπάκι φορά (μπλε).

Έχοντας μια ειδική εκτίμηση για τις θεμελίους συχνότητες του οργάνου και μια γενικότερη για τα υψηλότερα αρμονικά στοιχεία στην συνέχεια παρατίθεται τρία στιγμιότυπα του φάσματος της νότας D3 στην ομώνυμη χορδή.



Εικόνα 4.16 : Χρονικά στιγμιότυπα του φάσματος της νότας D3 (146Hz) στην ομώνυμη χορδή.

Παρατηρείται από την εικόνα πως οι αρμονικοί 2 και 5 που συζεύγνυνται με τους τρόπους δόνησης (1,1)T και (3,1) έχουν την μέγιστη ένταση κατά την αρχή της νότας. Στο αμέσως επόμενο δευτερόλεπτο ο 2^{ος} αρμονικός έχει «εξαφανιστεί» από το φάσμα λόγω της μεγάλης αγωγιμότητας. Μεγάλη πτώση παρατηρείται και στον 5^ο αρμονικό το πλάτος του οποίου έχει μειωθεί αρκετά

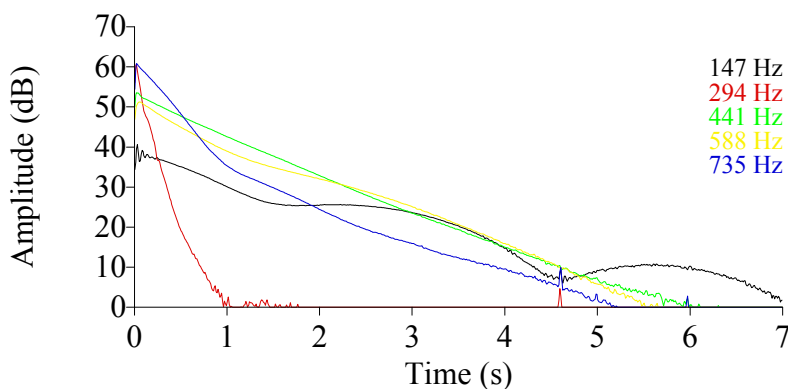
περισσότερο σε σχέση με τα γειτονικά του αρμονικά στοιχεία. Ωστόσο δεν συγκρίνεται σε καμία περίπτωση με τα φαινόμενα που παρατηρούνται στον 2^ο.

4.2.1.2 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου και σχέσεις σύζευξης

Η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου αφορά τόσο την εξέλιξη της έντασης της κάθε νότας ως προς τον χρόνο αλλά και την αντίστοιχη των αρμονικών στοιχείων που την συνθέτουν.

Στην προηγούμενη παράγραφο παρατηρήθηκαν οι βασικές σχέσεις της κατανομής της ενέργειας στην συχνότητα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και προσδιορίστηκαν κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά που ισχύουν στα περισσότερα έγχορδα νυκτά μουσικά όργανα. Ωστόσο, οι τιμές που προκύπτουν όσο αφορά την πτώση της έντασης ένα δευτερόλεπτο μετά την έναρξη της κάθε νότας είναι προφανές πως δεν αντιστοιχούν στον ρυθμό πτώσης ανά δευτερόλεπτο αφού όπως φάνηκε και στα φάσματα μέσης ενέργειας η πτώση ανά δευτερόλεπτο δεν είναι σταθερή.

Ένα παράδειγμα που περιγράφει τον τρόπο που διαμορφώνεται ο εκπεμπόμενος ήχος των οργάνων με βάση τα βασικότερα δονητικά χαρακτηριστικά αποτελεί η νότα D3 στα 146Hz το φάσμα της οποίας αναλύθηκε σε 3 χρονικά στιγμιότυπα στην εικόνα 4.16. Η συγκεκριμένη νότα είναι πολύ χαρακτηριστική αφού όπως παρατηρήθηκε περιέχει αρμονικά στοιχεία που βρίσκονται κοντά στους βασικότερους συντονισμούς του οργάνου. Η θεμέλιος βρίσκεται κοντά στην συχνότητα της αέρινης δόνησης (1,1)H στα 165Hz ενώ ο 2^{ος} αρμονικός συμπίπτει με τον (1,1)T. Ο 5^{ος} αρμονικός στα 730Hz βρίσκεται πιο κοντά στον (3,1) ωστόσο δεν μπορεί να αποκλισθεί και η επιρροή του από τον (1,3) που βρίσκεται περίπου 40Hz χαμηλότερα. Ακόμα, ο 9^{ος} αρμονικός πέφτει κοντά στην περιοχή των 1050Hz όπου υπάρχει έντονη διέγερση στο καπάκι του οργάνου ωστόσο για λόγους ευκρινείας δεν παρατίθεται στο διάγραμμα.

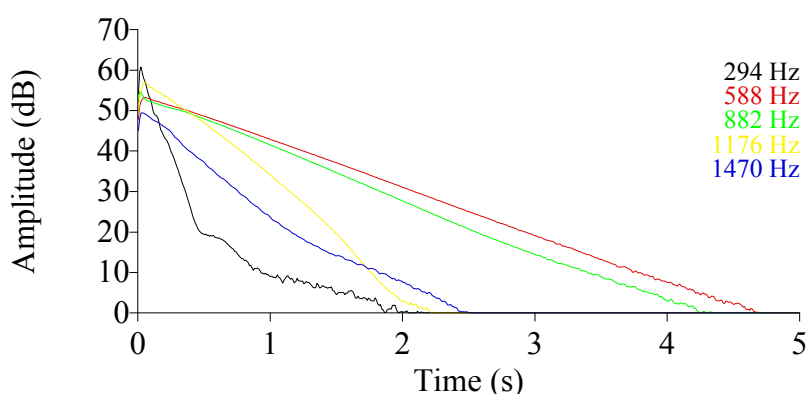


Εικόνα 4.17 : Περιβάλλουσες έντασης των αρμονικών (1-5) της νότας D3 στην ομόνυμη χορδή (146Hz)

Μία σημαντική παρατήρηση που αφορά στην συμπεριφορά της περιβάλλουσας έντασης των αρμονικών είναι πως στις περιοχές της σύζευξης (2^{ος} και 5^{ος} αρμονικός) το πλάτος ταλάντωσης φθίνει με ταχύ ρυθμό ενώ στις περιοχές που δεν συζεύγνυνται με κάποιον ισχυρό τρόπο δόνησης ο

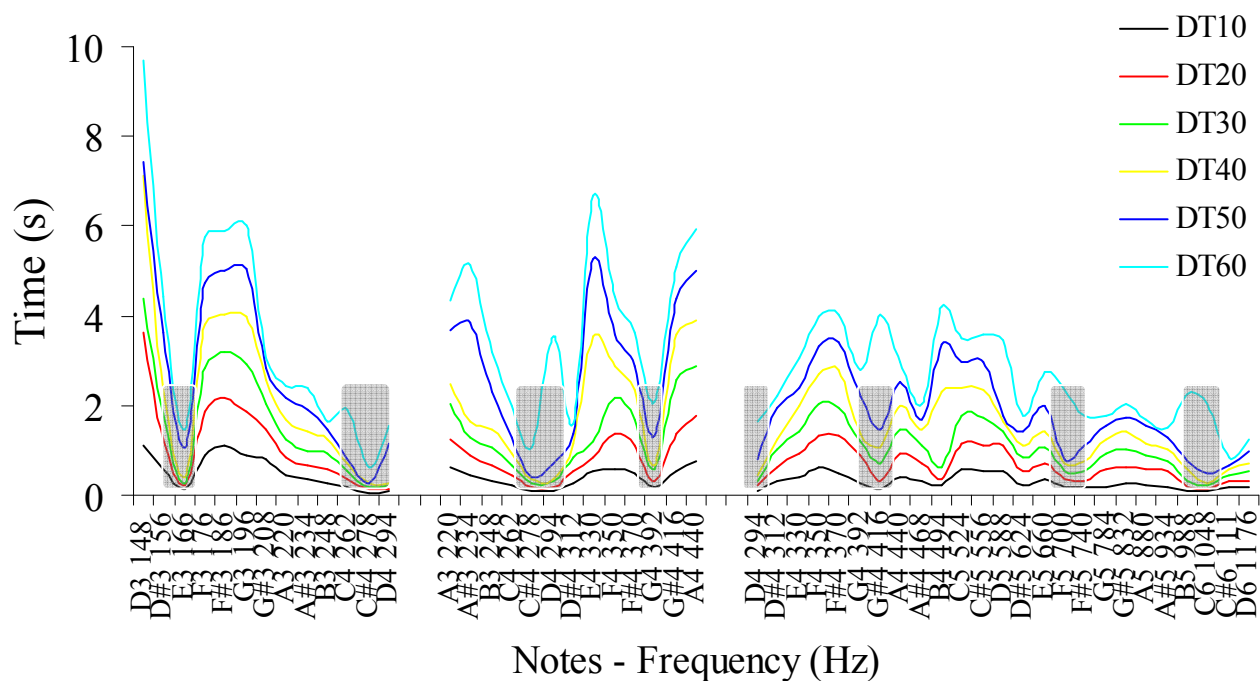
ρυθμός πτώσης είναι εκθετικός (γραμμικός στην κλίμακα των dB του διαγράμματος). Επίσης, στον πρώτο τρόπο δόνησης φαίνεται πως υπάρχει αυξομείωση της έντασης που αποδίδεται σε στην μικρή διέγερση που παρατηρήθηκε από τα 148Hz στο τρίχορδο μπουζούκι 1.

Αντίστοιχα φαινόμενα εντοπίζονται στην νότα D4 στην ομώνυμη χορδή όπου φαίνεται πως στην περιοχή της σύζευξης με τον (1,1)T ο ρυθμός πτώσης της έντασης είναι περίπου 80dB/s για τα πρώτα 0,5s ενώ στην συνέχεια «ομαλοποιείται» και η ένταση φθίνει με ρυθμό περίπου 13dB/s. Ωστόσο διακρίνεται καλύτερα από το γράφημα πως ακόμα και οι δύο αυτές τιμές δεν είναι αρκετές για να περιγράψουν με ακρίβεια την περιβάλλουσα έντασης στο σημείο σύζευξης. Αντίθετα, στους υπόλοιπους τρόπους δόνησης της χορδής όπου δεν υπάρχει κάποιος αντίστοιχα ισχυρός τρόπος στο καπάκι ώστε να δημιουργηθούν φαινόμενα ισχυρής αλληλεπίδρασης ο ρυθμός πτώσης της έντασης είναι περίπου εκθετικής μορφής με τον 4^ο αρμονικό (1176Hz) να επηρεάζεται λίγο από τον τρόπο δόνησης (3,4) και να έχει λίγο ταχύτερο ρυθμό πτώσης από τον 5^ο.



Εικόνα 4.18 : Περιβάλλουσες έντασης των αρμονικών (1-5) της νότας D4 στην ομώνυμη χορδή (294Hz)

Ωστόσο, η παρουσίαση όλων των αρμονικών στοιχείων και για όλες τις νότες που μελετήθηκαν απαιτεί τεράστιο χώρο λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού των δειγμάτων που καταγράφηκαν. Για τον λόγο αυτό όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της θεωρίας η ανάλυση πραγματοποιείται μαζικά και εξάγονται 6 διαφορετικές χρονικές τιμές που αντιστοιχούν στους χρόνους DT10 έως DT60 με βήμα 10. Η ανάλυση αυτή πραγματοποιείται τόσο για τις θεμελίους σε διάφορα δείγματα όσο και για ολόκληρες τις νότες. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι χρόνοι DT10 έως DT60 για τις θεμελίους 51 νοτών που απομονώθηκαν με χρήση ζωνοπερατού φίλτρου. Τα αρχικά δείγματα πάνω στα οποία πραγματοποιείται η ανάλυση προέρχονται από την καταγραφή στην θέση 1. Επίσης στο διάγραμμα σημειώνονται και οι περιοχές όπου εντοπίστηκαν οι ισχυρότεροι τρόποι δόνησης του τρίχορδου μπουζουκιού.



Εικόνα 4.19 : Οι χρόνοι DT10-60 για τις θεμελίους 51 νοτών. Οι σκοτεινές περιοχές βρίσκονται στις περιοχές των ισχυρότερων τρόπων δόνησης.

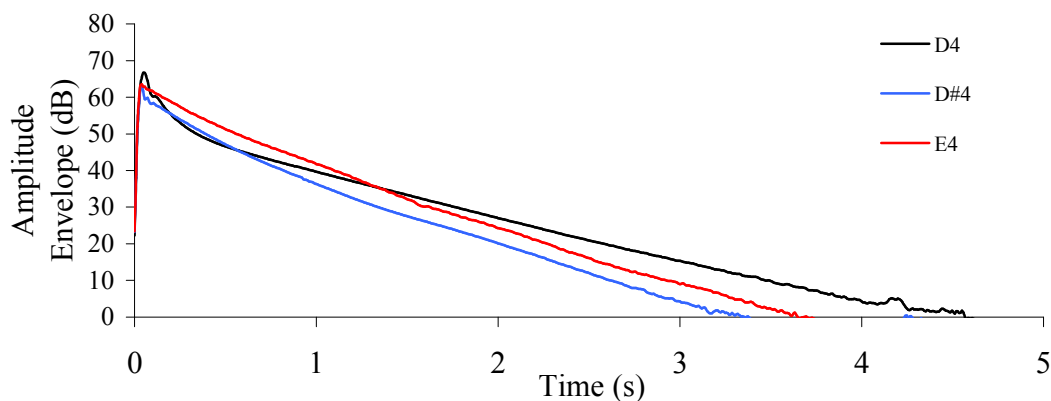
Στα διαγράμματα διακρίνονται οι σχέσεις που έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής για το τρίχορδο μπουζούκι 1. Ξεκινώντας με την χορδή D3 (146Hz) είναι εμφανές πως οι θεμέλιοι των νοτών που βρίσκονται γύρω από την αέρινη συχνότητα, (1,1)H, αλλά και γύρω από τον βασικότερο τρόπο δόνησης (1,1)T «εκτονώνουν» την ενέργειά τους με πολύ γρήγορο ρυθμό. Στην χορδή A3 αντίστοιχη συμπεριφορά εντοπίζεται γύρω από τον (1,1)T αλλά και στον (1,2) στα 400Hz περίπου επηρεάζοντας ουσιαστικά την συμπεριφορά του πρώτου αρμονικού της νότας G4. Ακόμα, στην χορδή D3 φαίνεται πως εκτός από τους βασικούς τρόπους δόνησης (1,1)T και (1,2), (1,3) και (3,1) στα 700 με 740Hz και (4,3) γύρω από τα 1050Hz, φαινόμενα γρήγορης απόσβεσης του πλάτους ταλάντωσης παρατηρούνται τόσο γύρω από τα 466Hz και 500Hz όσο και γύρω από τα 620Hz όπου με εξαίρεση τα 466Hz που βρίσκονται κοντά στον τρόπο (2,1) και θα μπορούσαν να επηρεάζονται από αυτόν στις υπόλοιπες περιοχές υπάρχει πολύ μικρή διέγερση.

Συμπεραίνεται από τις αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής πως στις περιοχές όπου υπάρχει ισχυρή σύζευξη χορδής καπακιού εμφανίζεται το φαινόμενο της «απώλειας θεμελίου» [46]. Με λίγα λόγια μετά από πολύ μικρό χρονικό διάστημα η θεμέλιος αποσβένει πλήρως και η ακουστική ενέργεια εκπέμπεται μόνο από τα αρμονικά υψηλότερα αρμονικά στοιχεία της εκάστοτε νότας που εντοπίζονται τα αντίστοιχα φαινόμενα.

Τέλος, από τα διαγράμματα φαίνεται και το χαρακτηριστικό της μη σταθερής απόσβεσης του πλάτους ταλάντωσης. Για παράδειγμα στην νότα D4 στην ομώνυμη χορδή όπου οι τιμές DT10-40

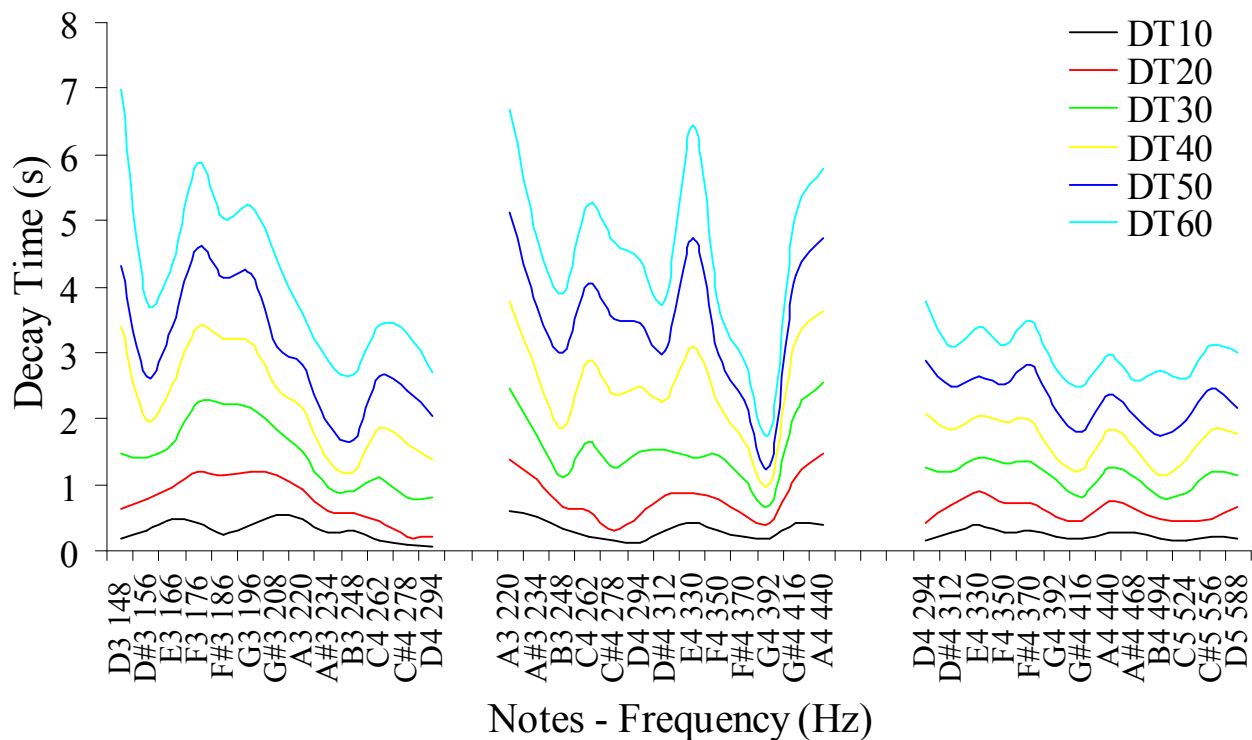
συγκεντρώνονται έως τα 0,5s ενώ οι χρονικές τιμές DT50 και DT60 βρίσκονται 0,78s και 1,63s αντίστοιχα (για την 2^η μέτρηση που δεν εμφανίζει μεγάλες διαφορές από την πρώτη).

Συνεχίζοντας με την ανάλυση της συνολικής περιβάλλουσας έντασης των νοτών που εκτελέστηκαν με μονές χορδές είναι προφανείς οι επιπτώσεις της ισχυρής σύζευξης των τρόπων δόνησης των χορδών με τους αντίστοιχους του οργάνου. Στις νότες για τις οποίες κάποιος αρμονικός συζεύγνυται με κάποιον τρόπο δόνησης και παρουσιάζει ισχυρή αύξηση της έντασής του εμφανίζεται αντίστοιχη αύξηση και στην συνολική περιβάλλουσα έντασης ανάλογη με την σχετική ένταση του αρμονικού με τα υπόλοιπα στοιχεία του φάσματος. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρατίθενται οι περιβάλλουσες έντασης 3ών νοτών που εκτελέστηκαν στην χορδή D4 όπου φαίνεται η επίδραση της απόσβεσης της θεμελίου στην συνολική περιβάλλουσα της νότας D4.



Εικόνα 4.20 : Περιβάλλουσες ένταση των νοτών D4, D#4 και E4 στην D4 χορδή.

Παρατηρείται από το διάγραμμα πως στην νότα D4 όπου υπάρχει ισχυρή σύζευξη της θεμελίου με τον βασικότερο τρόπο δόνησης του μπουζουκιού η συνολική ένταση φθίνει με πολύ ταχύ ρυθμό. Αντίθετα, όσο η περιοχή εκτέλεσης απομακρύνεται από τους ισχυρούς συντονισμούς τόσο πιο γραμμικός γίνεται ο ρυθμός πτώσης της έντασης (στην κλίμακα των dB). Ωστόσο, παρατηρώντας τις χρονικές τιμές DT10-60 για όλες τις νότες φαίνεται πως γενικά το τρίχορδο μπουζούκι είναι ένα όργανο το οποίο αποσβένει τα μεγαλύτερα ποσοστά της ενέργειάς του σε μικρό χρονικό διάστημα. Παρατηρείται από την εικόνα 4.21, που περιγράφει αυτήν την συμπεριφορά, πως γενικά στις περιοχές σύζευξης παρουσιάζονται μικρότεροι χρόνοι DT10 και DT20. Ωστόσο, η συνολική περιβάλλουσα έντασης κάθε νότας διαμορφώνεται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες αφού εκτός των σχέσεων σύζευξης με τα χαμηλότερα αρμονικά στοιχεία, υπάρχει προφανώς και η επίδραση των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται στο σύστημα.

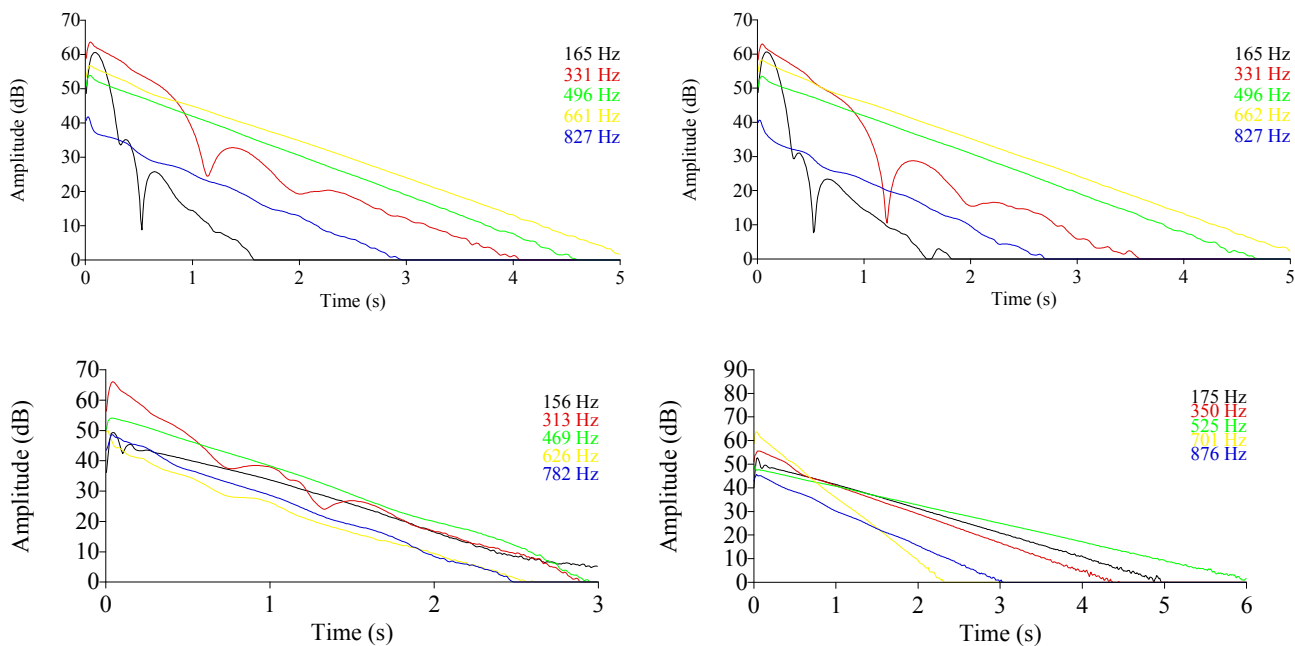


Εικόνα 4.21: Οι χρόνοι DT10-60 για 39 νότες εκτελεσμένες σε μονές χορδές στην θέση λήψης 1.

4.2.1.3 Φαινόμενα ακύρωσης

Σχετικά με τις περιβάλλουσες έντασης των αρμονικών στοιχείων των νοτών σχολιάστηκαν τα δύο βασικότερα φαινόμενα που εντοπίστηκαν: 1) Η απόσβεση του πλάτους ταλάντωσης σε δύο ή περισσότερα στάδια στις περιοχές σύζευξης και 2) η εκθετική απόσβεση του πλάτους στις συχνοτικές περιοχές όπου δεν εμφανίζονται τέτοιου είδους φαινόμενα.

Εκτός από αυτά σε μικρότερο αριθμό περιπτώσεων παρατηρούνται και μη γραμμικά φαινόμενα με την μορφή στιγμιαίας ακύρωσης του πλάτους κατά την διάρκεια της ταλάντωσης. Τα φαινόμενα αυτά μπορεί να οφείλονται τόσο στην μεταφορά ενέργειας από το καπάκι στην χορδή όσο και στην αλληλεπίδραση των 3^{ov} διαφορετικών διευθύνσεων ταλάντωσης της χορδής (κάθετης, παράλληλης προς το καπάκι και διαμήκους). Ωστόσο, η ακριβής αιτία εμφάνισής τους είναι δύσκολο να αποδοθεί ξεκάθαρα εάν οφείλεται καθαρά στην χορδή, στην σύζευξη με το καπάκι ή και στα δύο. Παρόλα αυτά, λόγω του ότι κατά την επανάληψη των μετρήσεων οι ακυρώσεις πλάτους εμφανίζονται στις περιοχές των ισχυρών τρόπων δόνησης και γύρω από αυτούς σε αυτό το στάδιο η πιο πιθανή αιτία είναι η σύζευξη της χορδής με τους τρόπους δόνησης του καπακιού.



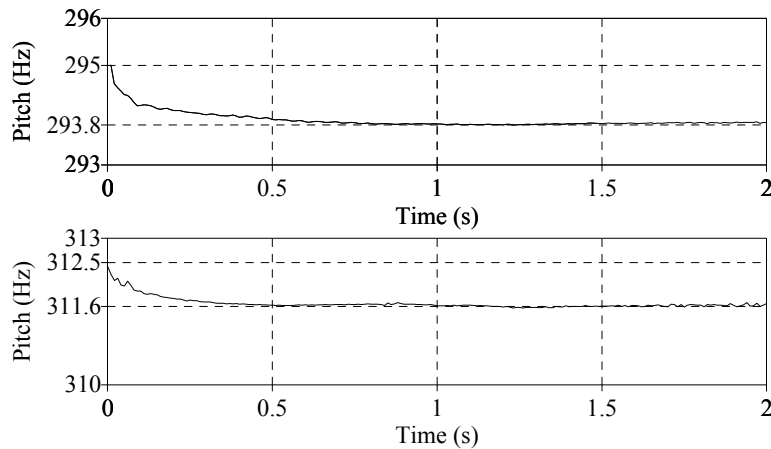
Εικόνα 4.22: Περιβάλλουσες αρμονικών για νότες στην χορδή D3. Η νότα E3 έχει επαναληφθεί (άνω διαγράμματα)

Ένα παράδειγμα στιγμιαίας ακύρωσης φαίνεται στην νότα E3 (165Hz) στην D3 χορδή όπου ο πρώτος τρόπος δόνησης της συζεύγνυται ισχυρά με τον (1,1)H του οργάνου. Ως αποτέλεσμα η ένταση φθίνει με ταχύ ρυθμό όπως είναι πλέον γνωστό (από τις σχέσεις σύζευξης) αλλά στα 0,5s ακυρώνεται στιγμιαία και στην συνέχεια ανακτά μικρά ποσοστά ενέργειας. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζεται και στον 2^ο αρμονικό (331Hz) που απέχει αρκετά από την κορυφή του (1,1)T στα 290Hz αλλά ωστόσο φαίνεται να επηρεάζεται από αυτόν καθώς οι στιγμιαίες αυτές ακυρώσεις πλάτους εμφανίζονται περίπου με τον ίδιο τρόπο και κατά την επανάληψη της εκτέλεσης. Στο διάγραμμα των αρμονικών της νότας D3# (156Hz) φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνεται η περιβάλλουσα έντασης του 2^{ου} αρμονικού λόγω της σύζευξης με τον (1,1)T ενώ στην νότα F3 (175Hz) όπου πλέον ο 2^{ος} αρμονικός απομακρύνεται αισθητά από της συχνότητα του τρόπου δόνησης ο ρυθμός πτώσης είναι ομαλός όπως και όλα τα αρμονικά στοιχεία με τον 4^ο αρμονικό (701Hz) που πλησιάζει στον (1,3) να έχει πολύ μεγαλύτερο ρυθμό πτώσης από τον 5^ο.

4.2.1.4 Διαμόρφωση τάσης

Όπως έχει αναφερθεί από την θεωρία οι διαμορφώσεις τάσης επηρεάζουν σημαντικά την σύζευξη μεταξύ των διαφορετικών διευθύνσεων ταλάντωσης δημιουργώντας μη γραμμικά φαινόμενα αλλά επιδρούν δραστικά και στο τονικό ύψος των νοτών το οποίο είναι ανάλογο με την διαμόρφωση αυτής.

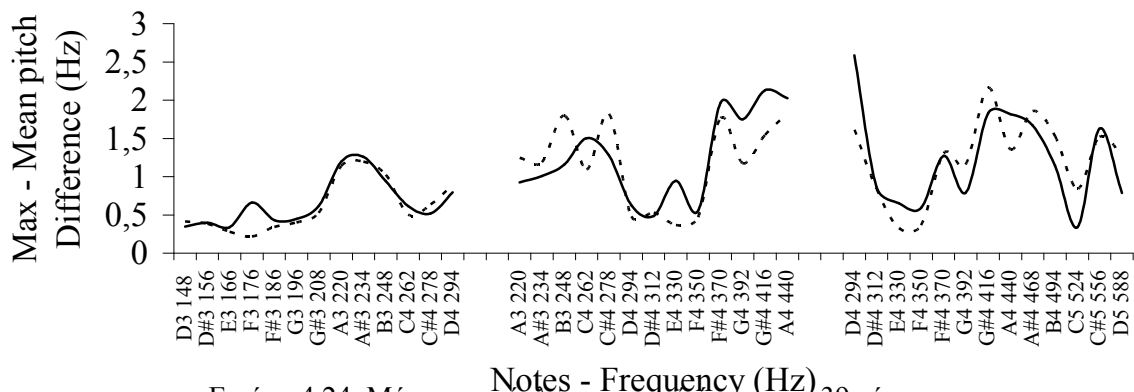
Παρατηρώντας το φαινόμενο στο τρίχορδο μπουζούκι 1 είναι εμφανές πως το τονικό ύψος μεταβάλλεται αντίστοιχα. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται οι περιβάλλουσες του τονικού ύψους για 2 νότες που βρίσκονται κοντά στις περιοχές των ισχυρών συντονισμών του οργάνου.



Εικόνα 4.23: Περιβάλλουσες τονικού ύψους για τις νότες D4 και D#4 στην D4 χορδή

Διακρίνεται από το την εικόνα 4.23 πως το τονικό ύψος των νοτών φθίνει εκθετικά ανάλογα με το πλάτος ταλάντωσης της χορδής. Τέτοιου είδους διαμορφώσεις υπάρχουν σε όλα τα έγχορδα μουσικά όργανα και διακατέχουν σημαντικό ρόλο στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ήχου. Είναι γνωστό πως μια μεταβολή δ στην συχνότητα της θεμέλιου μπορεί να προκαλέσει διαφορά $n\delta$ στον n τρόπο δόνησης της χορδής. Έτσι, όλα τα αρμονικά στοιχεία μεταβάλλονται δραστικά ανάλογα με την μεταβολή του ενεργού μήκους της χορδής που μεταβάλλει ανάλογα και την τάση αυτής. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να προκαλέσει σύνθετες αλληλεπιδράσεις όταν στο όργανο διεγείρονται περισσότερες από μια χορδές καθώς μικρές διαφορές στις συχνότητες των τρόπων δόνησης είναι ικανές να δημιουργήσουν έντονες διαμορφώσεις πλάτους.

Στην εικόνα που ακολουθεί αναγράφονται οι διαφορές μέγιστου αρχικού τονικού ύψους και μέσου τονικού ύψους στην διάρκεια 1-2s για 39 νότες που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές.



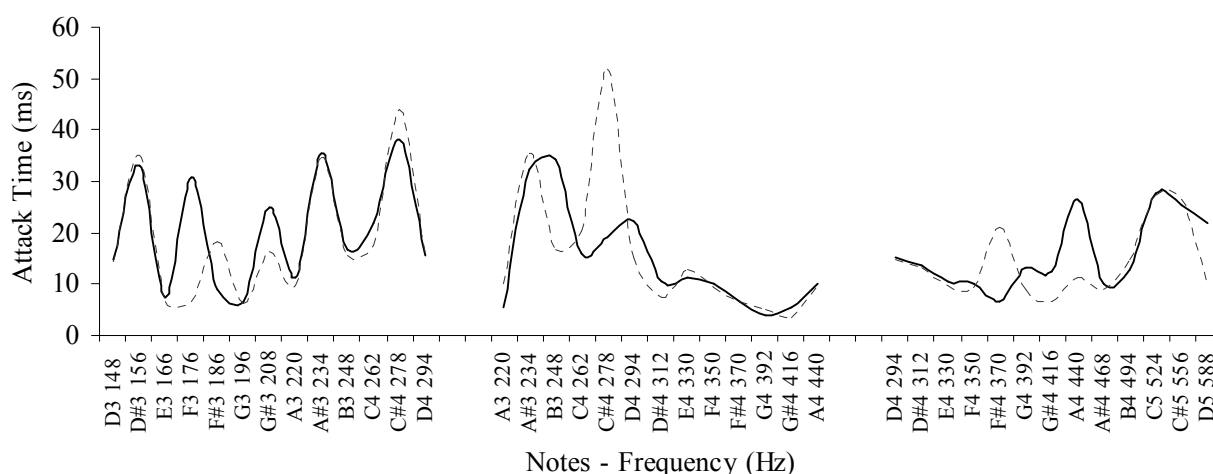
Εικόνα 4.24: Μέγιστη απόκλιση τονικού ύψους για 39 νότες

4.2.1.5 Χρόνοι ανόδου

Οι χρόνοι ανόδου των νυκτών μουσικών οργάνων είναι αρκετά μικροί σε σχέση με όργανα άλλων ομάδων όπως τα πνευστά και τα τοξωτά λόγω της στιγμιαίας απομάκρυνσης της χορδής από την πένα και αρκετές φορές μπορούν να συσχετιστούν με αντίστοιχους των κρουστών οργάνων. Ωστόσο, κατά την αρχή μιας νότας συμβαίνουν πολύπλοκα φαινόμενα σύζευξης καθώς μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα δύο διαφορετικής φύσεως δυνάμεις διεγείρουν το όργανο που όπως έχει αναφερθεί είναι : 1) Η στιγμιαία απομάκρυνση της χορδής από την πένα που έχει ως αποτέλεσμα την διέγερση του οργάνου με έναν τρόπο αντίστοιχο με την παλμική διέγερση και 2) η δύναμη διέγερσης στην γέφυρα που έχει την μορφή τετραγωνικού παλμού (στην «ιδανική» περίπτωση).

Έτσι, λόγω της στιγμιαίας φύσης της διέγερσης κατά την εκτέλεση μιας νότας στο όργανο διεγείρονται όλοι οι βασικοί τρόποι δόνησης και ηχοβολούν ανάλογα με την κατεύθυνση την δύναμη και την θέση διέγερσης. Αντίστοιχα, η ημιτονική οδήγηση από την χορδή έχει ως αποτέλεσμα μια αρκετά πιο πολύπλοκη διέγερση καθώς ανάλογα με τις συχνοτικές σχέσεις των τρόπων δόνησης χορδών-καπακιού δημιουργούνται φαινόμενα σύζευξης που επηρεάζουν τον ρυθμό με τον οποίο θα αυξηθεί η ένταση φθάνοντας στην μέγιστη τιμή της συνεπώς τους χρόνους ανόδου.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί εξάγονται οι χρόνοι ανόδου στις νότες που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές. Η ανάλυση πραγματοποιείται στην μακρινή ηχογράφιση (θέση 1) ενώ ως χρόνος ανόδου στην παρούσα εργασία θεωρείται ο χρόνος από την αρχή κάθε νότας έως την απόλυτη μέγιστη τιμή της κυματομορφής της.



Εικόνα 4.25: Χρόνοι ανόδου

4.2.2 Διπλές χορδές

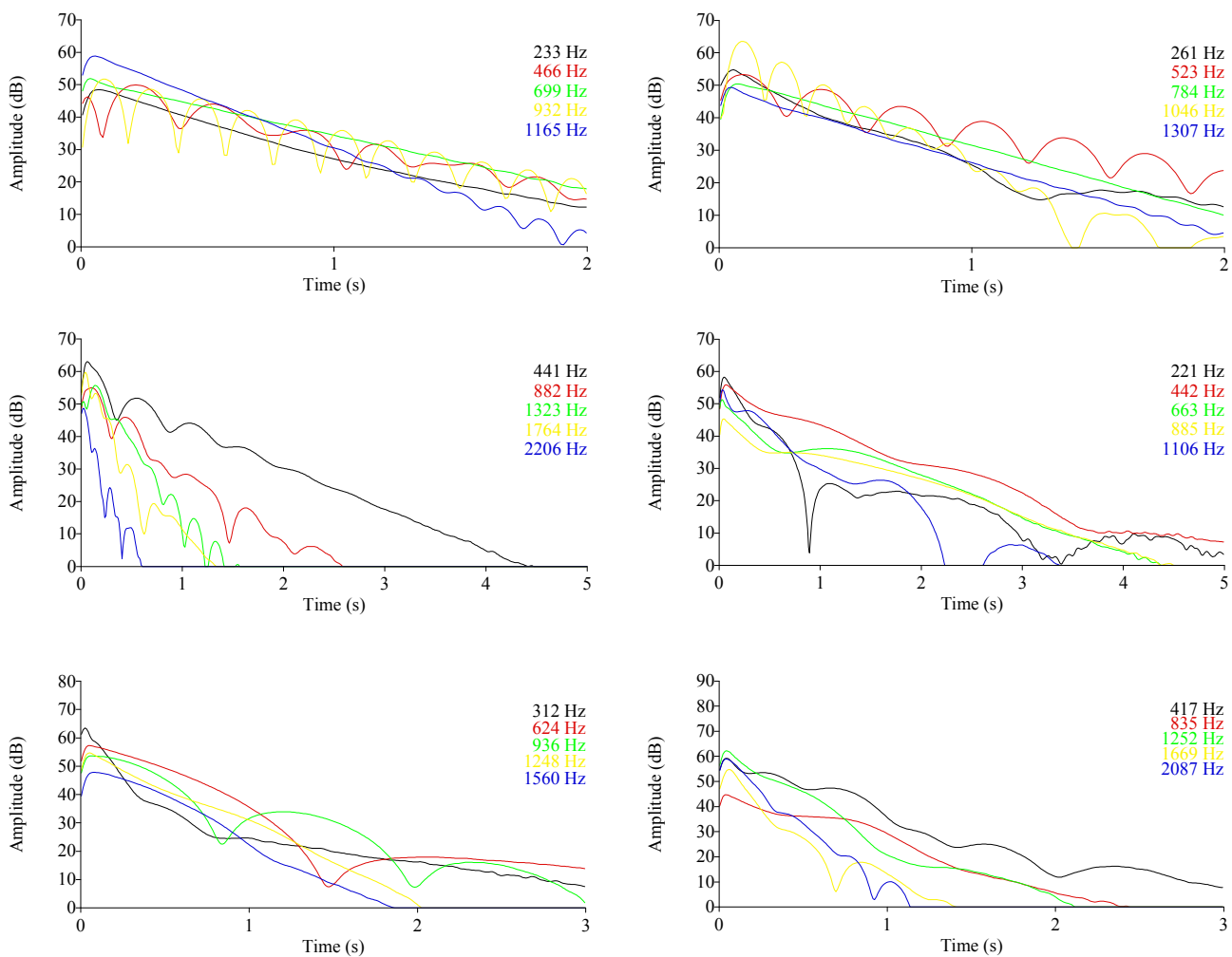
Τα ηχητικά χαρακτηριστικά και οι σχέσεις σύζευξης χορδής – καπακιού που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα αφορούν σε νότες που καταγράφηκαν με μονές χορδές. Ωστόσο, στην «πραγματική» τους κατάσταση τα όργανα ως γνωστόν εκτελούνται με διπλές χορδές. Χαρακτηριστικά όπως η διαμόρφωση της τάσης, η αναρμονικότητα, οι αλληλεπίδραση των διαφορετικών διευθύνσεων της κίνησης και φυσικά η σύζευξη με το καπάκι εμφανίζονται πλέον σε δύο σύνθετους ταλαντωτές που αλληλεπιδρούν διαμορφώνοντας το σύνθετο ηχώχρωμα που χαρακτηρίζει τα όργανα της οικογένειας του μπουζουκιού.

Ωστόσο, στην παρούσα εργασία επιμέρους χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα η διαμόρφωση τάσης της χορδής είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστούν και να μελετηθούν για κάθε χορδή λόγω αυτής της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης και της μη δυνατότητας ελέγχου του σήματος εισόδου. Αν υπήρχε κάποια ρομποτική διάταξη ώστε να μπορούν να ελεγχθούν παράμετροι όπως η γωνία διέγερσης, οι χρονικές διαφορές (ms) και οι σχετικές εντάσεις της αρχικής διέγερσης των και των δύο χορδών, η αλληλεπίδραση τους θα μπορούσε να μελετηθεί και ποσοτικά. Ωστόσο στα νυκτά μουσικά όργανα δεν εντοπίζονται ακόμα αξιόλογα και προπαντός προσβάσιμα συστήματα. Έτσι, πολλά από αυτά τα χαρακτηριστικά παραμένουν άγνωστα.

4.2.2.1 Αλληλεπίδραση διπλών χορδών

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό που εντοπίζεται στον ήχο των οργάνων είναι η διαμόρφωση του πλάτους ταλάντωσης ως αποτέλεσμα των συχνοτικών και φασικών διαφορών των τρόπων δόνησης των δύο χορδών που εμφανίζονται είτε με την μορφή διακροτημάτων είτε με την μορφή στιγμιαίας ακύρωσης του πλάτους ταλάντωσης ενός αρμονικού αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας την συμπεριφορά της περιβάλλουσας έντασης των διπλών χορδών με αντίστοιχες που περιγράφηκαν για μονές διακρίνεται από τις εικόνες πως η απόσβεση με εκθετικό ρυθμό δεν εντοπίζεται πλέον και σχεδόν πάντα υπάρχει διακύμανση (έστω και πολύ αργή) του πλάτους των αρμονικών. Ωστόσο, στις νότες που εκτελέστηκαν στην πιο μπάσα χορδή του οργάνου φαίνεται πως τα περιττά αρμονικά στοιχεία παρουσιάζουν την εκθετική μορφή πτώσης στα σημεία όπου δεν υπάρχει ισχυρή σύζευξη με κάποιον τρόπο δόνησης του καπακιού. Αυτή η παρατήρηση είναι λογική διότι όπως έχει αναφερθεί το χαμηλότερο ζεύγος των οργάνων είναι χορδισμένο στην οκτάβα (147Hz-294Hz).



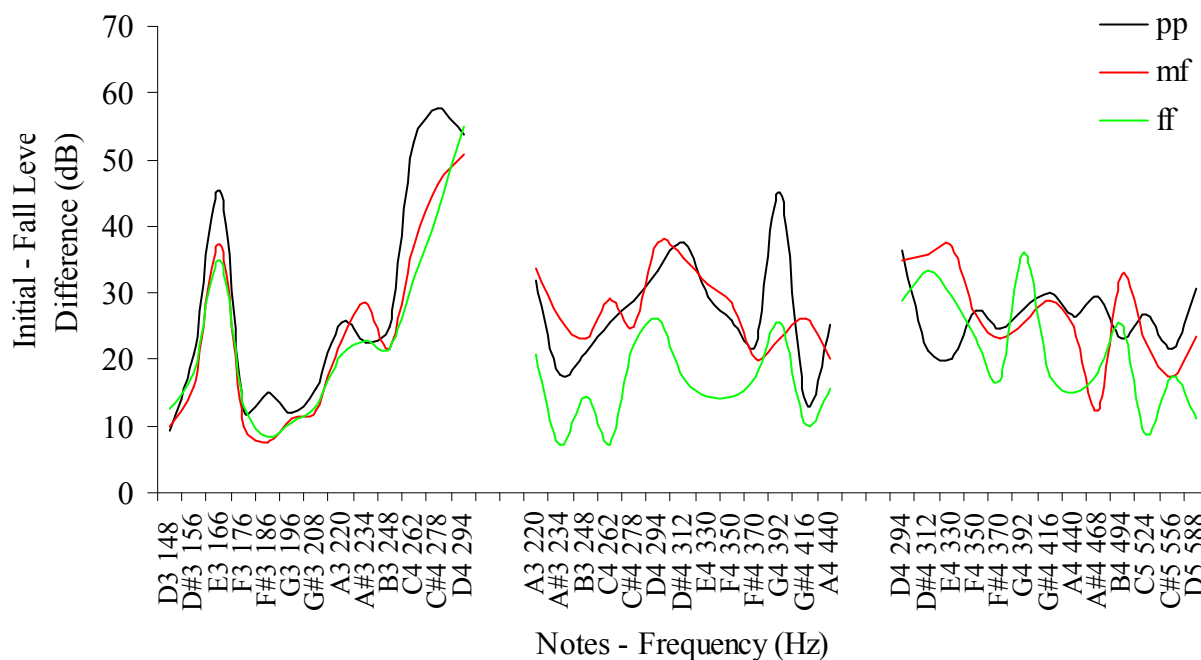
Εικόνα 4.26: Νότες σε διπλές χορδές στην D3 χορδή (233Hz και 261Hz) στην A3 χορδή (441Hz και 221Hz) και στην D4 χορδή (312Hz και 417Hz).

4.2.2.2 Σύζευξη διπλών χορδών και καπακιού

Οι χορδές εκτός από τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις συνδέονται και με τους ισχυρούς συντονισμούς των οργάνων με τρόπο αντίστοιχο με αυτόν που περιγράφηκε για τις μονές χορδές. Ωστόσο, η δύναμη μπορεί να είναι μεγαλύτερη (κατ' απόλυτη τιμή) και θεωρητικά να γίνει διπλάσια* αλλά και να μηδενιστεί στιγμιαία ανάλογα με την σχετική φάση ταλάντωσης των δύο χορδών. Ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνονται τα φαινόμενα σύζευξης παρατηρείται αρχικά με αντίστοιχο τρόπο όπως και στις μονές χορδές και οι διαφορές αρχικής έντασης και πτώσης έντασης

* Για να διπλασιαστεί το πλάτος της δύναμης που οδηγεί το καπάκι σε ταλάντωση θα πρέπει οι φασικές σχέσεις των τρόπων δόνησης των χορδών να είναι μηδενικές ώστε να μην υπάρχουν ακυρώσεις πλάτους αλλά και οι συχνότητές τους να ταυτίζονται απόλυτα ώστε να μην υπάρχουν διαμορφώσεις πλάτους. Αυτές οι συνθήκες είναι πρακτικά αδύνατο να υπάρξουν στα όργανα τουλάχιστον για αξιόλογο χρονικό διάστημα αφού τα χαρακτηριστικά της ταλάντωσης μεταβάλλονται συνεχώς με τον χρόνο.

συγκεντρώνονται στην συνέχεια για τις θεμελίους 117 νοτών για 39 νότες που εκτελέστηκαν σε 3 διαφορετικά δυναμικά επίπεδα.



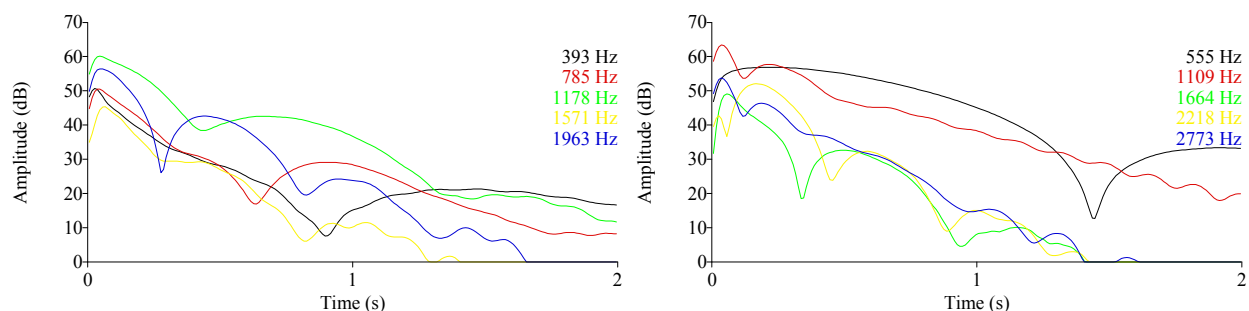
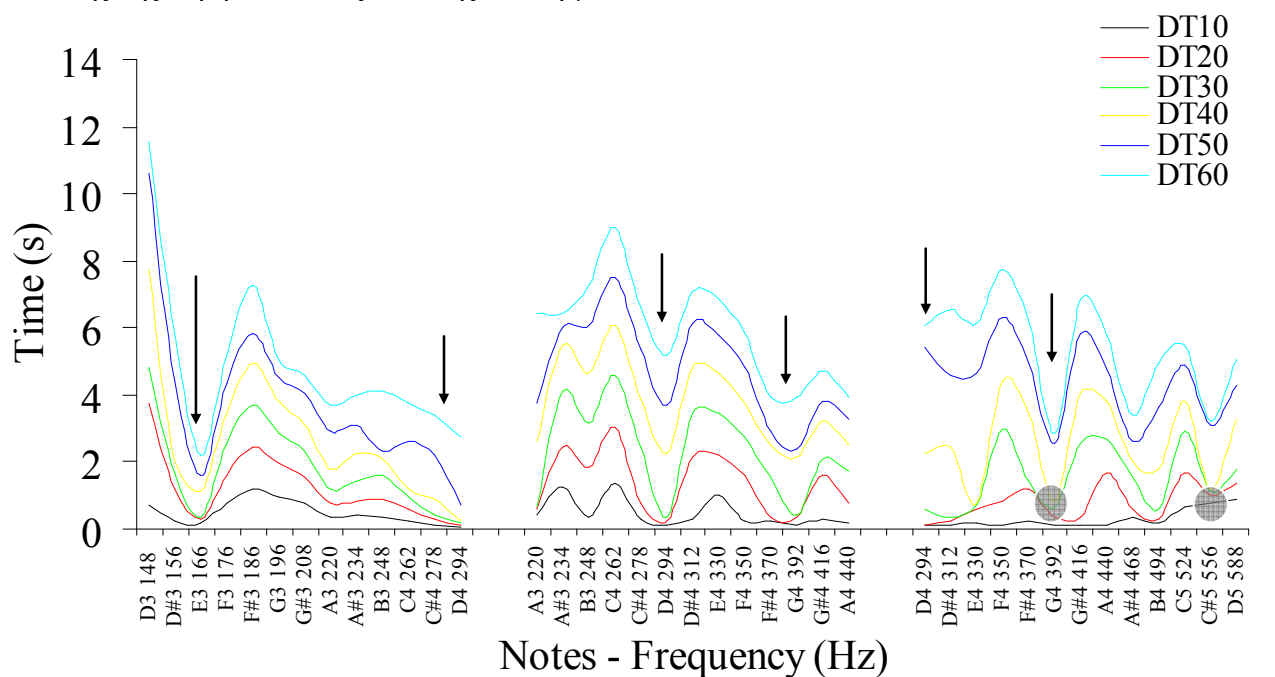
Εικόνα 4.27: Διαφορές αρχικής – πτώσης έντασης για νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές σε διαφορετικά δυναμικά επίπεδα που αναγράφονται στην εικόνα.

Στα διαγράμματα της εικόνας διακρίνονται σημαντικά χαρακτηριστικά της σύζευξης διπλών χορδών με τους βασικότερους τρόπους δόνησης του τρίχορδου μπουζουκιού 1:

1) Στην χορδή D3 δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες μεταβολές στις διαφορές αρχικής έντασης και έντασης πτώσης από τις αντίστοιχες με μονές χορδές. Αυτή η παρατήρηση είναι λογική όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα από την στιγμή που η δεύτερη χορδή του ζεύγους D3 είναι χορδισμένη σε διάστημα οκτάβας (D4). Έτσι η χορδή D3 «ανεπηρέαστη» όσο αφορά τις θεμελίους της συζεύγνται ισχυρά τόσο με τον (1,1)H όσο και με τον (1,1)T με μικρές μεταβολές που πιθανώς να οφείλονται σε διαφορετικούς παράγοντες που ελέγχει ο εκτελεστής παρά στην ύπαρξη της 2^{ης} χορδής, χωρίς ωστόσο να αποκλείεται κάτι τέτοιο.

2) Στις χορδές A3 και D4 όμως όπου τα ζεύγη είναι χορδισμένα σε ταυτοφωνία φαίνεται πως τα φαινόμενα της ισχυρής σύζευξης έχουν αμβλυνθεί κυρίως γύρω από τον τρόπο (1,1)T σε σχέση με τις μονές χορδές ενώ στον τρόπο (1,2) άλλοτε υπάρχει ισχυρή πτώση της έντασης και άλλοτε όχι. Πιο συγκεκριμένα διακρίνεται από την εικόνα 4.27 πως στις χορδές A3 και D4 στις θεμελίους που βρίσκονται γύρω από τον (1,1)T εμφανίζονται πτώσεις έντασης 20 με 40dB που είναι κατά πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες που εντοπίστηκαν στις μονές χορδές (50-60dB). Ωστόσο, παρατηρείται πως δεν συμβαίνει το ίδιο με τον τρόπο δόνησης (1,2) στα 400Hz όπου σε άλλες περιπτώσεις η πτώση πλάτους είναι μεγάλη και σε άλλες όχι.

Οι σχέσεις της σύζευξης διπλών χορδών και τρόπων δόνησης εμφανίζονται και στις περιβάλλουσες έντασης των θεμελιών 39 νοτών που εκτελέστηκαν σε διπλές χορδές στην θέση 1 σε μέση προς δυνατή ένταση (mf). Στο διάγραμμα σημειώνονται οι περιοχές των βασικών τρόπων δόνησης (με βέλη) και 2 επιπλέον περιοχές όπου εμφανίζεται διαμόρφωση του πλάτους ταλάντωσης με αποτέλεσμα οι χρονικές τιμές DT να εμφανίζονται σε πολύ κοντινές τιμές. Οι δύο αυτές επιπλέον περιοχές που σημειώνονται παρουσιάζονται αναλυτικά στην συνέχεια μέσω της ανάλυσης της περιβάλλουσας έντασης των αρμονικών.



Εικόνα 4.28: Οι χρόνοι DT10-60 για τις θεμελιούς (πρώτοι αρμονικοί) 39 νοτών εκτελεσμένες σε διπλές χορδές (mf) και δύο γραφήματα περιβάλλουσας αρμονικών που είναι σημειωμένες στο διάγραμμα (στην χορδή D4)

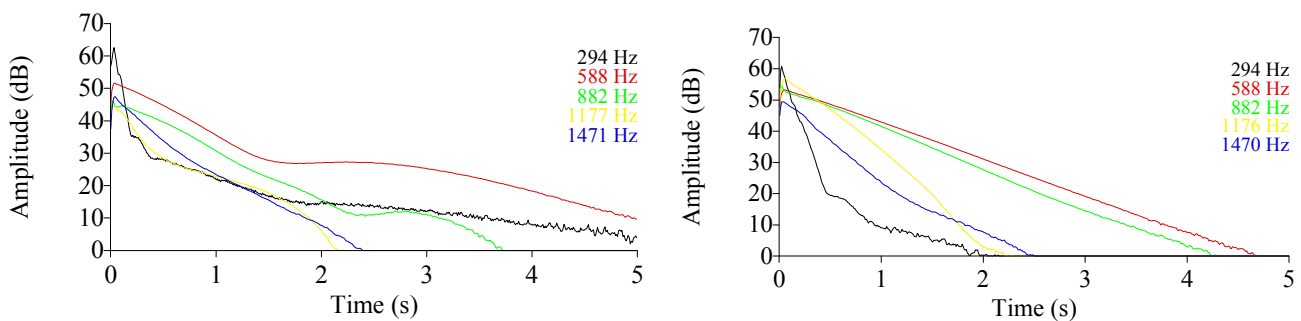
Από τα διαγράμματα φαίνεται πως η συμπεριφορά του ρυθμού απόσβεσης στην χορδή D3 είναι περίπου η ίδια με την αντίστοιχη των μονών χορδών. Στην χορδή A3 υπάρχει σύζευξη γύρω από τους τρόπους (1,1)Γ και (1,2) όπως και στις μονές χορδές με την ενέργεια να εκτονώνεται πιο ομαλά στο σύνολό της. Στην χορδή D3 υπάρχει ταχεία απόσβεση στους αντίστοιχους τρόπους αλλά και στην θεμέλιο της νότας A#4 (468Hz) που αποδίδεται στον (2,1) λόγω του ότι η συμπεριφορά αυτή εντοπίστηκε και σε αντίστοιχες μετρήσεις σε μονές χορδές. Ωστόσο, στην νότα C#5 (558Hz)

όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας δεν υπάρχει κάποιος τρόπος δόνησης αλλά η αλληλεπίδραση των δύο χορδών προκαλεί αργή διαμόρφωση του πλάτους ταλάντωσης και έτσι φαίνεται πως η θεμελίος αποσβένει με ταχύ ρυθμό χωρίς ωστόσο κάτι τέτοιο να ισχύει στο σύνολο της διάρκειάς της.

Ένα επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό στο οποίο διαφέρει η συμπεριφορά των οργάνων με διπλές χορδές είναι η αύξηση της συνολικής διάρκειας όλων των θεμελίων ανεξάρτητα από το αν συζεύγγονται με κάποιο τρόπο δόνησης του καπακιού ή όχι. Αυτή η αύξηση της διάρκειας χαρακτηριστικά εμφανίζεται και στις θεμελίους της D3 χορδής γεγονός που δείχνει πως η συνολική ενέργεια στο σύστημα αυξάνεται από την ύπαρξη διπλών χορδών ανεξαρτήτως με την συχνότητα στην οποία είναι χορδισμένη. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε να αναφερθεί πως αν προστεθούν και οι συμπαθητικές χορδές του οργάνου οι οποίες είναι μονωμένες κατά την διάρκεια των μετρήσεων ίσως η διάρκεια αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Ωστόσο μετρήσεις με όλα τα ζεύγη των χορδών ελεύθερα δεν πραγματοποιήθηκαν για νέτες πλήρους διάρκειας.

Αν και οι χρόνοι DT του διαγράμματος περιγράφουν σε μεγάλο βαθμό το πώς διαμορφώνονται οι περιβάλλουσες των θεμελίων λόγω της σύζευξης στην συνέχεια παρατίθενται κάποια διαγράμματα από την ανάλυση της περιβάλλουσας έντασης των αρμονικών.

Αρχικά παρατίθεται η νότα D3 στην ομώνυμη χορδή ενώ δίπλα αντιπαρατίθεται η ίδια νότα σε μονές χορδές.

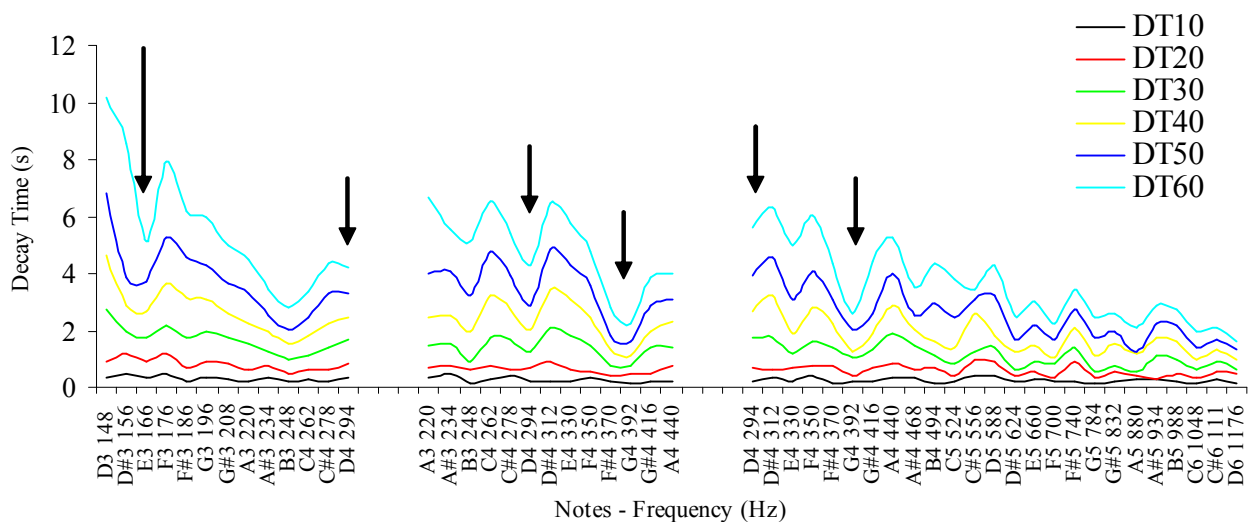


Εικόνα 4.29: Η νότα D4 της ομώνυμης χορδής εκτελεσμένης με διπλές (αριστερά) και μονές χορδές (δεξιά).

Διακρίνεται από το διάγραμμα πως ο ρυθμός απόσβεσης της θεμελίου είναι πιο γρήγορος από ότι στην μονή χορδή. Ωστόσο, ήδη από τα 0,2s η ενέργεια στο σύστημα αρχίζει να «σταθεροποιείται» και φθίνει με πολύ ομαλό ρυθμό έως και τα 6,3s (στην εικόνα φαίνονται τα πρώτα 5s για λόγους ευκρίνειας) σε αντίθεση με την μονή χορδή που έχει χάσει 60dB από την έντασή της ήδη στα πρώτα 2s.

Φαίνεται λοιπόν σε αυτό το στάδιο πως η επίδραση των διπλών χορδών σε σχέση με τους τρόπους δόνησης του καπακιού έχει ως αποτέλεσμα την μείωση φαινομένων πολύ μεγάλης μείωσης του πλάτους ταλάντωσης χωρίς ωστόσο να επηρεάζουν τον ρυθμό πτώσης κατά το αρχικό στάδιο που αντιθέτως φαίνεται να αυξάνεται όταν αλληλεπιδρούν και οι δύο χορδές κοντά σε έναν τρόπο δόνησης του οργάνου.

Παρατηρώντας τις συνολικές περιβάλλουσες έντασης για 39 νότες εκτελεσμένες σε μέση ένταση στην θέση 1 φαίνεται πως ενώ οι συνολικές διάρκειες έχουν αυξηθεί σε σχέση με τις μονές χορδές υπάρχουν σημαντικές σχέσεις με τις περιοχές όπου συμβαίνουν οι σημαντικότεροι συντονισμοί του οργάνου που σημειώνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



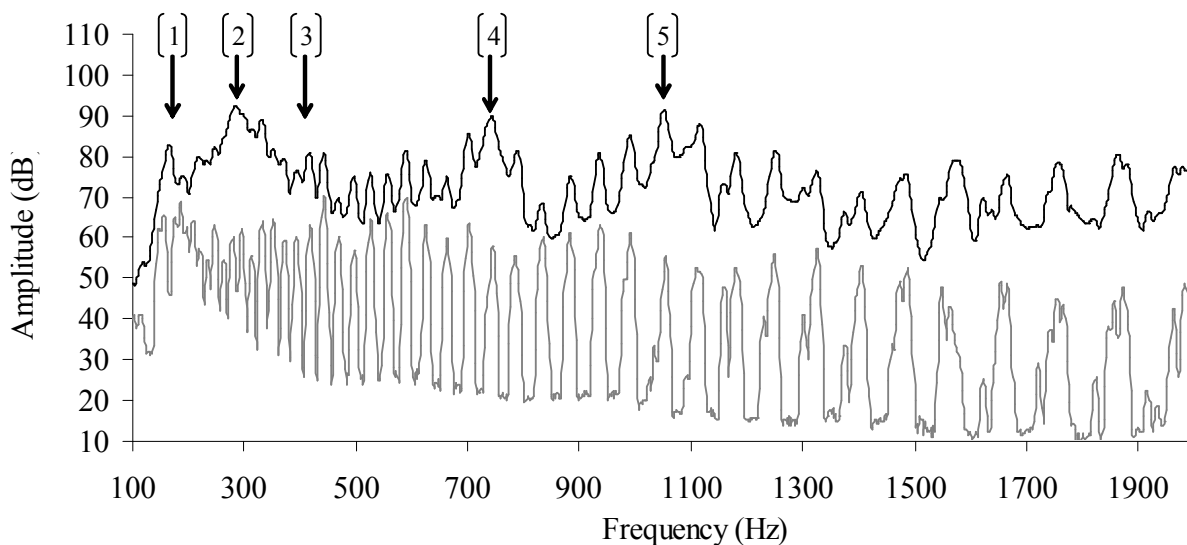
Εικόνα 4.30: Οι χρόνοι DT10-60 για 51 νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές (mf)

Ωστόσο, όπως και στις μονές χορδές έτσι κι εδώ αναφέρεται πως η συνολική περιβάλλουσα έντασης δεν εξαρτάται μόνο από τα φαινόμενα σύζευξης των χορδών με τους ισχυρούς τρόπους δόνησης παρότι δείχνει πως στις συγκεκριμένες περιοχές οι νότες αποσβένουν με ταχύτερο ρυθμό. Τέλος, γύρω από τα 248Hz εμφανίζονται χαρακτηριστικά ταχείας πτώσης της έντασης χωρίς ωστόσο να εντοπίζεται κάποιος ισχυρός τρόπος δόνησης.

4.2.2.2 Ενεργειακές κατανομές

Έχοντας περιγραφεί κάποια από τα βασικότερα χαρακτηριστικά που παρατηρούνται στον ήχο των οργάνων με διπλές χορδές στο πεδίο του χρόνου δεν έχει γίνει μια εκτίμηση του κατά πόσο μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά της κατανομής ενέργειας ανά συχνότητα που δίδει μια μέση εκτίμηση για τα αρχικά πλάτη των αρμονικών των νοτών. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρατίθενται αντίστοιχα οι φασματικοί μέσοι όροι της αρχικής ενέργειας και της ενέργειας πτώσης

για 39 νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές με μέση προς δυνατή ένταση (mf) στην θέση 2. Σημειώνονται επίσης οι 5 περιοχές όπου εμφανίζονται οι ισχυρότεροι τρόποι δόνησης του οργάνου.



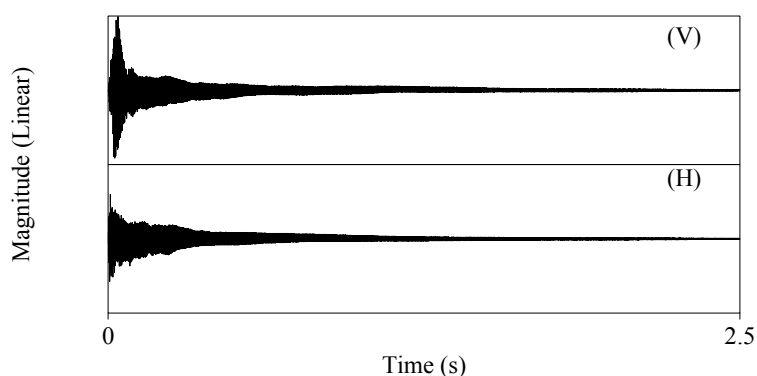
Εικόνα 4.31: Φασματικός μέσος όρος για τις 39 νότες που εκτελέστηκαν σε διπλές χορδές για δύο χρονικά στιγμιότυπα που αντιστοιχούν στην αρχική ενέργεια και στην ενέργεια πτώσης (mf στην θέση 2). Σημειώνονται επίσης στο γράφημα οι 5 περιοχές που σημειώνονται οι βασικότεροι τρόποι δόνησης του τρίχορδου μπουζουκιού.

Μία πρώτη παρατήρηση που διεξάγεται από το διάγραμμα αρχικής ενέργειας είναι ότι παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά με τα αντίστοιχα των μονών χορδών. Στις 5 περιοχές παρατήρησης με εξαίρεση για ακόμα μια φορά την περιοχή (3) στα 400Hz όπου υπάρχουν τα δίπολα (1,2) και (2,1) λίγο υψηλότερα, συγκεντρώνονται τα τοπικά μέγιστα ποσοστά ενέργειας σε σχέση με τις γειτονικές τους. Παρατηρώντας τον τρόπο που εξελίσσεται η κατανομή της ενέργειας στο συχνοτικό εύρος φαίνεται το αναμενόμενο με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες αναλύσεις: Το διάγραμμα ενέργειας πτώσης (1s μετά το αρχικό) δεν παρουσιάζει «βυθίσματα» ή καλύτερα τοπικά ελάχιστα γύρω από τις περιοχές των τρόπων δόνησης που δείχνει έτσι και στο πεδίο της συχνότητας πως η σύζευξη των δύο χορδών συμβάλει ενεργά στην διατήρηση μεγαλύτερων ποσοστών ενέργειας ταλάντωσης στο όργανο.

Εκτός όμως από το ίδιο το όργανο που παρουσιάζει αρκετά πολύπλοκη συμπεριφορά όταν αλληλεπιδρούν και οι δύο χορδές, ο οργανοπαίκτης μπορεί να ελέγξει την αρχική διέγερση διαμορφώνοντας τα χαρακτηριστικά του ήχου.

4.2.2.3 Γωνία διέγερσης

Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά που μπορεί να ελέγξει ο οργανοπαίκτης είναι η κατεύθυνση με την οποία διεγείρει αρχικά την κατεύθυνση. Είναι γνωστό από την θεωρία πως λόγω των διαφορετικών τρόπων με τους οποίους διεγείρεται το καπάκι η σύζευξη με την χορδή είναι διαφορετική σε κάθε κατεύθυνση. Για παράδειγμα, ο τρόπος δόνησης (1,1)T είναι λογικό να διεγείρεται περισσότερο όταν ο εκτελεστής δίδει μια κάθετη κλίση στην χορδή ως προς το καπάκι κατά την αρχική διέγερση. Αντίθετα, όταν ο οργανοπαίκτης διεγείρει την χορδή παράλληλα με το καπάκι τότε η αρχική διεύθυνση διέγερσης είναι κάθετη της διεύθυνσης που δονείται ο συγκεκριμένος τρόπος και έτσι η συνισταμένη δύναμη που τον οδηγεί είναι πολύ μικρή. Το φαινόμενο αυτό είναι εμφανές στην νότα D4 της ομώνυμης χορδής σε κάθετη και παράλληλη προς το καπάκι διέγερση.

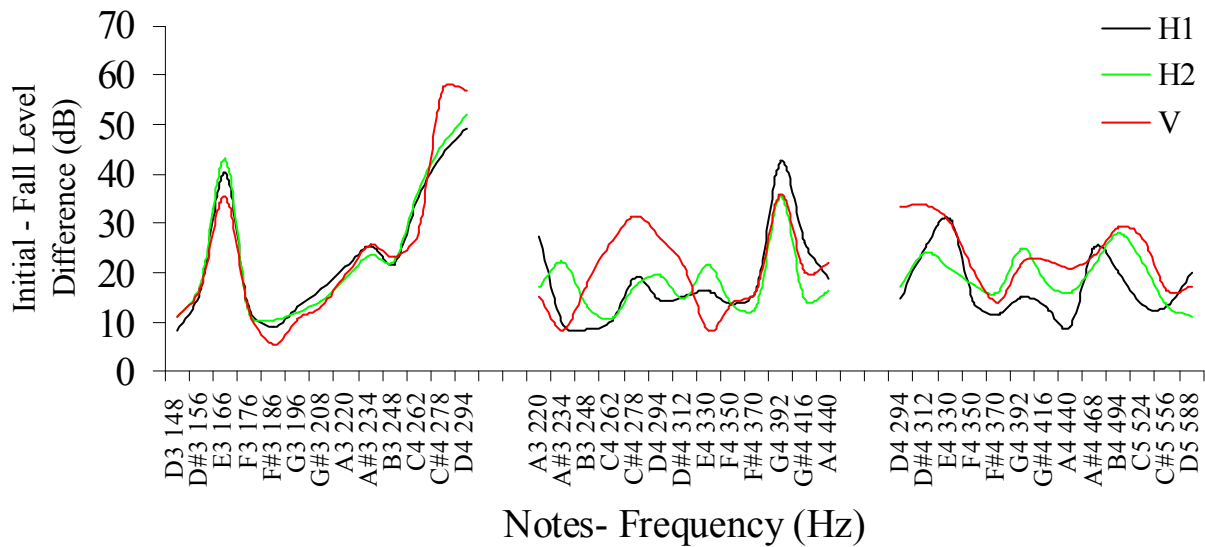


Εικόνα 4.32: η νότα D4 στην ομώνυμη χορδή με κάθετη (V) και παράλληλη (H) ως προς το καπάκι διέγερση.

Από τις δύο κυματομορφές της νότας φαίνεται πως ο οργανοπαίκτης μπορεί να επιδράσει στον τρόπο με τον οποίο συζεύγνυνται χορδή και καπάκι όπου ουσιαστικά στην παράλληλη διέγερση (H) δεν διεγείρεται καθόλου ο τρόπος δόνησης (1,1)T και η νότα παρουσιάζει ομαλή πτώση του πλάτους ταλάντωσης σε αντίθεση με την κάθετη (V). Το φαινόμενο αυτό ισχύει γενικά για την κυματομορφή κάθε νότας όταν διεγείρεται παράλληλα ή κάθετα στο καπάκι αλλά στην συγκεκριμένη περίπτωση όπου υπάρχει ισχυρή σύζευξη της θεμελίου με τον ισχυρότερο τρόπο δόνησης του οργάνου είναι ακόμα πιο έντονο.

Συγκεντρώνοντας της διαφορές αρχικής και έντασης και πτώσης έντασης για νότες που εκτελέστηκαν στις δύο ακραίες γωνίες φαίνεται πως τα χαρακτηριστικά της σύζευξης διαμορφώνονται από την γωνία διέγερσης κυρίως γύρω από τον τρόπο (1,1)T. Ωστόσο, η αλληλεπίδραση των δύο χορδών φαίνεται να επηρεάζει δραστικά την συμπεριφορά στους

υπόλοιπους τρόπους δόνησης δημιουργώντας αρκετά φαινόμενα διαμόρφωσης πλάτους και έτσι δεν μπορούν να διεξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.



Εικόνα 4.33: Διαφορές αρχικής – πτώσης έντασης για νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές με κάθετη προς το καπάκι διέγερση (V) και παράλληλη (H1) με την μέθοδο να επαναλαμβάνεται (H2).

Φαίνεται από τα διαγράμματα πως οι θεμέλιοι των νοτών που εκτελέστηκαν με κάθετη διέγερση (V) έχουν μεγαλύτερη διαφορά αρχικής-πτώσης έντασης γύρω από τον τρόπο (1,1)T και στις τρεις χορδές ενώ γύρω από τον (1,2) στα 400Hz υπάρχει ισχυρή σύζευξη στην χορδή A3 και πιο ομαλή στην D4.

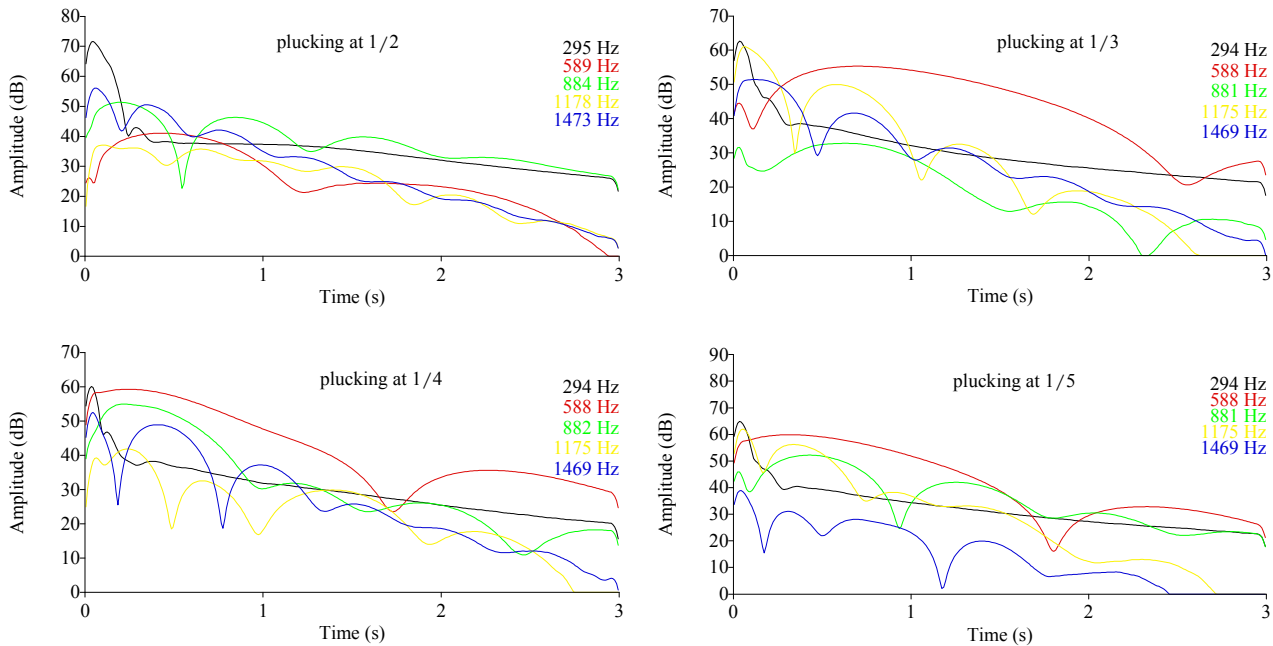
4.2.2.4 Θέση διέγερσης

Εκτός από την γωνία διέγερσης ο εκτελεστής μπορεί να μεταβάλει τα χαρακτηριστικά του ήχου ανάλογα με την θέση της πέννας κατά μήκος της χορδής. Είναι γνωστό από την θεωρία τα αρμονικά στοιχεία που αντιστοιχούν σε ακέραια πολλαπλάσια του λόγου μήκους χορδής προς απόσταση διέγερσης από την γέφυρα (L/h) δεν θα διεγερθούν (στην ιδανική περίπτωση).

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η νότα D3 της ομώνυμης χορδής που εκτελείται σε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος της χορδής ($1/2L$, $1/3L$, $1/4L$, $1/5L$). Παρατηρώντας τα αρχικά πλάτη ταλάντωσης των αρμονικών διακρίνονται τα αναμενόμενα. Όταν η χορδή διεγείρεται στο $1/2$ του μήκους της οι άρτιοι αρμονικοί (589Hz και 1178Hz) έχουν τα μικρότερα πλάτη ταλάντωσης. Αντίστοιχα τα μικρότερα αρχικά πλάτη ταλάντωσης εμφανίζονται στο τρίτο αρμονικό στην θέση $1/3$, στον 4^ο αρμονικό στην θέση $1/4$ και στον 5^ο στην θέση διέγερσης $1/5$. Ωστόσο, παρότι οι αρμονικοί αυτοί εμφανίζονται με μικρότερο πλάτος ποτέ δεν είναι δυνατό να «ακυρωθούν» στην πραγματικότητα αφού η μεταφορά ενέργειας μεταξύ των συζευγμένων ταλαντωτών του

συστήματος έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται με αξιόλογο πλάτος ταλάντωσης λίγα ms μετά την αρχή της εκάστοτε νότας.

Επίσης, ο πρώτος αρμονικός εμφανίζεται κατά πολύ μεγαλύτερο πλάτος μόνο στην θέση $\frac{1}{2}$, στο σημείο δηλαδή όπου ο αντίστοιχος τρόπος δόνησης της χορδής έχει το μέγιστο πλάτος (κοιλία) δείχνοντας το ότι ο οργανοπαίκτης μπορεί να διαμορφώσει δραστικά τα σχετικά πλάτη των αρμονικών μεταβάλλοντας την θέση διέγερσης.

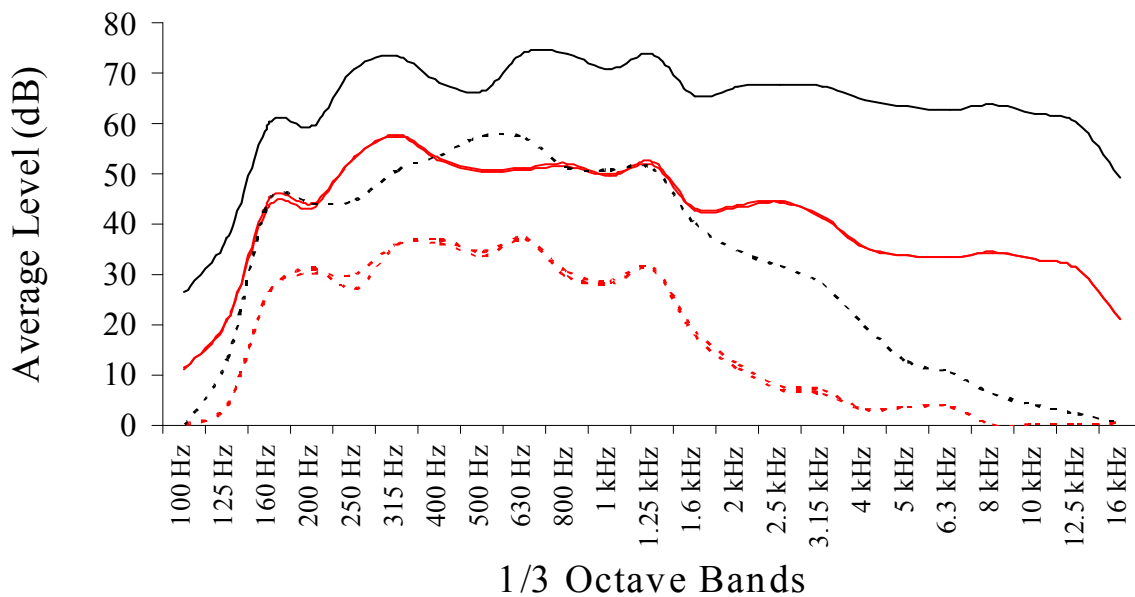


Εικόνα 4.34: Η νότα D4 της ομώνυμης χορδής εκτελεσμένη σε διαφορετικές θέσης κατά μήκος της χορδής (1/2, 1/3, 1/4 και 1/5)

Σχολιάζοντας τα φαινόμενα σύζευξης ανάλογα με την θέση διέγερσης δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες μεταβολές. Το πλάτος του ταλάντωσης μειώνεται με ταχύ ρυθμό στην αρχή και η ταλάντωση «σταθεροποιείται» στην συνέχεια. Ωστόσο, οι σύζευξη των διπλών χορδών φαίνεται και εδώ να επιδρά σημαντικά αφού τα εντονότερα φαινόμενα που παρατηρούνται αφορούν σε διαμορφώσεις του πλάτους ταλάντωσης.

4.2.2.4 Δυναμικά επίπεδα

Ο οργανοπαίκτης εκτός από την θέση διέγερσης και την γωνία αυτής μπορεί να ελέγξει τα χαρακτηριστικά του ήχου μεταβάλλοντας την δυναμική της διέγερσης. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα χαρακτηριστικά της φασματικής περιβάλλουσας για 39 νότες σε ανάλυση τριτοκτάβας για δύο δυναμικά επίπεδα (p-ff).

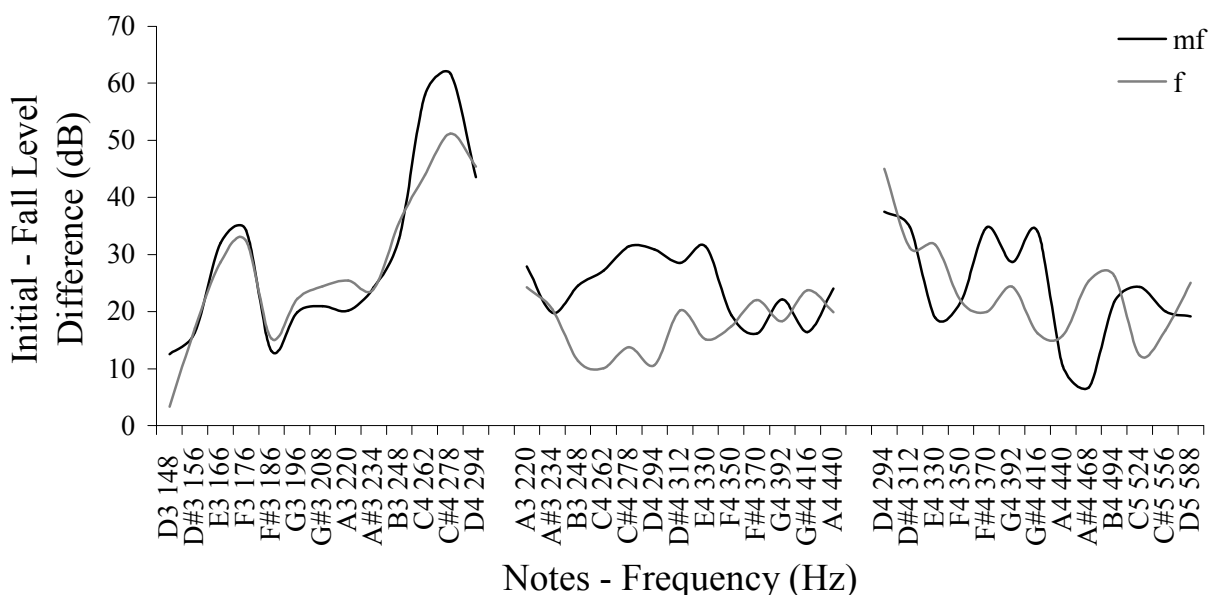


Εικόνα 4.35: Ενεργειακές κατανομές για 39 νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές στην θέση λήψης 1 με ανάλυση τριτοκτάβας και για διαφορετικά δυναμικά επίπεδα: πολύ χαμηλή ένταση (pp) και πολύ δυνατή (ff). Με διακεκομμένες γραμμές παρατίθενται τα αποτελέσματα της επανάληψης των μετρήσεων.

Από τα διαγράμματα φαίνεται πως η κατανομή της έντασης στα υψηλότερα στοιχεία του φάσματος είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των χαμηλότερων όταν το όργανο εκτελείται με πολύ δυνατή ένταση (ff) από ότι με χαμηλή (p). Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά της σύζευξης γύρω από τον τρόπο δόνησης (1,1)T φαίνονται και στους δύο μέσους όρους και κατά την διαδικασία της επανάληψης στην χαμηλή ένταση φαίνεται να υπάρχει μεγάλη ακρίβεια στον μέσο όρο.

4.3 Τρίχορδο μπουζούκι 2- Ήχος και δονήσεις

Τα βασικότερα δονητικά χαρακτηριστικά των δύο μπουζουκιών που παρουσιάστηκαν στις πρώτες παραγράφους της παρούσας ενότητας παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες. Για τον λόγο αυτό, αντίστοιχες ομοιότητες είναι αναμενόμενες και στα ηχητικά χαρακτηριστικά των δύο οργάνων. Σημειώνοντας αντίστοιχες σχέσεις σύζευξης στο τρίχορδο μπουζούκι 2 για διπλές χορδές φαίνεται πως στην χορδή D3 η συμπεριφορά είναι περίπου η ίδια με αυτήν του τρίχορδου μπουζουκιού 1. Οι μεγαλύτερες διαφορές αρχικής-πτώσης έντασης εντοπίζονται και σε αυτό το όργανο στις περιοχές του συντονισμού της αέρινης συχνότητας (1,1)H που βρίσκεται στα 176Hz και του (1,1)T που εντοπίστηκε περίπου στα 290Hz αντίστοιχα. Ωστόσο στις χορδές A3 και D4 φαίνεται πως η αλληλεπίδραση των διπλών χορδών είναι σημαντική και έτσι στην χορδή A3 δεν εντοπίζεται κάποια συγκεκριμένη κορυφή ενώ στην χορδή D3 φαίνεται εκτός από την σύζευξη με τον (1,1)T λίγο μεγαλύτερη απόσβεση γύρω από τον (1,2) που στο τρίχορδο μπουζούκι 2 εντοπίστηκε στα 400Hz επίσης.

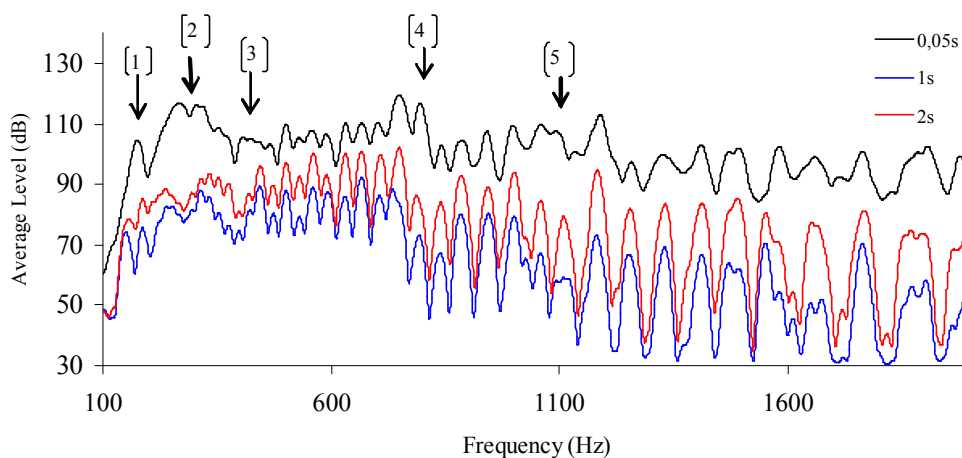


Εικόνα 4.36: Διαφορές αρχικής – πτώσης έντασης για νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές σε διαφορετικά δυναμικά επίπεδα που αναγράφονται στην εικόνα.

Παρατηρώντας αντίστοιχα φασματικούς μέσους όρους σε διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα για 39 νότες εκτελεσμένες σε μέση προς δυνατή ένταση (mf) στην θέση 1 εντοπίζονται αντίστοιχες σχέσεις.

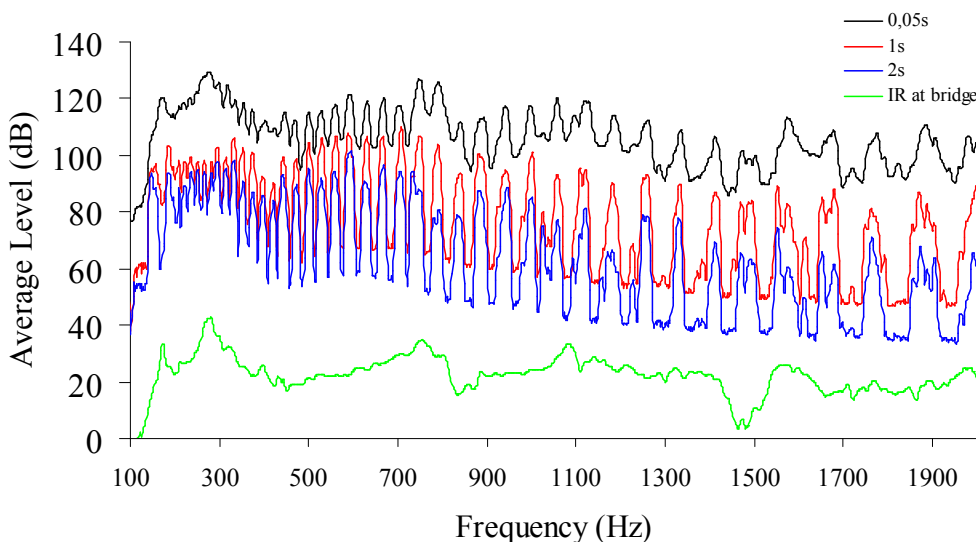
Η αρχική ενέργεια παρουσιάζει τοπικά μέγιστα στις περιοχές όπου εντοπίζονται οι ισχυροί τρόποι δόνησης του οργάνου με εξαίρεση για ακόμα μια φορά την περιοχή που εμφανίζονται οι τρόποι δόνησης (1,2) και (2,1). Παρατηρώντας την πτώση ενέργειας στις αντίστοιχες περιοχές φαίνεται πως υπάρχουν τοπικά ελάχιστα που είναι αποτέλεσμα της σύζευξης αλλά ωστόσο

υπενθυμίζεται πως η αλληλεπίδραση των διπλών χορδών δεν επιτρέπει την εμφάνιση «βυθισμάτων» αντίστοιχων με αυτά που παρατηρήθηκαν στο μπουζούκι 1 στην ανάλυση των μονών χορδών.



Εικόνα 4.37: Φασματικός μέσος όρος για τις 39 νότες που εκτελέστηκαν σε διπλές χορδές για 3 χρονικά στιγμιότυπα που αντιστοιχούν στην αρχική ενέργεια και στην ενέργεια πτώσης και στην ενέργεια 2s μετά την αρχική (mf στην θέση 1). Σημειώνονται επίσης στο γράφημα οι 5 περιοχές που σημειώνονται οι βασικότεροι τρόποι δόνησης του τρίχορδου μπουζουκιού.

Αντίστοιχες σχέσεις αρχικής ενέργειας και ενέργειας πτώσης στην θέση 2 φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί όπου αντιπαρατίθεται και το διάγραμμα ενός μέσου όρου συχνοτικών αποκρίσεων που προκύπτουν από 30 κρούσεις στην γέφυρα.

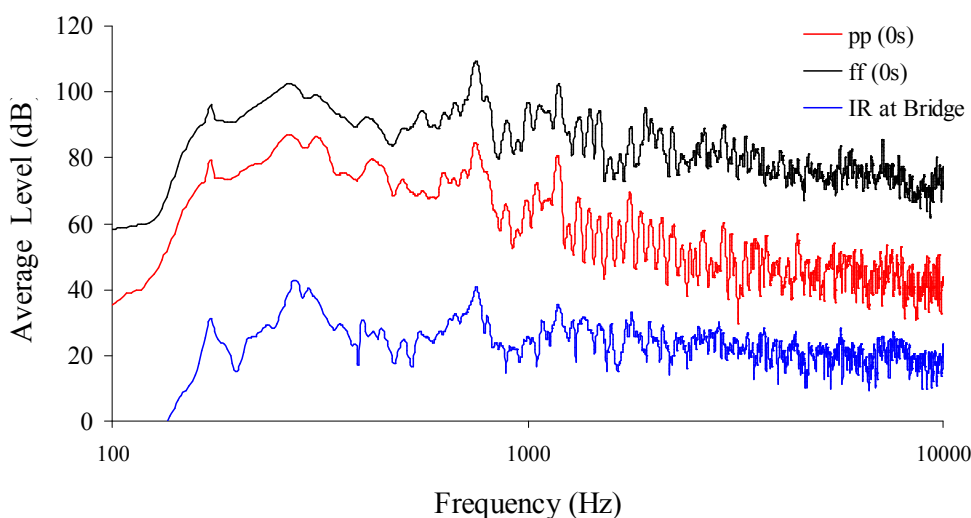


Εικόνα 4.38: Φασματικός μέσος όρος σε 3 χρονικά στιγμιότυπα για τις 39 νότες που εκτελέστηκαν σε διπλές χορδές (mf στην θέση 2). Με πράσινο ο φασματικός μέσος όρος 30 κρουστικών αποκρίσεων στην γέφυρα με κάθετη φορά προς το καπάκι.

Η πολύ καλή σχέση μεταξύ του μέσου όρου κρουστικών αποκρίσεων και γραφημάτων μέσου φάσματος δείχνει πως και στο τρίχορδο μπουζούκι 2 η αρχική ενέργεια διαμορφώνεται από τα ακουστικά χαρακτηριστικά του οργάνου όπως αναμένονταν. Ο ρυθμός πτώσης της ενέργειας είναι μεγαλύτερος στις περιοχές όπου υπάρχουν ισχυροί τρόποι δόνησης αλλά οι αλληλεπίδραση του ζεύγους χορδών διατηρεί μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας στο όργανο και έτσι η απόσβεση γίνεται πιο ομαλά.

Βέβαια, όπως έχει αναφερθεί ο βαθμός με τον οποίο μπορεί να συσχετιστεί η κρουστική απόκριση με την ενεργειακή κατανομή στο συχνοτικό φάσμα του ήχου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η γωνία διέγερσης και η θέση κατά μήκος της χορδής που μπορεί να μεταβάλλει δραστικά τα σχετικά πλάτη των αρμονικών της κάθε νότας. Ένας ακόμα παράγοντας είναι η δυναμική με την οποία εκτελούνται οι νότες στα όργανα.

Έτσι στην εικόνα που ακολουθεί (4.39) φαίνεται ο φασματικός μέσος όρος για 39 νότες εκτελεσμένες με διπλές χορδές σε δύο δυναμικά επίπεδα, ένα πολύ χαμηλής και ένα πολύ υψηλής έντασης (pp και ff αντίστοιχα), για το τρίχορδο μπουζούκι 2.

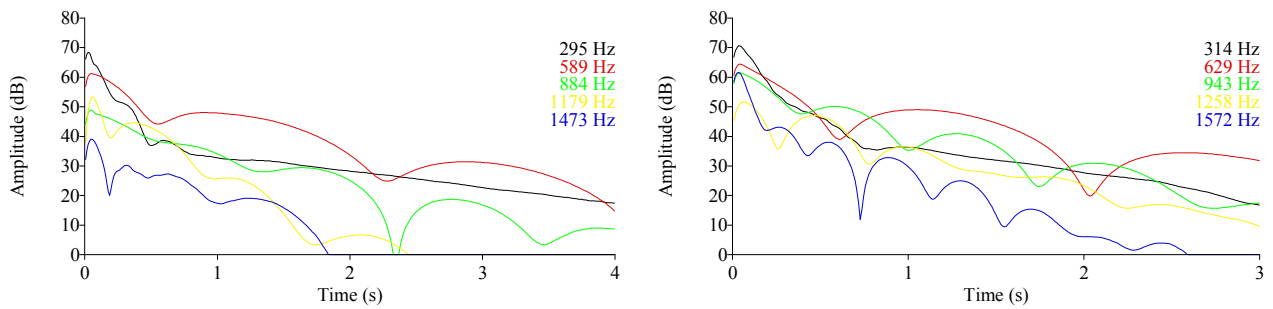


Εικόνα 4.39: Αρχική ενεργειακή κατανομή για 39 νότες που εκτελέστηκαν σε διπλές χορδές στα 2 «ακραία» δυναμικά επίπεδα (θέση 1). Με μπλε ο φασματικός μέσος όρος 20 κρουστικών αποκρίσεων στην γέφυρα με κάθετη φορά προς το καπάκι.

Διακρίνεται στα γραφήματα πως οι κρουστικές αποκρίσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό συσχέτισης στις σχετικές εντάσεις των βασικότερων τρόπων δόνησης με το μέσο φάσμα αρχικής ενέργειας για τις νότες που εκτελέστηκαν σε χαμηλή δυναμική. Ένα χαρακτηριστικό επίσης που παρατηρείται και πρέπει να σημειωθεί είναι πως στα διαγράμματα της αρχικής ενέργειας παρατηρείται αρκετά μεγάλη συγκέντρωση ενέργειας γύρω από τα 400-470Hz όπου βρίσκονται οι τρόποι δόνησης (1,2) και (2,1), χωρίς ωστόσο να συγκρίνεται με την κατανομή της ενέργειας γύρω

από τα 700-780Hz όπου ο (3,1) σχηματίζει ξεκάθαρη κορυφή τόσο στα φάσματα του ήχου όσο και του μέσου όρου της κρουστικής απόκρισης.

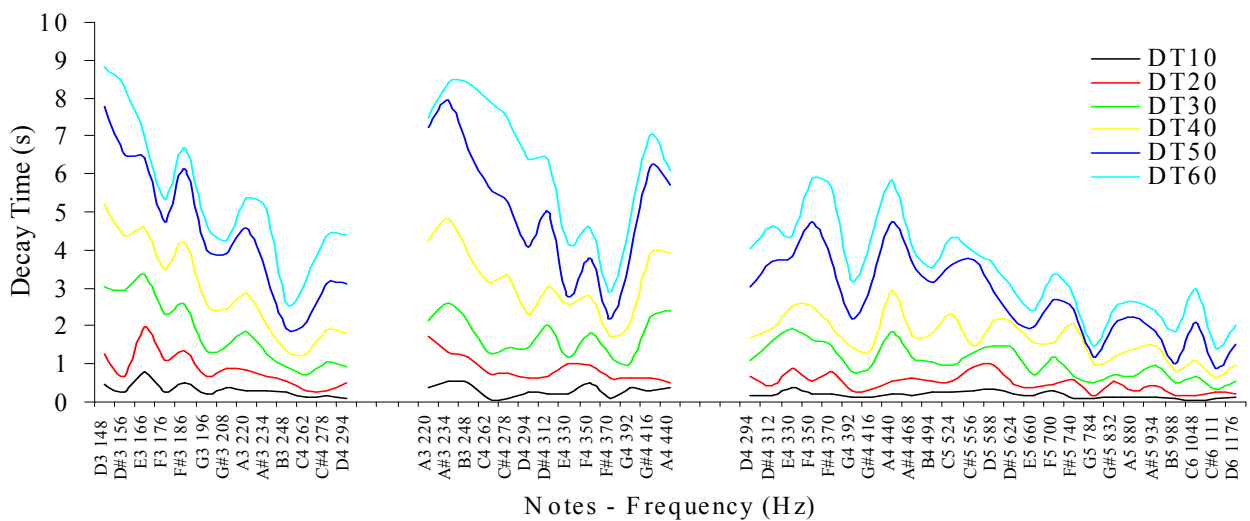
Σχολιάζοντας τα φαινόμενα σύζευξης στο πεδίο του χρόνου δεν φαίνεται να παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές στην βασική συμπεριφορά που όπως παρατηρείται σε περιβάλλουσες έντασης γύρω από τις περιοχές όπου το όργανο παρουσιάζει την ισχυρότερη αλληλεπίδραση με τις χορδές.



Εικόνα 4.40: Περιβάλλουσες αρμονικών για νότες στην χορδή D4 και D#4 στην χορδή D4 (mf-διπλές χορδές-θέση 1)

Στις νότες D4 και D#4 στην D4 χορδή φαίνεται στην θεμέλιο η σύζευξη με τον (1,1)T του τρίχορδου μπουζουκιού 2. Χαρακτηριστικά επίσης είναι τα φαινόμενα διαμόρφωσης πλάτους στις υπόλοιπες συχνότητες όπου δεν εντοπίζεται κάποιος ισχυρός τρόπος δόνησης πλην του 4^{ου} αρμονικού της νότας D4 που βρίσκεται κοντά λίγο πιο πάνω από τον (3,4)₂.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται οι χρόνοι DT10 έως 60 για τις συνολικές περιβάλλουσες έντασης 39 νοτών που εκτελέστηκαν με μέση ένταση στην θέση 1 όπου παρατηρούνται παρόμοιες σχέσεις με το τρίχορδο μπουζούκι 1.



Εικόνα 4.41: Οι χρόνοι DT10-60 για 51 νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές (mf - θέση 1)

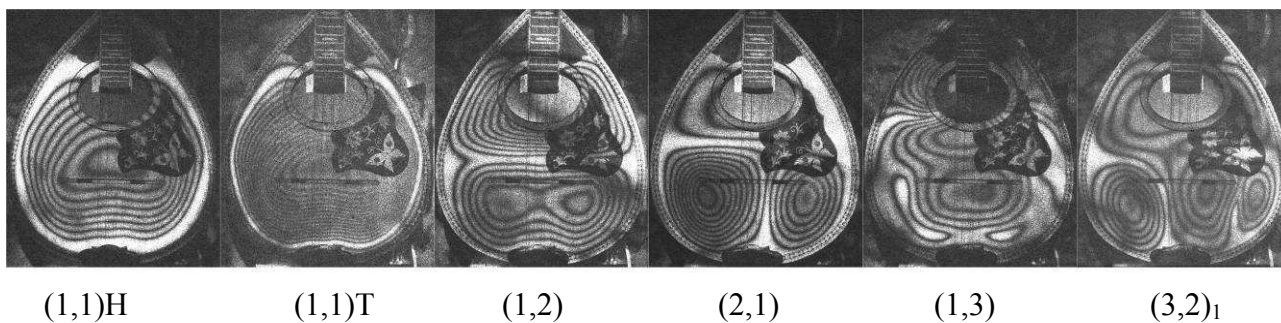
Γενικά, στις περιοχές όπου σημειώνεται κάποιος ισχυρός τρόπος δόνησης εμφανίζεται γρηγορότερη απόσβεση των μεγαλύτερων ποσοστών της έντασης και κυρίως στους χρόνους DT10 - DT30. Ωστόσο, οι πλήρης απόσβεση της κάθε νότας απέχει κατά πολύ περισσότερο και αυτό δείχνει ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του ήχου του μπουζουκιού, το ότι οι νότες ηχούν με μεγάλη ένταση στην αρχή που αποσβένει γρήγορα και στην συνέχεια υπάρχει αρκετά μεγάλη διάρκεια αλλά σε πολύ χαμηλότερες στάθμες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΤΕΤΡΑΧΟΡΔΟ ΜΠΟΥΖΟΥΚΙ (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ)

5.1 Δονητικά χαρακτηριστικά

Το τετράχορδο μπουζούκι παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με το τρίχορδο όσο αφορά στους βασικούς τρόπους δόνησης με 1,2, και 3 εστίες ταλάντωσης. Ωστόσο, στις υψηλότερες συχνότητες και κυρίως μετά τα 800Hz εντοπίζονται σημαντικές διαφορές. Παρά τις ανομοιότητες στον σχηματισμό των υψηλότερων τρόπων δόνησης το χαρακτηριστικό που φαίνεται να διαφοροποιεί περισσότερο το τετράχορδο μπουζούκι από τα τρίχορδα είναι οι συχνότητες συντονισμού των βασικών τρόπων δόνησης που αποκλίνουν σημαντικά.

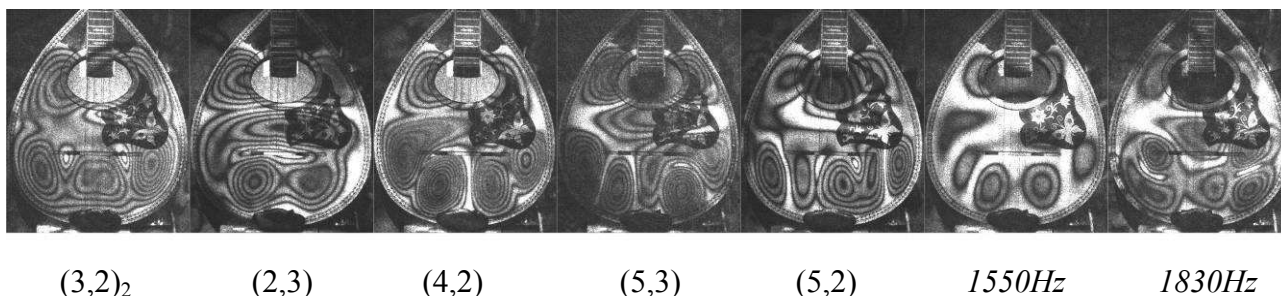


Εικόνα 5.1: Οι βασικότεροι τρόποι δόνησης του τετράχορδου μπουζουκιού

Ο συντονισμός της αέρινης συχνότητας (1,1)H εντοπίζεται στα 176Hz ενώ ο επόμενος και ισχυρότερος τρόπος δόνησης, ο (1,1)T, εντοπίζεται στα 330Hz. Ο τρόπος δόνησης (1,2) βρίσκεται στα 510Hz. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί αυτόν τον τρόπο δόνησης από τον αντίστοιχο των τρίχορδων μπουζουκιών είναι πως ο δεσμός ταλάντωσης που σχηματίζεται στο κέντρο του οργάνου είναι αρκετά υψηλότερα από το σημείο στο οποίο τοποθετείται η γέφυρα και ως αποτέλεσμα υπάρχει εμφανώς αυξημένο πλάτος ταλάντωσης γύρω από αυτήν. Στην συνέχεια εμφανίζεται ο τρόπος (2,2) στα 550Hz σχηματίζοντας 2 δεσμούς ταλάντωσης στο καπάκι. Στην περιοχή από τα 580Hz έως και τα 680Hz το πλάτος ταλάντωσης στο καπάκι του οργάνου είναι πολύ μικρό και ο επόμενος τρόπος δόνησης εμφανίζεται στα 750Hz με την μορφή (1,3). Επόμενος τρόπος είναι ο (3,2) που εμφανίζεται 2 φορές και στο τετράχορδο μπουζούκι. Στην εικόνα... φαίνεται ο (3,2)₁ στα εντοπίστηκε στα 830Hz.

Συνεχίζοντας την διέγερση του οργάνου μετά τα 830Hz εμφανίζεται στα 920Hz ο (3,2)₂ ωστόσο, το πλάτος διέγερσης αυξάνεται καθώς οι τρόποι δόνησης από αυτήν την περιοχή έως και τα 2KHz δεν αποκρίνονται τόσο εύκολα όσο οι χαμηλότεροι σε συχνότητα. Χαρακτηριστική διαφορά

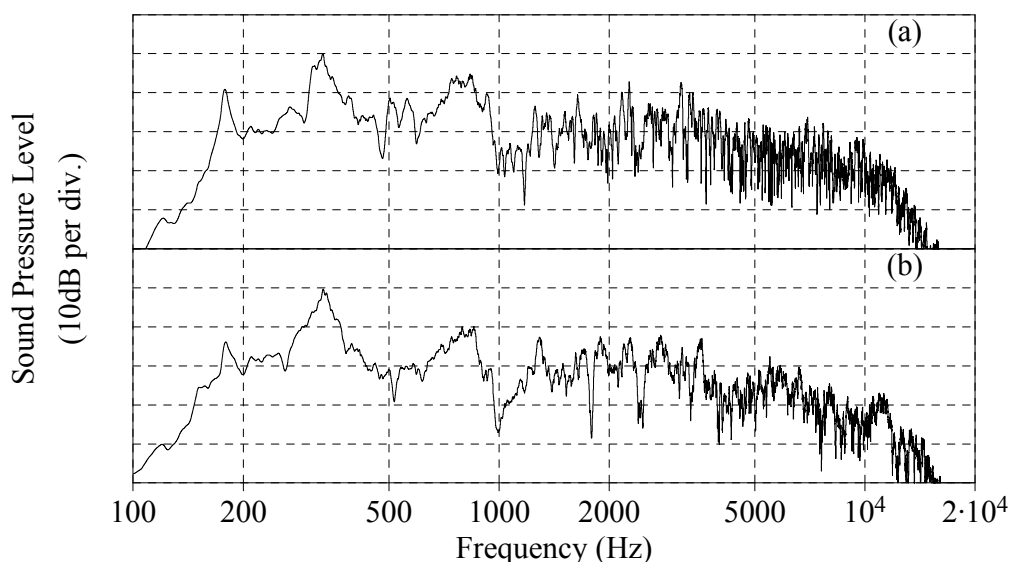
ανάμεσα στο τετράχορδο και τα τρίχορδα μπουζούκια σχετικά με τους τρόπους με τρεις εστίες δόνησης στο κάτω μέρος του καπακιού είναι πως εμφανίζονται και οι δύο με μεγάλο πλάτος ταλάντωσης γύρω από την οπή και έτσι έχουν την μορφή (3,2) εκεί που στα τρίχορδα μπουζούκια ο ισχυρότερος ήταν ο (3,1) και μετά ο (3,3) που εμφάνιζε μικρό πλάτος ταλάντωσης τόσο γύρω από την οπή όσο και στο κέντρο του καπακιού (ανάμεσα σε οπή και γέφυρα).



Εικόνα 5.2: Τρόποι δόνησης στο εύρος 1000-2000Hz

Επόμενος τρόπος δόνησης είναι ο (2,3) στα 1008Hz με πολύ μικρό πλάτος ταλάντωσης και δεσμό ταλάντωσης γύρω από την γέφυρα. Στην συνέχεια ακολουθεί ο (4,2) στα 1120Hz όπου υπάρχουν 4 εστίες ταλάντωσης στην χαμηλότερη περιοχή του οργάνου αλλά δεσμοί ταλάντωσης γύρω από την γέφυρα. Ακολουθεί ο (5,3) στα 1280Hz με 5 εστίες ταλάντωσης στην χαμηλότερη περιοχή και έντονη δραστηριότητα γύρω από την οπή. Αυτός ο τρόπος δόνησης είναι και ο μοναδικός που εμφανίζει αξιόλογο πλάτος ταλάντωσης (από του υψηλότερους τρόπους δόνησης) γύρω από την γέφυρα. Στην συνέχεια το πλάτος ταλάντωσης μειώνεται σταδιακά και ακολουθεί ένας τρόπος δόνησης με επίσης 5 εστίες ταλάντωσης που είναι ο (5,2) στα 1464Hz. Τέλος, από τα 1500 έως και τα 1900Hz εντοπίστηκαν 4 τρόποι δόνησης με πολύ μικρό πλάτος ταλάντωσης εκ των οποίων οι δύο παρατίθενται στην εικόνα και είναι οι 1550, 1620, 1650 και 1830Hz με 5 και 6 εστίες ταλάντωσης. Εδώ το τετράχορδο μπουζούκι διαφοροποιείται αρκετά σε σχέση με τα τρίχορδα που εμφανίζουν τρόπους δόνησης με 6 έως και 8 εστίες.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν εμφανίζονται οι μέσοι όροι που προκύπτουν από την απόκριση του τετράχορδου μπουζουκιού σε κρούσεις στην γέφυρα κάθετες προς το καπάκι και στις δύο θέσεις λήψης.

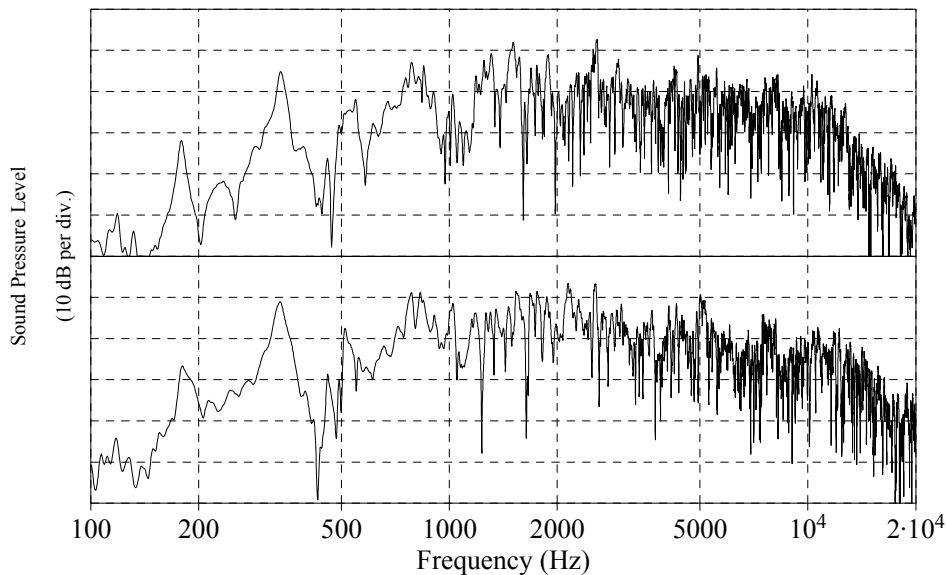


Εικόνα 5.3 : Φασματικός μέσος όρος σε 40 κρούσεις κάθετες προς το καπάκι πάνω στην γέφυρα στην περιοχή της χορδής A3 (στο κέντρο) στην θέση λήψης 1 (a) και στην θέση 2 (b).

Η πρώτη κορυφή που εντοπίζεται στα φάσματα αντιστοιχεί στον συντονισμό της αέρινης συχνότητας, (1,1)H, που είναι ο ισχυρότερος τρόπος δόνησης στις χαμηλότερες συχνότητες του οργάνου. Ο (1,1)T στα 330Hz εμφανίζεται στους μέσους όρους με πολύ ισχυρότερο πλάτος ταλάντωσης από όλους τους υπόλοιπους όπως ο αντίστοιχος στα τρίχορδα μπουζούκια. Μεγάλα ποσοστά ενέργειας συγκεντρώνονται γύρω από την συχνοτική περιοχή 750Hz με 930Hz όπου εμφανίζονται οι τρόποι με τρεις εστίες δόνησης (1,3) (3,2)1 και (3,2)2. Μάλιστα στην θέση 1 εμφανίζονται και οι τρεις κορυφές στον μέσο όρο αν και είναι αρκετά κοντά σε συχνότητα έτσι ώστε αυτή η περιοχή παρουσιάζεται πολύ ενισχυμένη. Μία διαφορά σε σχέση με τα τρίχορδα μπουζούκια είναι πως οι τρόποι δόνησης που έχουν δύο εστίες δόνησης (1,2) και (2,1) στα 500 και 550Hz αντίστοιχα εμφανίζονται έστω και με μικρό πλάτος στο διάγραμμα της απόκρισης στην θέση 1, ενώ στην κοντινή λήψη δεν διακρίνονται οι κορυφές τους στον μέσο όρο. Σε σχέση με την τονισμένη περιοχή γύρω από τα 1050Hz που εντοπίστηκε στα τρίχορδα μπουζούκια εδώ υπάρχει ελάχιστη απόκριση ενώ μία αντίστοιχη περιοχή στις υψηλότερες συχνότητες πάνω από τα 1000Hz φαίνεται να υπάρχει γύρω από τα 1240Hz ανάμεσα στους (4,2) και πιο κοντά στον (5,3) που εμφανίζεται μόνο στην θέση 2.

Οι βασικοί τρόποι δόνησης του τετράχορδου μπουζουκιού εμφανίζονται και στις αποκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν με μηχανική διέγερση πάνω στο καπάκι δίπλα από την χορδή D4.

Διακρίνεται στα διαγράμματα πως οι κορυφές του φάσματος συμφωνούν με τις αντίστοιχες της απόκρισης σε κρούση. Ωστόσο, στην θέση διέγερσης πάνω στο καπάκι ισχύουν όσα έχουν αναφερθεί και στην παράγραφο των τρίχορδων μπουζουκιών σχετικά με την αγωγιμότητα του συστήματος που συμπεριλαμβάνεται μόνο όταν τα όργανα διεγείρονται στην γέφυρα.



Εικόνα 5.4 : Απόκριση συχνότητας με μηχανική διέγερση πάνω στο καπάκι δίπλα στην γέφυρα. Στην θέση λήψης 1 (άνω διάγραμμα) και 2 (κάτω διάγραμμα) αντίστοιχα.

Ένα χαρακτηριστικό που εντοπίζεται επίσης αφορά τον τρόπο (2,1) στα 545Hz που δεν εντοπίζεται με ισχυρό πλάτος στην θέση 2 ενώ στην θέση 1 φαίνεται πως ο συγκεκριμένος τρόπος μαζί με τον κοντινό του (1,2) αλληλεπικαλύπτονται χωρίς να είναι εμφανείς οι δύο κορυφές. Στις υψηλότερες συχνότητες και συγκεκριμένα στα 1000Hz περίπου εμφανίζεται μια κορυφή που αποδίδεται στον τρόπο (2,3) ο οποίος όμως δεν εντοπίζεται όταν η διέγερση πραγματοποιείται με κρούση στο σημείο της γέφυρας.

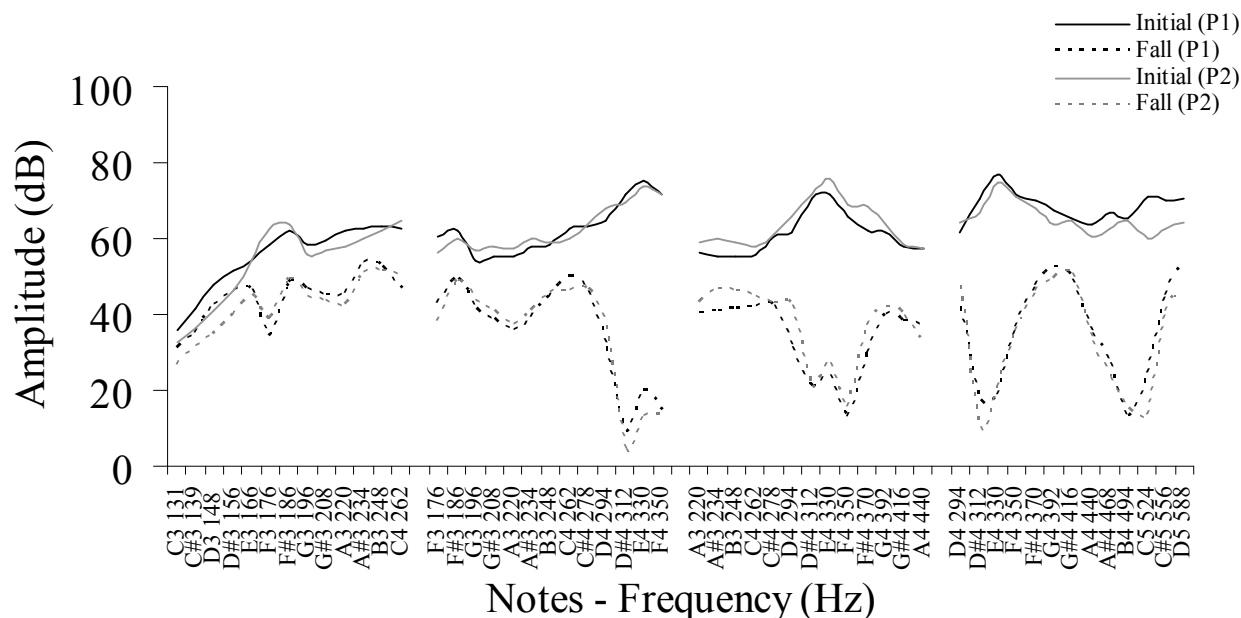
Φαίνεται λοιπόν σε αυτό το στάδιο πως η γενική συμπεριφορά του τετράχορδου μπουζουκιού δεν διαφοροποιείται όσο αφορά τον σχηματισμό των βασικότερων τρόπων δόνησης που διαμορφώνονται με 1,2 και 3 βασικές εστίες ταλάντωσης. Ωστόσο, με εξαίρεση τον συντονισμό της αέρινης συχνότητας, (1,1)_H, όλοι οι τρόποι δόνησης βρίσκονται σε υψηλότερες συχνότητες κι έτσι θα μπορούσε να ειπωθεί γενικά πως το τετράχορδο μπουζούκι είναι μια εκδοχή του τρίχορδου με τους βασικότερους τρόπους δόνησης «κουρδισμένους» σε υψηλότερη συχνότητα. Βέβαια η ακριβής συχνότητα που εντοπίζονται οι τρόποι δόνησης μπορεί να μεταβληθεί από ένα πλήθος παραγόντων που αφορούν την γεωμετρία των οργάνων και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ξύλου και οποιοσδήποτε συσχετισμός των συχνοτήτων που εμφανίζονται μεταξύ τετράχορδου και τρίχορδου μπουζουκιού θα ήταν αρκετά επισφαλής.

5.2 Ηχητικά χαρακτηριστικά

5.2.1 Ανάλυση σε μονές χορδές

5.2.1.1 Σχέσεις σύζευξης

Η ανάλυση των ηχητικών χαρακτηριστικών του οργάνου πραγματοποιείται όπως και στα τρίχορδα μπουζούκια πρώτα στις νότες που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές και εν συνεχεία με διπλές. Οι σχέσεις σύζευξης των τρόπων δόνησης των χορδών με τους αντίστοιχους του καπακιού εντοπίζονται μέσω των τιμών αρχικής έντασης και πτώσης έντασης των θεμελίων 52 νοτών που αντιστοιχούν σε μια οκτάβα για κάθε μία από τις τέσσερις χορδές του οργάνου.

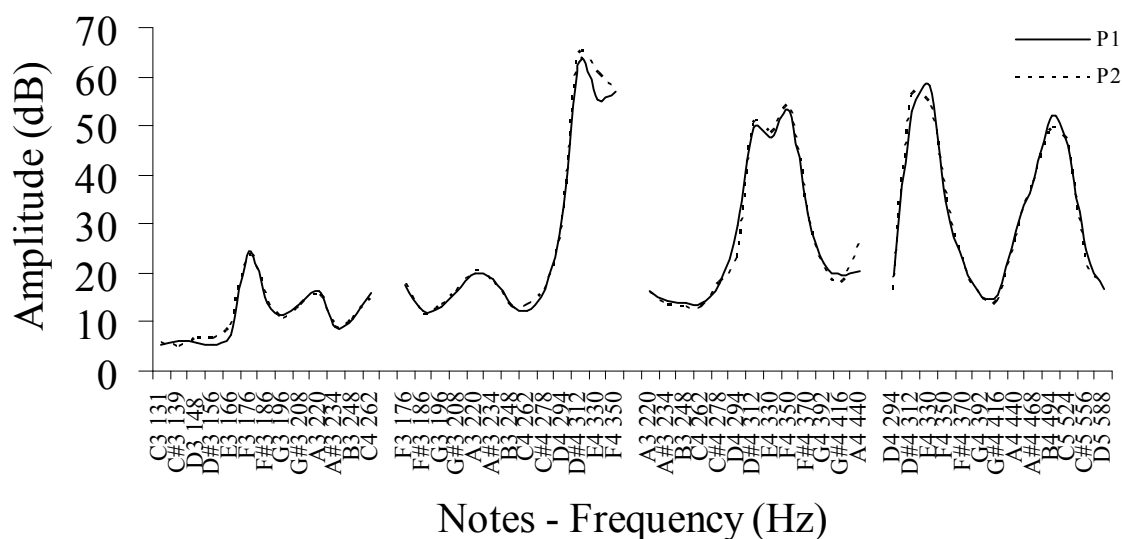


Εικόνα 5.5 : Αρχική ένταση και ένταση πτώσης για τις θεμελίους 52 νοτών που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές (μία οκτάβα σε κάθε χορδή) ξεκινώντας από την πιο μπάσα χορδή C3 στα αριστερά, για την θέση λήψης 1 (P1) και στην θέση 2 (P2). Για την καλύτερη παρουσίαση πραγματοποιείται ομοιόμορφη κανονικοποίηση των τιμών που δεν μεταβάλλει τις μεταξύ τους σχέσεις.

Ξεκινώντας από την χαμηλότερη σε τονικό ύψος χορδή C3 (131Hz) διακρίνεται από το γράφημα πως αρχικές εντάσεις γύρω από τα 176Hz (νότες E3, F3 και F#3) που αντιστοιχούν στην αέρινη συχνότητα του οργάνου [τρόπος (1,1)H] είναι μεγαλύτερες από τις γειτονικές τους εμφανίζοντας τοπικό μέγιστο. Παράλληλα, στην ίδια περιοχή εντοπίζεται και η μεγαλύτερη διαφορά αρχικής έντασης και πτώσης της έντασης γεγονός που δείχνει ποιοτικά πως υπάρχει αυξημένη αγωγιμότητα γύρω από την αέρινη συχνότητα που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόσβεσης του πλάτους ταλάντωσης.

Στην χορδή F παρατηρείται επίσης λίγο αυξημένη ένταση στις πρώτες νότες που συζεύγγονται με τον συντονισμό της αέρινης συχνότητας. Ωστόσο, η ισχυρότερη σύζευξη συμβαίνει γύρω από τα 330Hz που αντιστοιχούν στον τρόπο (1,1)T του τετράχορδου μπουζουκιού. Όπως φαίνεται από το γράφημα η επίδραση της σύζευξης με τον συγκεκριμένο τρόπο δόνησης είναι τόσο ισχυρή που οι θεμέλιοι που συζεύγγονται με αυτόν «χάνουν» την θεμέλιό τους σε χρόνο μικρότερο από 1 δευτερόλεπτο, φαινόμενο που σχολιάστηκε ως «απώλεια θεμελίου» στο τρίχορδο μπουζούκι. Αντίστοιχα χαρακτηριστικά ισχυρής σύζευξης με τον (1,1)T παρουσιάζονται και στις χορδές A3 και D4 του τετράχορδου μπουζουκιού. Εκτός όμως από τον (1,1)T, στην χορδή D4 εντοπίζονται φαινόμενα έντονης σύζευξης με τον τρόπο δόνησης (1,2) γύρω από τα 500Hz που παρουσιάζει δραματική πτώση της έντασής του μετά από 1s χωρίς ωστόσο η αρχική ένταση να είναι τόσο μεγάλη όσο αυτή που έχουν οι θεμέλιοι που βρίσκονται γύρω από τον (1,1)T. Μάλιστα η αρχική ένταση φαίνεται να εξαρτάται και από την θέση λήψης και είναι μεγαλύτερη στην θέση 1.

Όπως και στο τρίχορδο μπουζούκι έτσι κι εδώ οι διαφορές αρχικής-πτώσης έντασης των θεμελίων των νοτών είναι ανεξάρτητες από την θέση λήψης. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρατίθενται οι διαφορές αρχικής-πτώσης έντασης και σημειώνονται οι τρόποι δόνησης με τους οποίους αλληλεπιδρούν χορδή και καπάκι.



Εικόνα 5.6 : Διαφορές αρχικής έντασης και έντασης πτώσης για τις θεμέλιους 52 νοτών που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές (μία οκτάβα σε κάθε χορδή) ξεκινώντας από την πιο μπάσα χορδή C3 στα αριστερά, για την θέση λήψης 1 (P1) και την θέση 2 (P2).

Από τα διαγράμματα εντοπίζονται επιπλέον χαρακτηριστικά που σχολιάζονται στην συνέχεια. Στις θεμέλιους των νοτών που βρίσκονται ανάμεσα στην αέρινη συχνότητα (1,1)H και στον (1,1)T φαίνεται μια περιοχή γύρω από τα 220Hz που παρουσιάζει μεγαλύτερη διαφορά αρχικής-πτώσης

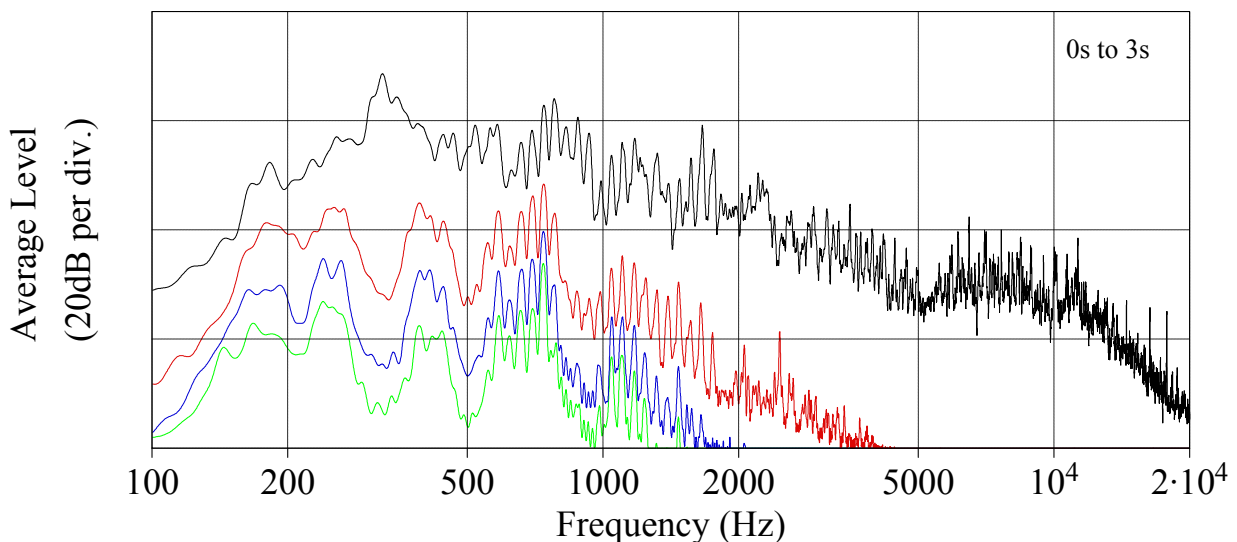
έντασης. Λόγω του ότι δεν εντοπίστηκε κανένας τρόπος δόνησης στην συγκεκριμένη περιοχή δεν είναι δυνατό να επεξηγηθεί η αιτία αυτής της συμπεριφοράς.

Ο τρόπος δόνησης (2,1) στα 550Hz δεν φαίνεται να επιδρά σημαντικά στα χαρακτηριστικά του ήχου. Ωστόσο, δεν μπορεί να αποκλειστεί εντελώς η αλληλεπίδραση του (2,1) με τον (1,2) λόγω του ότι βρίσκονται σε πολύ κοντινές συχνότητες (διαφορά 50Hz), αλλά όπως και στο τρίχορδο μπουζούκι, έτσι και στο τετράχορδο τα εντονότερα φαινόμενα σύζευξης χορδής-καπακιού εντοπίζονται πιο κοντά στις συχνότητες που αντιστοιχούν στον (1,2).

Τέλος, σχετικά με τις μέγιστες τιμές διαφοράς αρχικής-πτώσης έντασης στις περιοχές των τρόπων δόνησης φαίνεται πως το τετράχορδο μπουζούκι εμφανίζει λιγότερο έντονη σύζευξη με τον (1,1)H και περισσότερο με τον (1,2) από ότι το τρίχορδο. Τα χαρακτηριστικά αυτά πάντα εξαρτώνται από τα συγκεκριμένα όργανα και δεν θα μπορούσαν να αποτελούν συμπεράσματα σχετικά με την γενική συμπεριφορά των τρίχορδων και των τετράχορδων μπουζουκιών.

5.2.1.2 Ενεργειακές κατανομές

Σχολιάζοντας γενικά τις ενεργειακές κατανομές στους φασματικούς μέρους όρους των 52 νοτών φαίνεται πρώτα από όλα πως η αρχική ενέργεια παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με τις κρουστικές αποκρίσεις που παρουσιάστηκαν στην αντίστοιχη θέση λήψης (θέση 1). Τα τοπικά μέγιστα αρχικής ηχητικής ενέργειας κατανέμονται γύρω από τις περιοχές των βασικών τρόπων δόνησης ξεκινώντας από τις χαμηλότερες συχνότητες είναι:



Εικόνα 5.7 : Φασματικοί μέσοι όροι 52 νοτών σε 4 διαφορετικά στιγμιότυπα

Ο συντονισμός της αέρινης συχνότητας, (1,1)H στα 176Hz που συγκεντρώνει τα μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας στις χαμηλότερες συχνότητες του ήχου, ο (1,1)T στα 330Hz, όπου συγκεντρώνονται και τα μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας του φάσματος γενικά ακόμα και σε ένα μεγάλο εύρος γύρω από αυτόν, οι τρόποι δόνησης που έχουν δύο εστίες [(1,2) και (2,1)] στα 500 και 550Hz αντίστοιχα και τέλος οι συντονισμοί στην συχνοτική περιοχή 750Hz με 930Hz όπου εντοπίστηκαν οι (1,3) (3,2)1 και (3,2)2 και συγκεντρώνονται τα μεγαλύτερα ποσοστά ακουστικής ενέργειας αμέσως μετά την συχνοτική περιοχή του (1,1)T.

Ωστόσο, σημειώνεται πως παρά την εμφάνιση κορυφών γύρω από την περιοχή των (1,2) και (2,1) οι τρόποι αυτοί και στο τετράχορδο μπουζούκι δεν εκπέμπουν με μεγάλη ακουστική ενέργεια. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν κάποιος παρατηρήσει πως στην αμέσως χαμηλότερη περιοχή των 360 με 460Hz που δεν υπάρχει κάποιος ισχυρός συντονισμός η στάθμη στο φάσμα είναι στα ίδια επίπεδα με την εν λόγω περιοχή.

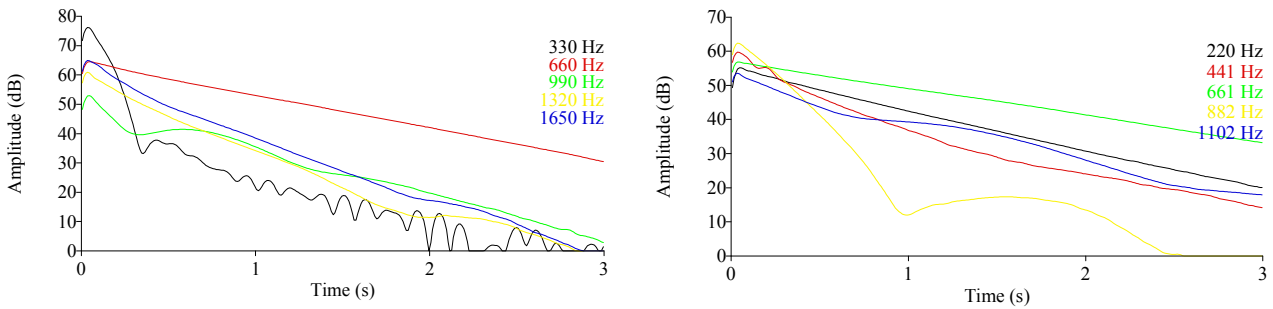
Παρατηρώντας τον τρόπο με τον οποίο μειώνεται η ακουστική ενέργεια στον χρόνο, φαινόμενα ισχυρής σύζευξης (γρήγορης απόσβεσης) σημειώνονται σε όλες τις περιοχές των βασικών τρόπων δόνησης σχηματίζοντας τα αντίστοιχα «τοπικά ελάχιστα». Ισχυρή σύζευξη φαίνεται να υπάρχει ακόμα γύρω από την περιοχή όπου υπάρχουν οι τρόποι δόνησης με τρεις εστίες ταλάντωσης στο κάτω μέρος του καπακιού από τα 780 έως και τα 900Hz γεγονός που δείχνει πως η γενική συμπεριφορά γύρω από τους τρόπους δόνησης παραμένει κοινή είτε πρόκειται για το τρίχορδο είτε για το τετράχορδο μπουζούκι.

Ωστόσο, όπως εντοπίστηκε και στις σχέσεις σύζευξης των θεμελίων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, υπάρχει μεγάλη απόσβεση γύρω από τα 220Hz χωρίς ωστόσο αυτό το χαρακτηριστικό να σχετίζεται με κάποιον από τους βασικότερους τρόπους δόνησης που εντοπίστηκαν στο όργανο.

Τα διαγράμματα της εικόνας 5.7 δείχνουν όμως και τον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνεται η μέση ακουστική ενέργεια σε ολόκληρο το ακουστικό εύρος. Έτσι όπως διακρίνεται στα φάσματα, σε χρόνο 1s (κόκκινο) τα αρμονικά στοιχεία με συχνότητα άνω των 3KHz έχουν σχεδόν πλήρη απόσβεση ενώ στους χρόνους 2s και 3s (μπλε και πράσινο αντίστοιχα) μόνο τα αρμονικά στοιχεία με συχνότητα κάτω των 2KHz και 1,4KHz φαίνεται να εκπέμπουν αξιόλογης έντασης ήχο.

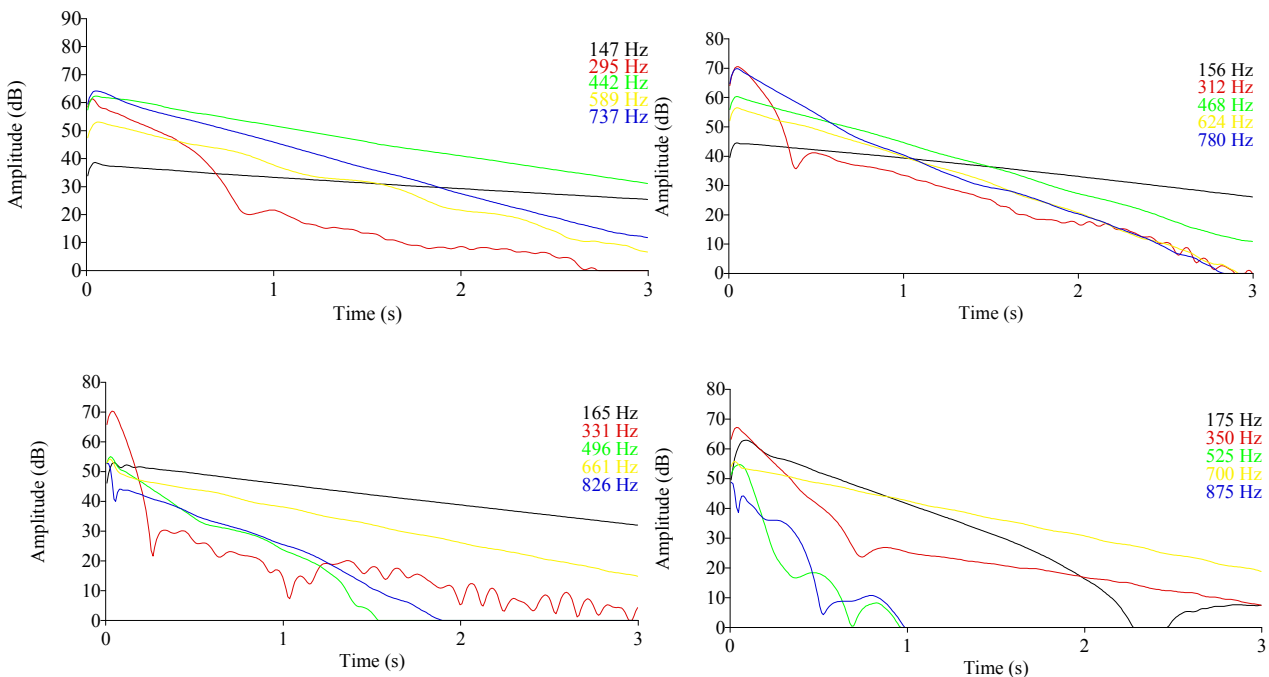
5.2.1.3 Πεδίο του χρόνου

Έχοντας εντοπίσει τους σημαντικότερους τρόπους δόνησης του οργάνου και τα χαρακτηριστικά της σύζευξης τους με τις χορδές, πραγματοποιείται ανάλυση της αρμονικής έντασης περιβάλλουσας των νοτών που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές.



Εικόνα 5.8 : Αρμονικές περιβάλλουσες

Στην εικόνα 5.8 διακρίνεται η περιβάλλουσα της θεμελίου της νότας E4 (330Hz) που εκτελέστηκε στην χορδή D4, η οποία συζεύγνυται ισχυρά με τον τρόπο (1,1)T του οργάνου παρουσιάζοντας το φαινόμενο της απόσβεσης σε δύο στάδια, ένα γρήγορο και ένα πιο αργό. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός απόσβεσης είναι περίπου 124dB/s στα πρώτα 0,3s ενώ στην συνέχεια η ταλάντωση «σταθεροποιείται» και η ένταση φθίνει με ρυθμό περίπου 18dB/s. Αντίστοιχα φαινόμενα παρουσιάζονται στην νότα A4 (220Hz) που εκτελέστηκε στην ομώνυμη χορδή με τον 4^ο αρμονικό να επηρεάζεται με από τους τρόπους (3,2)1 και (3,2)2 χωρίς ωστόσο να προσδιορίζεται με ποιον από τους 2 συζεύγνυται περισσότερο η χορδή.



Εικόνα 5.9 : Αρμονικές περιβάλλουσες

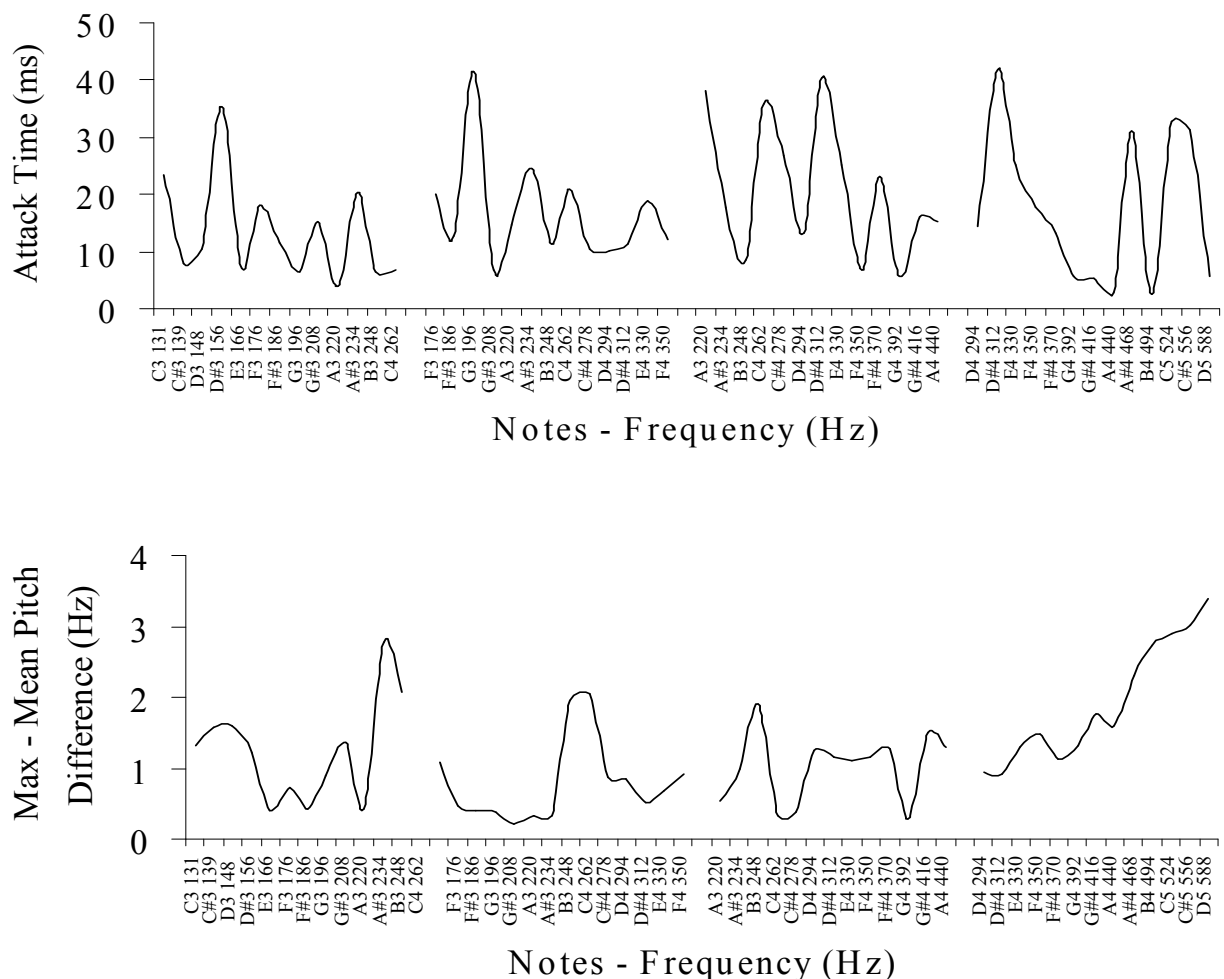
Αντίστοιχα φαινόμενα σημειώνονται στην χορδή C3 στις νότες D4 έως F4 (147-175Hz). Παρατηρώντας αρχικά την συμπεριφορά των θεμελίων (μαύρες γραμμές) φαίνεται πως όσο αυξάνεται η συχνότητα ανάλογα αυξάνεται και τόσο η ένταση όσο και ο ρυθμός πτώσης αυτής ως αποτέλεσμα της σύζευξης με τον τρόπο (1,1)H του τετράχορδου μπουζουκιού. Σημειώνεται όμως πως η σύζευξη με την αέρινη συχνότητα δεν παρουσιάζει φαινόμενα πολύ γρήγορης απόσβεσης σε σχέση με την αντίστοιχη του τρίχορδου μπουζουκιού. Η συμπεριφορά των 2^{ov} αρμονικών (κόκκινες γραμμές) δείχνει χαρακτηριστικά πως η σύζευξη της χορδής με τον τρόπο δόνησης (1,1)T επηρεάζει δραστικά τα αρμονικά στοιχεία των νοτών που απέχουν ακόμα και αρκετά Hz από το μέγιστό του (330Hz) στο οποίο εμφανίζεται και ο μεγαλύτερος ρυθμός απόσβεσης. Οι τρίτοι αρμονικοί (πράσινες γραμμές) δείχνουν τις σχέσεις σύζευξης της χορδής με τον τρόπο δόνησης (1,2) στα 510Hz όπου ο αντίστοιχος αρμονικός της νότας F3 αποσβένει σε χρόνο μικρότερο από 1,2s ενώ στα προηγούμενα αρμονικά στοιχεία (από τα 442Hz) ο ρυθμός πτώσης του πλάτους ταλάντωσης είναι πιο ομαλός. Οι περιβάλλουσες των 4^{ov} αρμονικών (κίτρινες γραμμές) δείχνουν χαρακτηριστικά πως ο ρυθμός πτώσης του πλάτους ταλάντωσης των τρόπων δόνησης των χορδών που δεν συζεύγνυνται με κάποιον από τους βασικούς τρόπους δόνησης του οργάνου είναι περίπου εκθετικός (γραμμικός στην κλίμακα των dB).

Τέλος, παρατηρώντας την συμπεριφορά των 5^{ov} αρμονικών (μπλε γραμμές) που βρίσκονται στην περιοχή των τρόπων δόνησης με 3 εστίες ταλάντωσης (1,3), (3,2)1 και (3,2)2 εντοπίζονται ακόμα πιο πολύπλοκα φαινόμενα. Συγκεκριμένα, ο 5^{ος} αρμονικός της νότας D3 φαίνεται πως δεν επηρεάζεται από τον κοντινότερο τρόπο δόνησης (1,3) στα 750Hz. Στην νότα D#3 όμως ο αντίστοιχος αρμονικός (780Hz) που βρίσκεται ανάμεσα στους (1,3) και (3,1) εμφανίζεται με ισχυρό πλάτος ταλάντωσης και φθίνει με ταχύτερο ρυθμό ο οποίος όμως είναι σταθερός σε αντίθεση με τον ρυθμό απόσβεσης σε δύο στάδια (ένα γρήγορο και ένα πιο ομαλό) που παρατηρείται γύρω από τον τρόπο (1,1)T. Ο 5^{ος} αρμονικός της νότας E3 (165Hz) συμπίπτει με τον (1,3) που εντοπίστηκε στα 830Hz και παρουσιάζει γρήγορο ρυθμό απόσβεσης και μια στιγμιαία ακύρωση του πλάτους ταλάντωσης. Ωστόσο η αρχική του ένταση είναι πολύ μικρότερη του αναμενόμενου. Ακόμα, ο 5^{ος} αρμονικός της νότας F3 (175Hz) που βρίσκεται ανάμεσα στους τρόπους δόνησης (3,2)1 και (3,2)2 δείχνει πως επηρεάζεται αντίστοιχα όπως ο 4^{ος} αρμονικός της νότας A4 στην προηγούμενη εικόνα αποσβένοντας τα μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας σε 1s περίπου.

Προκύπτει από τα παραπάνω πως η αλληλεπιδράσεις με τους συγκεκριμένους τρόπους δόνησης είναι πολύ σύνθετες και χρίζουν περαιτέρω ανάλυσης για να προσδιοριστούν τα ακριβή χαρακτηριστικά τους. Ωστόσο, το να περιγραφεί η αλληλεπίδραση του κάθε αρμονικού στοιχείου με όλους τους τρόπους δόνησης του οργάνου για κάθε όργανο και για όλες τις χορδές ξεφεύγει κατά πολύ από τον στόχο της εργασίας καθώς θα απαιτούσε εξειδικευμένη εφαρμογή της ανάλυσης αρχικής έντασης και έντασης πτώσης σε κάθε αρμονικό στοιχείο της κάθε νότας και για κάθε

διαφορετική χορδή. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία όπου έχει σαν στόχο τον προσδιορισμό των βασικών χαρακτηριστικών, η πτώση της ενέργειας που παρατηρήθηκε στα φάσματα της εικόνας 5.7 στην προηγούμενη παράγραφο και ο μεγάλος ρυθμός πτώσης που παρατηρείται στα συγκεκριμένα αρμονικά στοιχεία θεωρούνται τεκμήρια για την ύπαρξη ισχυρής σύζευξη της χορδής με τους τρόπους (1,3) (3,2)1 και (3,2)2 του οργάνου.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρατίθενται τυπικά διαγράμματα χρόνων ανόδου και μεταβολών στα τονικά ύψη ως αποτέλεσμα της διαμόρφωσης τάσης κατά την εκτέλεση των νοτών σε μονές χορδές αντίστοιχα με αυτά του τρίχορδου μπουζουκιού. Ωστόσο, στην παρούσα φάση, δεν διερευνάται η σχέση των τιμών αυτών με τα δονητικά χαρακτηριστικά των οργάνων (που πιθανά να υπάρχει και πιθανά όχι) και οι τιμές αυτές παρατίθενται απλά για να δώσουν στον αναγνώστη μια άποψη για τα χαρακτηριστικά αυτά του ήχου όπως εντοπίστηκαν στις μετρήσεις.

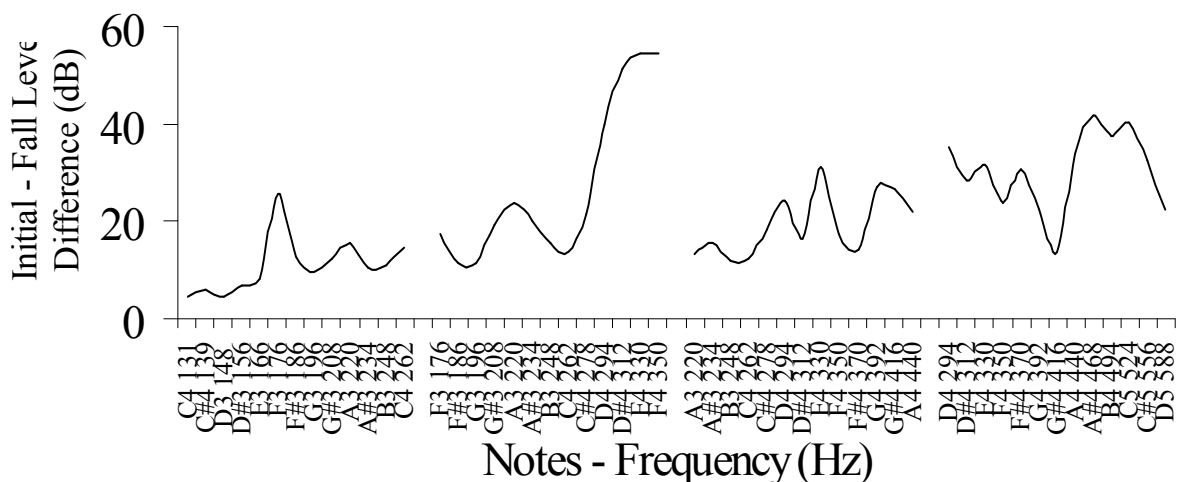


Εικόνα 5.10 : Χρόνοι ανόδου (άνω διάγραμμα) και μέγιστης μεταβολής τονικού ύψους (κάτω διάγραμμα)

5.2.2 Διπλές χορδές

5.2.2.1 Σχέσεις σύζευξης

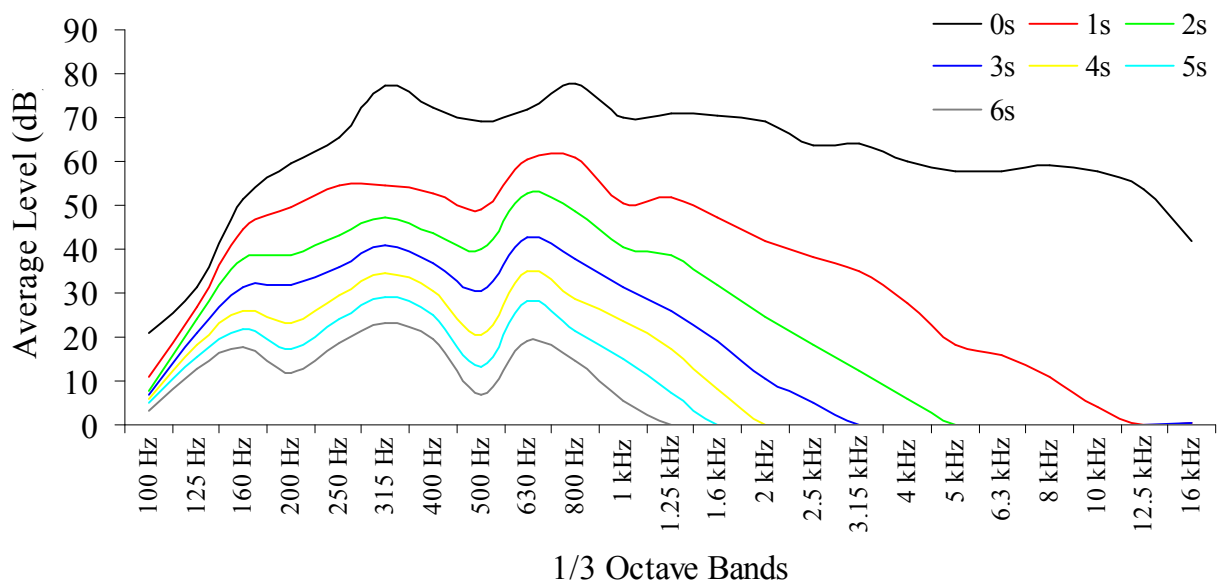
Στην εκτέλεση των νοτών του τετράχορδου μπουζουκιού με διπλές χορδές φαίνονται τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά που παρατηρήθηκαν στα τρίχορδα μπουζούκια. Συγκεκριμένα, οι θεμέλιοι των νοτών C3 και F3 δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες μεταβολές στην συμπεριφορά τους καθώς τα ζεύγη τους είναι χορδισμένα στην οκτάβα γεγονός που επιβεβαιώνει τις αντίστοιχες παρατηρήσεις στις προηγούμενες παραγράφους. Επίσης, η αλληλεπίδραση των 2 χορδών «αμβλύνει» και εδώ τις «επιπτώσεις» της σύζευξης των χορδών A3 και D3 με τον τρόπο δόνησης (1,1)T. Ωστόσο, όπως και στις περισσότερες περιπτώσεις του τρίχορδου μπουζουκιού ο (1,2) δείχνει να επηρεάζεται λιγότερο από την ύπαρξη της δεύτερης χορδής αν και η τιμή της διαφοράς αρχικής-πτώσης έντασης είναι αρκετά μικρότερη (38dB στις διπλές έναντι 49dB στην μονή χορδή). Βέβαια όπως έχει σχολαστεί για το τρίχορδο μπουζούκι, αν και αμβλυμένες, οι σχέσεις σύζευξης μεταβάλλονται δραστικά από εκτέλεση σε εκτέλεση για τις διπλές χορδές γεγονός που δείχνει τον καίριο ρόλο που διακατέχει η αλληλεπίδραση των δύο χορδών στην διαμόρφωσή τους.



Εικόνα 5.11: Διαφορές αρχικής έντασης και πτώσης έντασης για τις θεμελίους 52 νοτών εκτελεσμένες στην θέση 1 με διπλές χορδές.

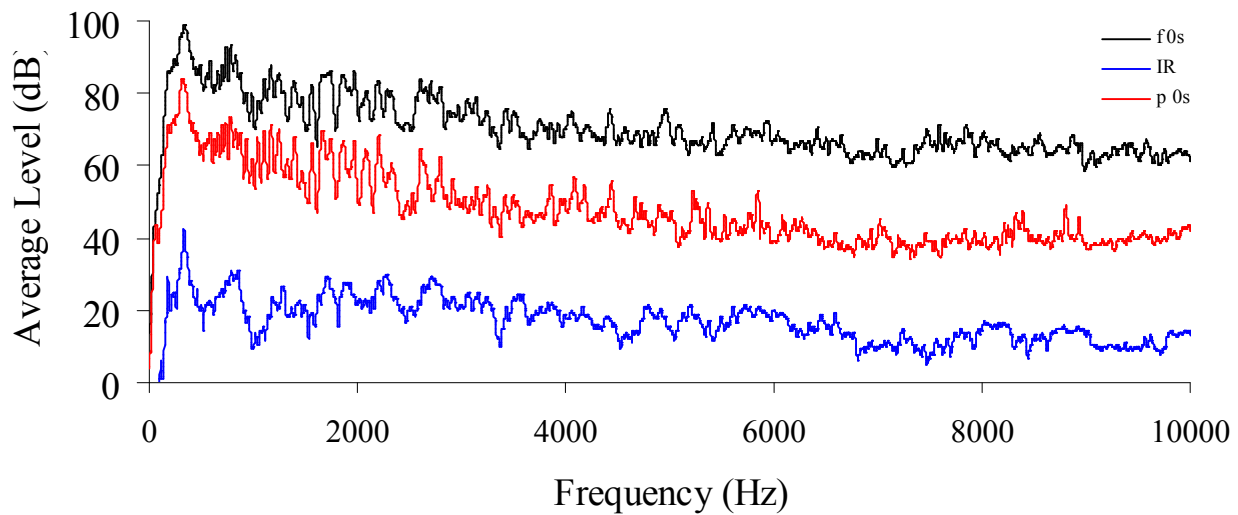
Οι σχέσεις σύζευξης με διπλές χορδές εντοπίζονται στην φασματική ανάλυση σε ζώνες τριτοκτάβας του μέσου όρου 52 νοτών (1 οκτάβα ανά χορδή) που εκτελέστηκαν σε μέση προς δυνατή δυναμική (mf) για διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα. Συγκεκριμένα, τα μεγαλύτερα ποσοστά αρχικής ενέργειας συγκεντρώνονται γύρω από τις περιοχές όπου υπάρχουν οι τρόποι δόνησης (1,1)T (τριτοκτάβα 315Hz) και τα τρίπολα του οργάνου (τριτοκτάβα 800Hz). Ωστόσο,

κατά τα διάφορα χρονικά στιγμιότυπα στα οποία διεξάγεται η ανάλυση φαίνεται στις χαμηλότερες συχνότητες ανεξάρτητα από την αλληλεπίδραση των διπλών χορδών η ταχύτερη απόσβεση συμβαίνει στην τριτοκτάβα των 500Hz όπου βρίσκεται ο τρόπος δόνησης (1,2). Αντίστοιχα, από τα διαγράμματα φαίνεται η επίδραση των δυνάμεων τριβής στην διάρκεια των υψηλότερων αρμονικών στοιχείων όπου μέσα σε 1s η ακόμα και τα υψηλότερα αρμονικά στοιχεία έως τα 8KHz συγκεντρώνουν αξιόλογα ποσοστά ενέργειας. Στο 2^ο δευτερόλεπτο η συνολική ενέργεια συγκεντρώνεται κάτω από τα 5KHz και μειώνεται σταδιακά φθάνοντας στα 6s όπου υπάρχει μικτή συγκέντρωση ενέργειας από την χαμηλότερες συχνότητες έως τα 1000Hz περίπου.



Εικόνα 5.12: Ενεργειακές κατανομές για 52 νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές στην θέση λήψης 1 με ανάλυση τριτοκτάβας και για διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα.

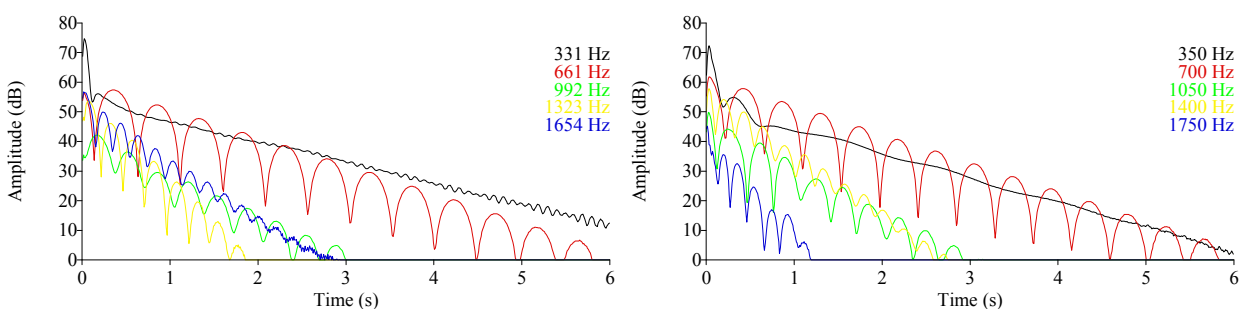
Οι ενεργειακές κατανομές σε ζώνες τριτοκτάβας δείχνουν γενικά πως όπως και στο τρίχορδο μουζούκι έτσι και στο τετράχορδο, η αλληλεπίδραση των διπλών χορδών μεταβάλλει τα φαινόμενα σύζευξης χωρίς όμως να επιδρά στον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται η αρχική ενέργεια γύρω από τους ισχυρότερους τρόπους δόνησης του οργάνου. Ωστόσο, λόγω του ότι αυτές οι σχέσεις παρουσιάζονται πιο «ομαλοποιημένες» στο διάγραμμα που ακολουθεί παρατίθενται οι φασματικοί μέσοι όροι 52 νοτών εκτελεσμένες με διπλές χορδές στην θέση 2 σε δύο δυναμικά επίπεδα, ένα χαμηλής έντασης (p) και ένα δυνατής (f). Παράλληλα, παρατίθεται και ένα φάσμα μέσου όρου 20 κρουστικών αποκρίσεων από όπου φαίνεται ο τρόπος με τον ο οποίος οι συντονισμοί του οργάνου «διαμορφώνουν» την αρχική ακουστική ενέργεια.



Εικόνα 5.13: Αρχική ενεργειακή κατανομή για 52 νότες που εκτελέστηκαν σε διπλές χορδές στα 2 δυναμικά επίπεδα (θέση 1). Με μπλε ο φασματικός μέσος όρος 20 κρουστικών αποκρίσεων στην γέφυρα με κάθετη φορά προς το καπάκι.

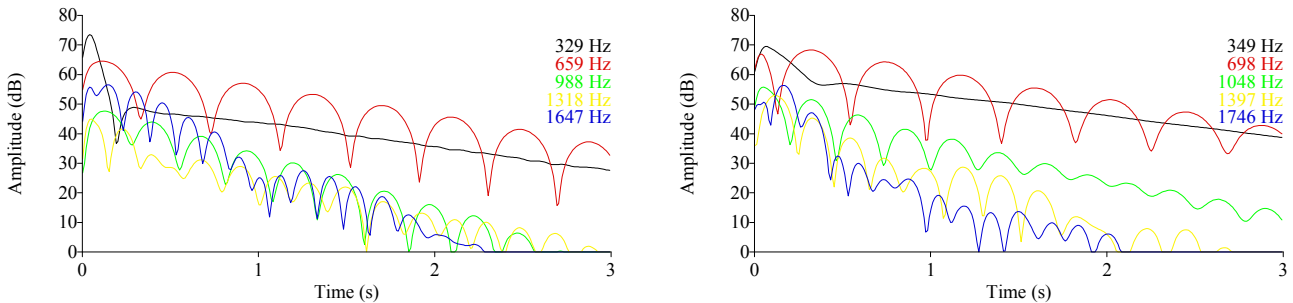
5.2.2.2 Πεδίο του χρόνου

Από τις σχέσεις σύζευξης με διπλές χορδές που παρουσιάστηκαν για τις θεμελίους των νοτών εντοπίστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά του τρόπου με τον οποίο αλληλεπιδρούν οι δύο χορδές με τους τρόπους δόνησης του καπακιού. Ωστόσο είναι γνωστό, από τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά που προσδιορίστηκαν για το τρίχορδο μπουζούκι, πως η αλληλεπίδραση των δύο χορδών έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία έντονων φαινομένων διαμόρφωσης και ακυρώσεων του πλάτους ταλάντωσης ανάλογα με τις συχνοτικές και τις φασικές σχέσεις των ταλαντωτών. Στις νότες E4 (330Hz) και F4 (350Hz) της εικόνας 5.14 που εκτελέστηκαν στην D4 χορδή, παρατηρείται στην θεμέλιο η σύζευξη των δύο χορδών με τον τρόπο (1,1)T που έχει ως αποτέλεσμα την πολύ γρήγορη απόσβεση στην αρχή και τον πιο ομαλό ρυθμό πτώσης στην συνέχεια. Ωστόσο, ενώ στην θεμέλιο δεν παρατηρείται διαμόρφωση του πλάτους ταλάντωσης, στα υπόλοιπα αρμονικά το φαινόμενο είναι εμφανές και αποδίδεται στην αλληλεπίδραση των δύο χορδών.



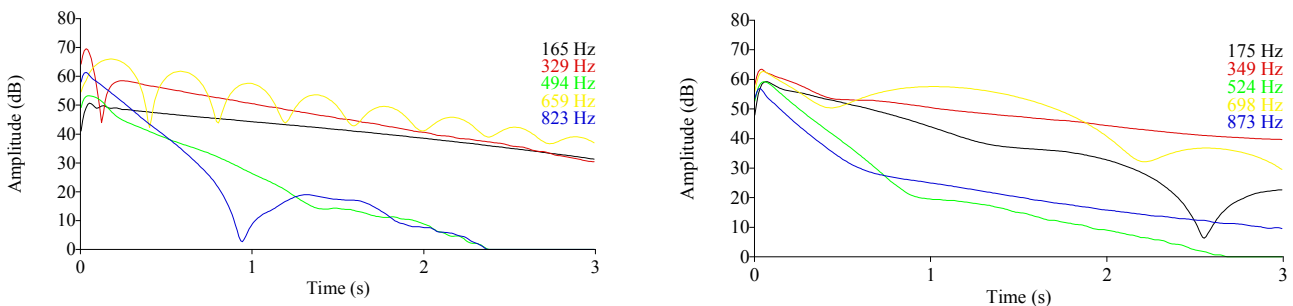
Εικόνα 5.14 : Αρμονικές περιβάλλουσες

Οι αντίστοιχες σχέσεις παρατηρούνται στην συνέχεια και στο ζεύγος A3 όπου δεν εμφανίζονται σημαντικές διαφορές στην γενική συμπεριφορά των αρμονικών.



Εικόνα 5.15 : Αρμονικές περιβάλλουσες των νοτών E4 και F4 στην A3 χορδή

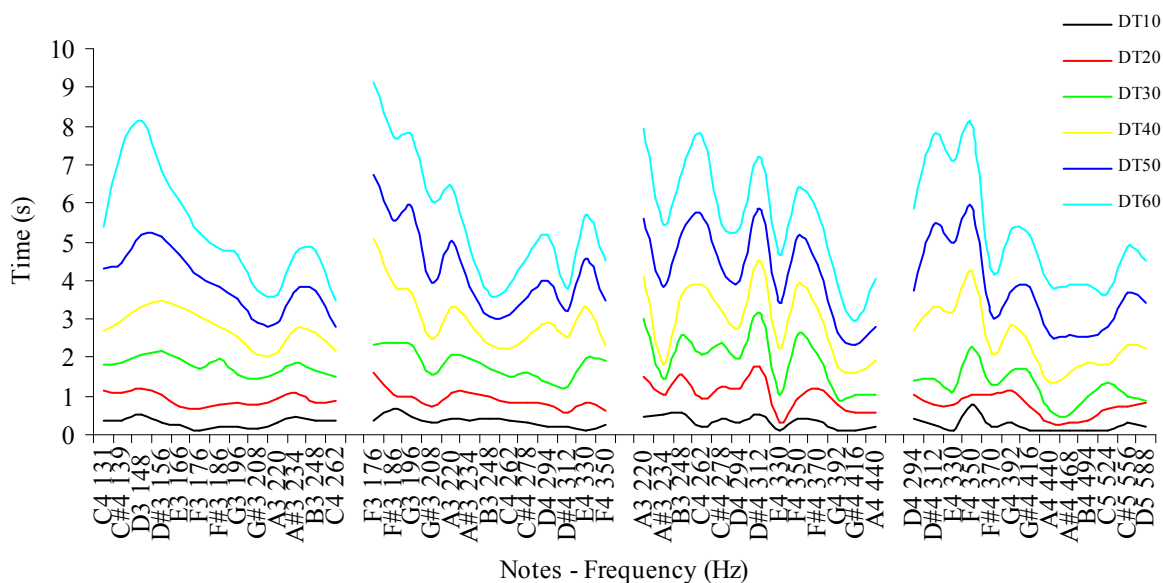
Αντίστοιχα, στις νότες E3 (165Hz) και F3 (175Hz) τις χορδής C3 φαίνεται πως η αλληλεπίδραση των διπλών χορδών σχεδόν «εξαλείπτει» τα φαινόμενα ισχυρής σύζευξης με τον τρόπο (1,1)Τ ως αποτέλεσμα της σύζευξης του 2^{ου} αρμονικού της χορδής C3 με τον 1^ο αρμονικό της χορδής C4 που είναι η δεύτερη χορδή του ζεύγους (κουρδισμένη στην οκτάβα).



Εικόνα 5.16 : Αρμονικές περιβάλλουσες των νοτών E3 και F3 στην C3 χορδή

Ακόμα, οι 2^{οι} και 5^{οι} αρμονικοί συζεύγνυνται ισχυρά με τους (1,2) και (3,2)₁₋₂ αντίστοιχα ενώ ο 4^{ος} αρμονικός παρουσιάζει φαινόμενα διαμόρφωσης του πλάτους ως αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης των 2 χορδών. Αξίζει επιπλέον να σημειωθεί πως οι διαμορφώσεις πλάτους στον 4^ο αρμονικό της νότας E3 είναι πολύ πιο γρήγορες από τις αντίστοιχες στην νότα F3. Αυτό δείχνει πως η ακριβής συχνότητα του κάθε τρόπου δόνησης της χορδής ενδέχεται να μεταβάλλεται δραστικά ως αποτέλεσμα της σύζευξης με το καπάκι μέσω της γέφυρας, της διαμόρφωσης της τάσης, της αναρμονικότητας (που ωστόσο θεωρητικά δεν επιδρά τόσο σημαντικά στους χαμηλότερους τρόπους δόνησης) και άλλων αστάθμητων παραγόντων που είναι αρκετά δύσκολο να εντοπιστούν και να αναλυθούν από μία μόνο μέτρηση.

Αντίστοιχα, οι χρόνοι DT10 έως 60 δείχνουν την γενική συμπεριφορά της περιβάλλουσας της κάθε νότας από όπου φαίνεται ο ρυθμός με τον οποίο αποσβένουν 52 νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές στο τετράχορδο μπουζούκι σε μέση προς δυνατή ένταση.

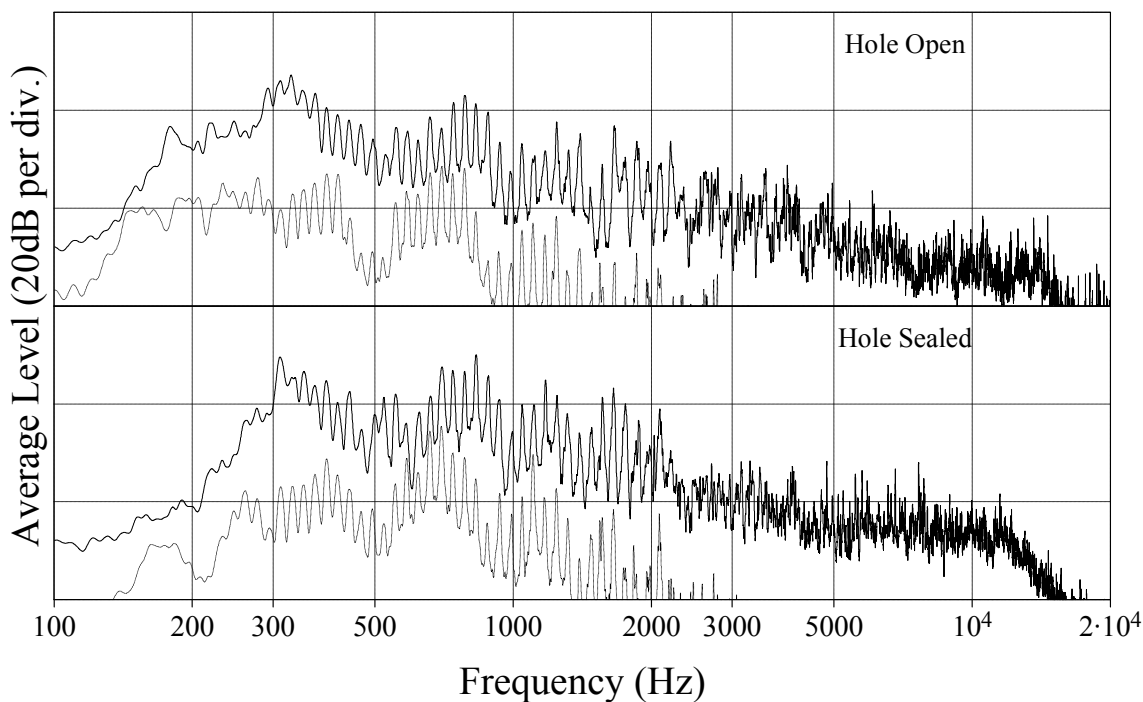


Εικόνα 5.17: Οι χρόνοι DT10-60 για 52 νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές (mf - θέση 1)

Σημειώνεται, σχετικά με τις διάρκειες των νοτών όπως και στο τρίχορδο μπουζούκι, πως η συνολικές τιμές μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις τιμές που εντοπίζονται. Για παράδειγμα αν εφαρμοσθεί μετασχηματισμός Fourier στην νότα D3 της C3 χορδής μετά τα 13s φαίνεται ξεκάθαρα πως εξακολουθεί να υπάρχει πλάτος ταλάντωσης στην θεμέλιο συχνότητα (148Hz). Ωστόσο, επαναλαμβάνεται για μια ακόμα φορά πως η προσέγγιση που ακολουθείται στην συγκεκριμένη εργασία θεωρεί πως η απόσβεση κατά 60dB είναι αρκετή για να θεωρηθεί πως η εκάστοτε νότα έχει αποσβέσει.

Ο τρόπος (1,1)H

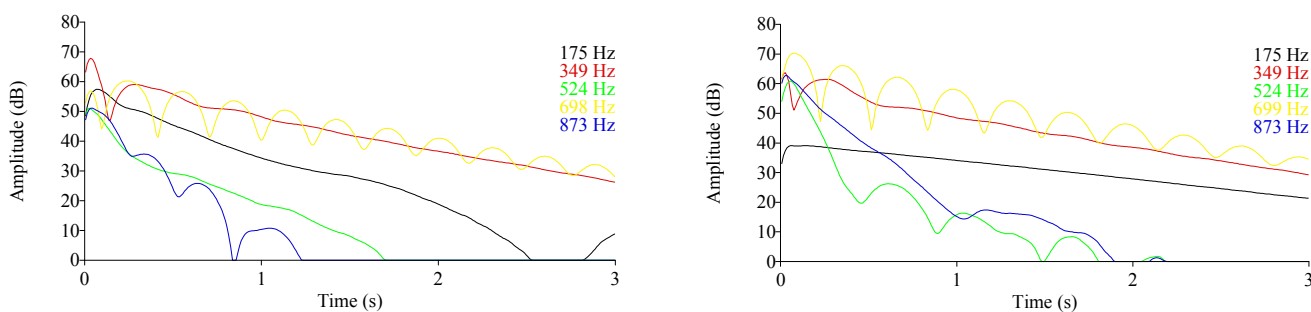
Όπως έχει αναφερθεί, ο συντονισμός της αέρινης συχνότητας (1,1)H ή συχνότητας Helmholtz δεν επιδρά μόνο στα αρμονικά στοιχεία που βρίσκονται γύρω από αυτόν αλλά γενικά στις χαμηλότερες συχνότητες του οργάνου. Για να εντοπιστεί το χαρακτηριστικό αυτό στο τετράχορδο μπουζούκι πραγματοποιήθηκε μια μέτρηση 52 νοτών με διπλές χορδές σε μέση ένταση με την οπή ανοικτή και μια κατά την οποία η οπή σφραγίστηκε με χρήση πολύ λεπτού αυτοκόλλητου φύλλου. Από τις νότες αυτές αναλύθηκαν οι ενεργειακές κατανομές που είναι πλέον γνωστές ως αρχική ενέργεια και ενέργεια πτώσης και τα αποτελέσματα της μέτρησης φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 5.18: Αρχική ενέργεια (μαύρη γραμμή) και ενέργεια πτώσης (διακεκομμένη) για 52 νότες που εκτελέστηκαν με μέση προς δυνατή ένταση με την οπή του οργάνου ανοιχτή (Hole Open) και στην συνέχεια κλειστή (Hole closed).

Διακρίνεται από τα διαγράμματα πως η επίδραση του συντονισμού του αέρα είναι πολύ ισχυρή στα ηχητικά χαρακτηριστικά του οργάνου. Η «αφαίρεση» του συντονισμού αυτού φαίνεται να επηρεάζει όλα τα αρμονικά στοιχεία των νοτών τα οποία βρίσκονται κάτω από τα 300Hz μεταβάλλοντας γενικά την ισορροπία του φάσματος. Ωστόσο, τα βασικά χαρακτηριστικά της σύζευξης γύρω από τα 500Hz και 750-850Hz όπου βρίσκονται οι τρόποι (1,2) και (1,3),(3,2),(3,2)2 αντίστοιχα, δεν δείχνουν να επηρεάζονται από αυτήν την «απώλεια».

Εκτός βέβαια από τις ενεργειακές κατανομές είναι προφανές πως μεταβάλλονται και τα χαρακτηριστικά του ρυθμού πτώσης της έντασης και κυρίως γύρω από την περιοχή του (1,1)H. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένα παράδειγμα αυτών των μεταβολών στις περιβάλλουσες έντασης των αρμονικών της νότας F3 (175Hz) όταν εκτελέστηκε με ανοικτή και κλειστή οπή αντίστοιχα.



Εικόνα 5.19 : Αρμονικές περιβάλλουσες της νότας F3 στην χορδή C3 με διπλές χορδές και με ανοιχτή οπή (αριστερό διάγραμμα) και κλειστή (δεξί).

Εστιάζοντας αρχικά στην θεμέλιο (175Hz) διακρίνονται τα γνωστά χαρακτηριστικά της σύζευξης που έχουν αναλυθεί μέχρι στιγμής και είναι το μεγάλο πλάτος ταλάντωσης που αποσβένει με γρήγορο ρυθμό. Ωστόσο, όταν η οπή είναι κλειστή φαίνεται χαρακτηριστικά πως το αρχικό πλάτος ταλάντωσης είναι κατά περίπου 20dB μικρότερο ενώ ο ρυθμός απόσβεσης είναι 3dB/s. Μεταβολές παρατηρούνται επίσης στους υπόλοιπους αρμονικούς που όπως έχει αναλυθεί για την συγκεκριμένη νότα τόσο σε μονή χορδή όσο και σε διπλές χορδές, συζεύγγονται με τους ισχυρούς τρόπους δόνησης του οργάνου. Ωστόσο, η συμπεριφορά είναι περίπου η ίδια και η επιρροή του τρόπου δόνησης (1,1)H στα υψηλότερα αρμονικά στοιχεία χρειάζεται περισσότερη διερεύνηση ώστε να διεξαχθούν τα ανάλογα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΤΖΟΥΡΑΣ ΚΑΙ ΜΠΑΓΛΑΜΑΣ (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ)

Η προσέγγιση των βασικότερων χαρακτηριστικών των δονήσεων και του ήχου στα μικρότερα όργανα είναι περίπου η ίδια που ακολουθήθηκε και στα όργανα του μπουζουκιού. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί, βασικές έννοιες που έχουν αναπτυχθεί για το μπουζούκι και θεωρούνται πλέον γνωστές δεν επαναλαμβάνονται. Επίσης, για λόγους απλούστευσης της ανάγνωσης των αποτελεσμάτων σε πολλά σημεία επιλέγεται η παράλληλη παρουσίαση δονητικών και ηχητικών χαρακτηριστικών.

Αυτό το επιτρέπει η ίδια η «φύση» των οργάνων όπου σε αντίθεση με τα όργανα του μπουζουκιού παρουσιάζουν σχετικά απλή δονητική συμπεριφορά με μικρότερο αριθμό διαφορετικών τρόπων δόνησης στο εύρος 100-2KHz που δεν ξεπερνούν τους 6-7 στα όργανα του τζουρά για παράδειγμα.

Ωστόσο, σημειώνεται εξ αρχής ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που παρατηρείται τόσο στα όργανα του τζουρά και ακόμα περισσότερο του μπαγλαμά και σχετίζεται με την απόκριση στην διέγερση από το ηχείο. Συγκεκριμένα, τα μικρότερα όργανα της οικογένειας του μπουζουκιού παρουσίασαν πολύ μικρή απόκριση σε σχέση με τα μπουζούκια και η στάθμη του ηχείου έπρεπε να ανέβει αρκετά (και πολλές φορές να φθάσει κοντά στα μέγιστα όριά της) έτσι ώστε να σχηματιστούν καθαρά οι τρόποι δόνησης. Το γεγονός αυτό συνδέεται ποιοτικά με την αντίσταση που παρουσιάζουν τα μικρότερα όργανα στην δύναμη διέγερσης που φαίνεται να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν των μπουζουκιών.

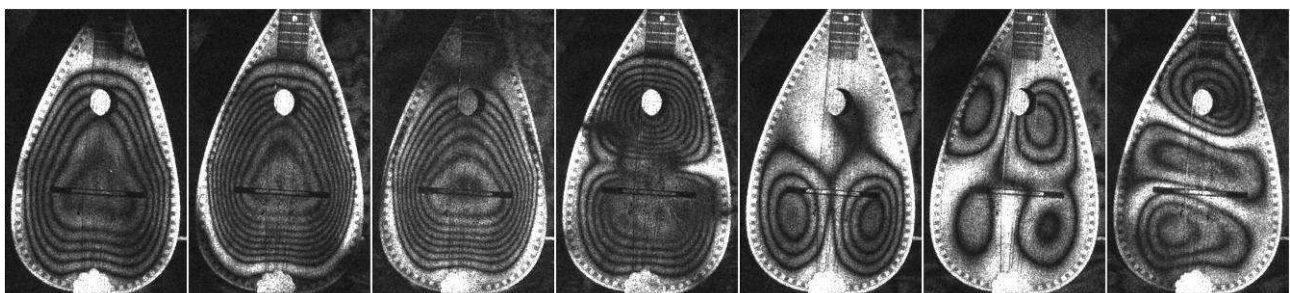
6.1 Τζουράς 1

Σε αντίθεση με τους περίπου 20 τρόπους δόνησης που εντοπίστηκαν στα τρίχορδα μπουζούκια ο τζουράς 1 εμφανίζει μόλις 6 που περιγράφονται στην συνέχεια.

6.1.1 Τρόποι δόνησης

Ο πρώτος τρόπος δόνησης του τζουρά 1 είναι αυτός της αέρινης κοιλότητας (1,1)H που εντοπίζεται στα 165Hz. Από τα 180Hz έως και τα 500Hz το καπάκι ταλαντώνεται με πολύ μικρό πλάτος γύρω με έναν τρόπο της μορφής (1,1) ενώ ο επόμενος τρόπος δόνησης ο (1,1)T εμφανίζεται στα 590Hz. Το χαρακτηριστικό με αυτόν τον τρόπο είναι πως σχηματίζει δεσμό ταλάντωσης στο κάτω μέρος του καπακιού (δίπλα από τον χορδοδέτη) και ταλαντώνεται σε δύο περιοχές φαινόμενο που παρατηρήθηκε και στα όργανα του μπουζουκιού. Ωστόσο, φυσικά και δεν μπορεί να

χαρακτηριστεί ως (1,2) καθώς η κατώτερη περιοχή ταλαντώνεται με ελάχιστο πλάτος και μικρή επιφάνεια ταλάντωσης. Ο τρόπος αυτός συνεχίζει να ταλαντώνεται έως τα 670Hz ενώ όπως διακρίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα το πλάτος ταλάντωσης στο κάτω μέρος του καπακιού (δίπλα στον χορδοδέτη) φθίνει σταδιακά μέχρι να μηδενιστεί στα 630Hz ενώ όμως αντίστοιχο στην μεγαλύτερη επιφάνεια του καπακιού μένει αμετάβλητο ακόμα και έως τα 650Hz. Οι φασικές σχέσεις που διέπουν τις δύο αυτές μορφές με τις οποίες εμφανίζεται ο τρόπος (1,1)T δεν είναι γνωστές. Ωστόσο είναι προφανές πως όταν διεγείρονται και οι 2 ταυτόχρονα τότε είναι πολύ πιθανό να εμφανιστούν φαινόμενα διχοτόμησης και στο φάσμα της απόκρισης του οργάνου να υπάρχουν δύο κορυφές γύρω από τον (1,1)T. Η αιτία της εμφάνισης του (1,1)T με αυτές τις δύο μορφές που στην εικόνα σημειώνονται ως (1,1)T₁ και (1,1)T₂ δεν μπορεί να προσδιοριστεί ακριβώς ωστόσο είναι γνωστό πως στα όργανα της κιθάρας αντίστοιχες σχέσεις αποδίδονται στην σύζευξη του καπακιού με το πίσω καπάκι (εδώ αντίστοιχα υπάρχει το σκάφος) [6]. Παρά ταύτα, λόγω του ότι βρίσκονται πολύ κοντά συχνοτικά και η κατανομή του πλάτους στην μεγαλύτερη επιφάνεια δεν μεταβάλλεται στο εύρος 590-650Hz στην παρούσα εργασία και οι 2 αυτοί τρόποι συναντώνται ως ο (1,1)T του τζουρά.



(1,1)H

(1,1)T₁

(1,1)T₂

(1,2)

(2,1)

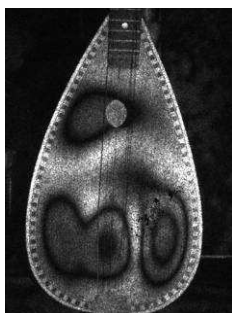
(2,2)

(1,3)

Εικόνα 6.1: Οι τρόποι δόνησης του τζουρά 1

Επόμενος τρόπος δόνησης είναι ο (1,2) στα 940Hz όπου σχηματίζονται 2 κοιλίες κατά μήκος και ένας δεσμός ταλάντωσης στο κέντρο του καπακιού λίγα εκατοστά πάνω από την γέφυρα. Στην συνέχεια εμφανίζεται ο τρόπος δόνησης (2,1) στα 1150Hz που έχει αρχίσει να σχηματίζεται ήδη από τα 1050Hz. Από αυτήν την συχνότητα και πάνω το όργανο δεν αποκρίνεται στην διέγερση και η ένταση του ηχείου αυξάνεται κατά 16dB για να σχηματιστούν οι επόμενοι δύο τρόποι δόνησης της εικόνας 5.1, που είναι οι (2,2) στα 1230Hz και (1,3) στα 1580Hz.

Στις υψηλότερες συχνότητες και κοντά στα 1900Hz εντοπίστηκε ένας τρόπος της μορφής (3,2). Ωστόσο, ο τρόπος αυτός παρατηρήθηκε καλύτερα όταν αφαιρέθηκε η γέφυρα από το όργανο και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις οι οποίες όμως δεν συγκρίνονται με τα παραπάνω καθώς σε αυτό το στάδιο της μελέτης εξετάζεται μόνο η συμπεριφορά των ολοκληρωμένων οργάνων.



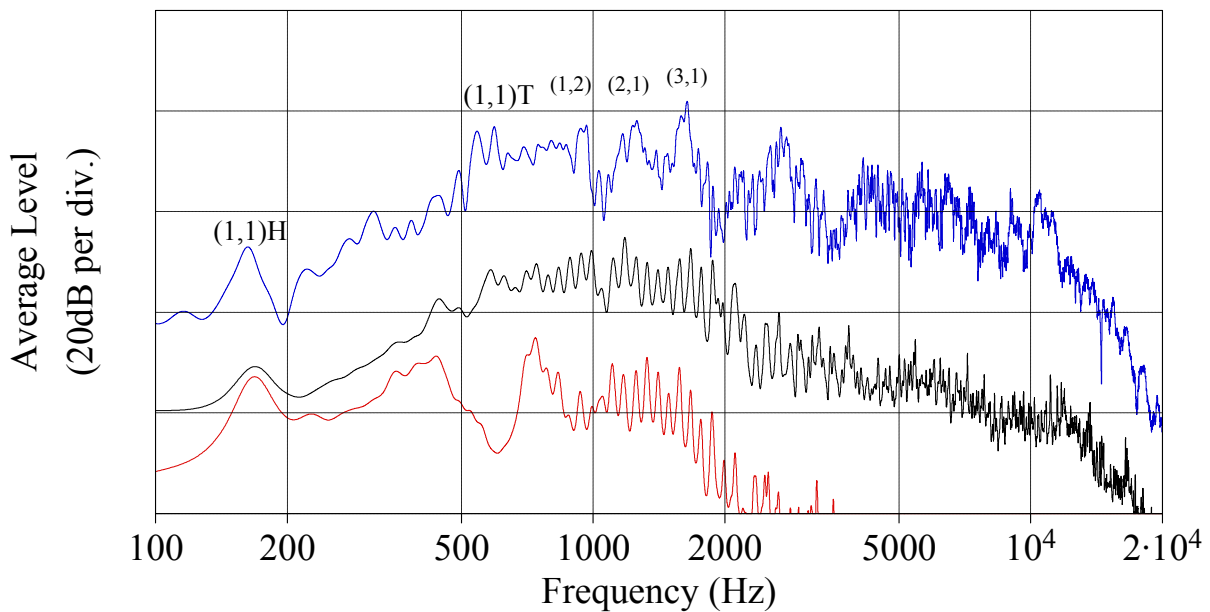
Εικόνα 6.2: Ο τρόπος δόνησης (3,2)

Φαίνεται λοιπόν από την μέθοδο της συμβολομετρίας πως ουσιαστικά ο τζουράς έχει 4 συντονισμούς έως τα 1200Hz όμως το πλάτος τους είναι πάρα πολύ μικρό. Η διαπίστωση αυτή γίνεται από τον γράφοντα συγκρίνοντας τα σχετικά πλάτη τζουρά-τρίχορδου μπουζουκιού 1 στον τρόπο δόνησης (1,1)H που βρίσκεται στην ίδια περίπου συχνότητα (161Hz) και για τα 2 όργανα. Συγκεκριμένα, το τρίχορδο μπουζούκι 1 όταν διεγέρθηκε στην αέρινη συχνότητα (1,1)H με ένταση μικρότερη κατά 12dB, εμφάνισε 42 (!) κροσσούς συμβολής έναντι των 6 που φαίνονται στην εικόνα 5.1 για τον τζουρά, με ότι αυτό συνεπάγεται για την σχετική ακουστική ισχύ που εκπέμπεται από τα 2 όργανα (και σχετίζεται με την επιφάνεια και το πλάτος ταλάντωσης). Σημειώνεται πως θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον ο υπολογισμός του πλάτους ταλάντωσης και της επιφάνειας των καπακιών με στόχο την ποσοτική σύγκριση στους τρόπους που διεγέρθηκαν με κοινή ένταση τόσο στα ίδια όσο και σε διαφορετικά όργανα. Αυτό όμως αποτελεί μια αρκετά εξειδικευμένη προσέγγιση και ξεφεύγει από το θέμα της παρούσας εργασίας χωρίς να αποκλείεται η διεξαγωγή τέτοιου είδους αποτελεσμάτων στο μέλλον αφού τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν το επιτρέπουν.

6.1.2 Απόκριση συχνότητας και ενεργειακές κατανομές του ήχου

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται οι φασματικοί μέσοι όροι για 40 κρουστικές αποκρίσεις κάθετα στο καπάκι καθώς και για τις ενεργειακές κατανομές 39 νοτών στα γνωστά χρονικά στιγμιότυπα που μελετώνται στην εργασία (αρχική ενέργεια – ενέργεια πτώσης ένα δευτερόλεπτο μετά την αρχική).

Από τα διαγράμματα της κρουστικής απόκρισης (μπλε) διακρίνεται μια συμπεριφορά που δεν έχει εμφανιστεί μέχρι στιγμής στην παρούσα εργασία. Όπως φαίνεται, ο βασικότερος τρόπος δόνησης (1,1)T εκτός του ότι εμφανίζεται με 2 κορυφές, δεν είναι ο ισχυρότερος του φάσματος, ενώ γενικά και οι 6 τρόποι δόνησης που εντοπίστηκαν κατά την μέθοδο της ESPI είναι στα ίδια επίπεδα έντασης με τον (3,1) να ξεχωρίζει στο φάσμα του μέσου όρου. Επίσης, ο (2,2) είναι πολύ κοντά στον (2,1) και για λόγους ευκρίνειας σημειώνεται στα διαγράμματα μόνο ο τελευταίος.



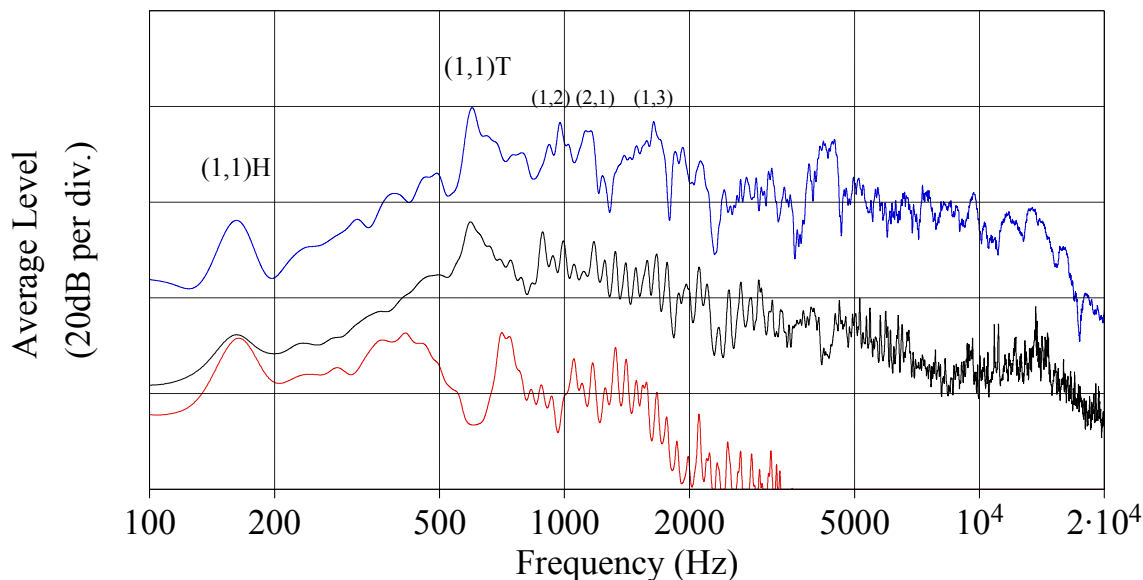
Εικόνα 6.3: Φασματικός μέσος όρος για τις 39 νότες που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές για τρία χρονικά στιγμιότυπα που αντιστοιχούν σε στην «αρχική ενέργεια» (μάυρο), στην ενέργεια πτώσης 1s μετά την αρχική (κόκκινο) και σε 40 κρούσεις με κάθετη ως προς το καπάκι φορά (μπλε) (θέση 1-mf).

Στα διαγράμματα του ήχου και συγκεκριμένα στην αρχική ενέργεια (μαύρη γραμμή) αυτές οι διαφορές γίνονται εντονότερες με τα αρμονικά στοιχεία του ήχου που βρίσκονται γύρω από τον (1,1)T να είναι ακόμα πιο χαμηλά σε ένταση ενώ μικρές κορυφές εμφανίζονται γύρω από όλους τους τρόπους δόνησης. Στις χαμηλότερες συχνότητες εμφανίζεται ο (1,1)H ενώ χαρακτηριστικό του οργάνου είναι πως όλα τα αρμονικά στοιχεία έως τα 1000Hz περίπου διαμορφώνονται από μόνο 3 τρόπους δόνησης. Παρά όμως τις μικρές «ενισχύσεις» της έντασης των αρμονικών γύρω από τους υψηλότερους τρόπους δόνησης, φαίνεται χαρακτηριστικά πως τα πλάτη των αρμονικών παρουσιάζουν σταδιακή αύξηση της έντασης από τις χαμηλότερες συχνότητες έως τα 600Hz, (1,1)T, όπου στην συνέχεια παρουσιάζουν μια περίπου ομοιόμορφη κατανομή έως και τα 1900Hz, ενώ από το σημείο αυτό και μετά υπάρχει σταδιακή πτώση έως τα υψηλότερα στοιχεία του φάσματος.

Όσο αφορά τις σχέσεις σύζευξης που διακρίνονται από τα «βυθίσματα» στο διάγραμμα της ενέργειας πτώσης και σχολιάζονται αναλυτικότερα στην συνέχεια του κεφαλαίου, στον τζουρά 1 υπάρχει ισχυρή σύζευξη με τους τρόπους δόνησης (1,1)T και (1,2). Μεγάλη διαφορά αρχικής ενέργειας και ενέργειας πτώσης παρατηρείται επίσης στην περιοχή των (2,1)-(2,2) χωρίς ωστόσο να εντοπίζεται κάποιο τοπικό ελάχιστο στο διάγραμμα ενέργειας πτώσης. Ωστόσο, τα υψηλότερα αρμονικά στοιχεία και κυρίως από την περιοχή του (1,3) και πάνω, φαίνεται να επηρεάζονται ισχυρά και από τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στην χορδή.

Μια σημαντική παρατήρηση αφορά τις σχέσεις σύζευξης με την αέρινη συχνότητα (1,1)H όπου ενώ τα πλάτη ταλάντωσης των αρμονικών «ενισχύονται» γύρω από την περιοχή παρουσιάζοντας αύξηση της ενέργειας κατά το αρχικό τους στάδιο, δεν φθίνουν ωστόσο με τον αντίστοιχο τρόπο που παρουσιάστηκε στα μπουζούκια. Αντιθέτως, φαίνεται να διατηρούν την ενέργειά στην πάροδο του χρόνου, ωστόσο τα χαρακτηριστικά της σύζευξης μελετώνται αναλυτικότερα στα επόμενα.

Στην κοντινή λήψη, οι συχνοτικές περιοχές που υπάρχουν οι τρόποι δόνησης είναι πιο ενισχυμένες και οι συντονισμοί διακρίνονται με μεγαλύτερη ευκρίνεια.

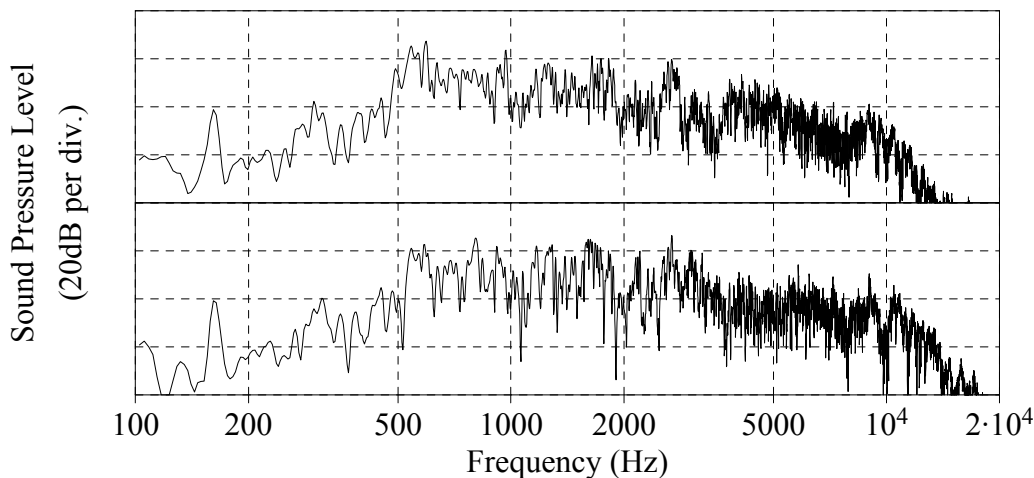


Εικόνα 6.4: Φασματικός μέσος όρος για τις 39 νότες που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές για τρία χρονικά στιγμιότυπα που αντιστοιχούν σε στην «αρχική ενέργεια» (μάυρο), στην ενέργεια πτώσης 1s μετά την αρχική (κόκκινο) και σε 40 κρούσεις με κάθετη ως προς το καπάκι φορά (μπλε) (θέση 2-mf).

Ωστόσο, στην πιο μακρινή θέση λήψης που θεωρείται και πιο ρεαλιστική ως θέση ακρόασης φαίνεται πως οι ενεργειακές διαφορές έχουν «εξομαλυνθεί» όπως αναφέρθηκε στα παραπάνω και έτσι ο «επίδοξος ακροατής» πιθανά να μην αντιληφθεί τόσο μεγάλες διαφορές της έντασης σε ολόκληρο το εύρος των τρόπων δόνησης από τον (1,1)T έως τον (1,3) και περίπου 200Hz περισσότερο.

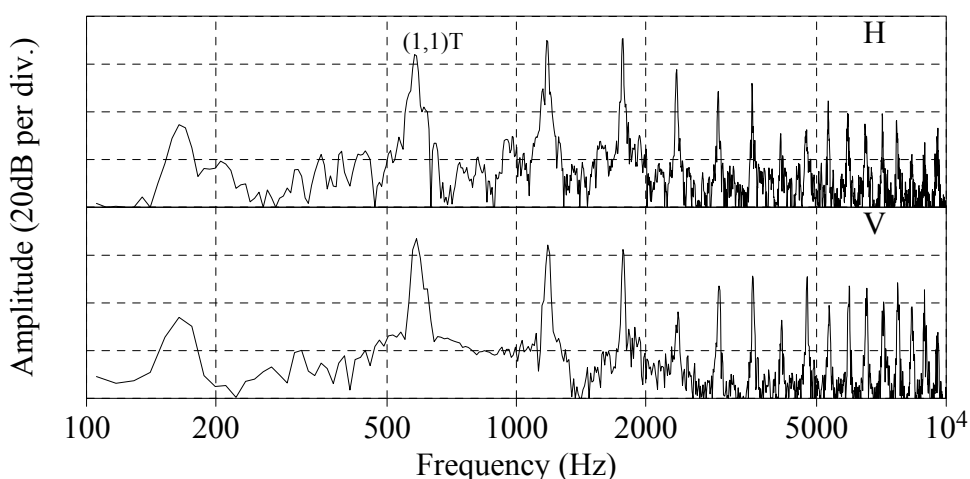
Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται οι συναρτήσεις μεταφοράς για 2 μεμονωμένες κρούσεις στην γέφυρα. Φαίνεται χαρακτηριστικά πως στην πρώτη η περιοχή του (1,1)T είναι λίγο πιο ενισχυμένη, ενώ στην δεύτερη υπάρχει μεγαλύτερη συμφωνία με τον μέσο όρο. Η τελευταία δείχνει χαρακτηριστικά πως τα μικρά πλάτη με τα οποία εμφανίστηκαν οι τρόποι δόνησης κατά την μέθοδο της ESPI έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πιο «ευθείας» κατανομής της ενέργειας τόσο στην συχνοτική απόκριση όσο και στον ήχο. Η ενισχυμένη περιοχή γύρω από τα 3KHz που φαίνεται σε όλα τα διαγράμματα δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας μελέτης καθώς δεν μπορεί

να προσδιοριστεί το κατά πόσο είναι αποτέλεσμα κάποιου/ων τρόπου δόνησης του καπακιού ή κάποιου άλλου τμήματος του οργάνου (γέφυρα, αέρας κλπ).



Εικόνα 6.5: συνάρτηση μεταφοράς δύο μεμονωμένων κρούσεων στην γέφυρα.

Σημειώνεται πως χαρακτηριστικό της μη ισχυρής διέγερσης του βασικότερου τρόπου δόνησης διαμορφώνεται όπως είναι γνωστό και από την τεχνική εκτέλεσης (θέση και γωνία διέγερσης) αφού όπως φαίνεται στο γράφημα που ακολουθεί μεταβάλλοντας την γωνία ο εκτελεστής «εντείνει» τις δυνάμεις σύζευξης των τρόπων δόνησης της χορδής με τον (1,1)T με αποτέλεσμα το πλάτος του αντίστοιχου αρμονικού να εμφανίζεται με μεγαλύτερη αρχική ένταση. Επίσης, στα φάσματα φαίνεται και ο (1,1)H που διεγείρεται από την «στιγμιαία» απελευθέρωση της χορδής από την πένα όπως χαρακτηριστικά αναφέρθηκε σχετικά με την φύση της διέγερσης (4.2.1.5 Χρόνοι ανόδου)

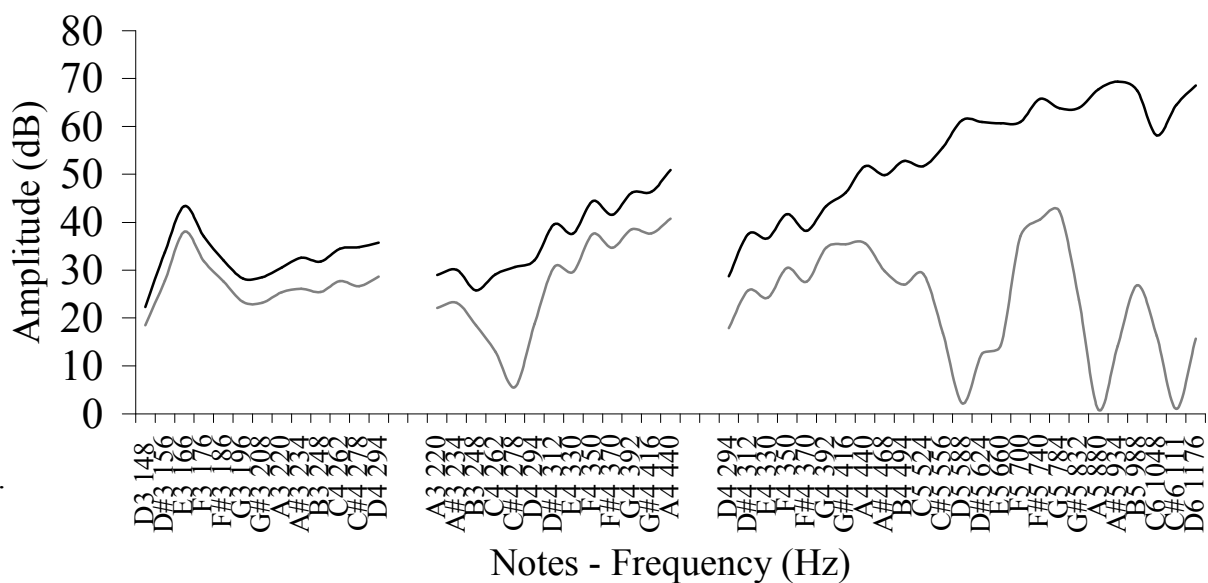


Εικόνα 6.6 : Φάσμα (0-200ms) της νότας D5 στο ζεύγος της χορδής D4 του τζουρά 1 που εκτελέστηκε με διαφορετική γωνία στο διέγερσης. Περίπου παράλληλη με το καπάκι διέγερση (H) και κάθετη αντίστοιχα (V).

Ωστόσο, δεν ελήφθησαν δείγματα για όλες τις νότες με κάθετη προς το καπάκι γωνία διέγερσης η οποία βέβαια δεν είναι και καθόλου ρεαλιστική όσο αφορά την πραγματική εκτέλεση των οργάνων.

6.1.3 Σχέσεις σύζευξης με μονές χορδές και διπλές χορδές

Οι σχέσεις σύζευξης χορδής-καπακιού που σχολιάστηκαν συνοπτικά στα προηγούμενα διακρίνονται πιο αναλυτικά στα διαγράμματα αρχικής έντασης και πτώσης έντασης των θεμελίων 51 νοτών που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές. Φαίνεται πως η χορδή του τζουρά συζεύγνυται ισχυρά τόσο με τον τρόπο δόνησης (1,1)T όσο και με τους (1,2) και (2,1) που προκαλούν δραματικές πτώσεις της έντασης των θεμελίων των αντίστοιχων νοτών στην D4 χορδή.

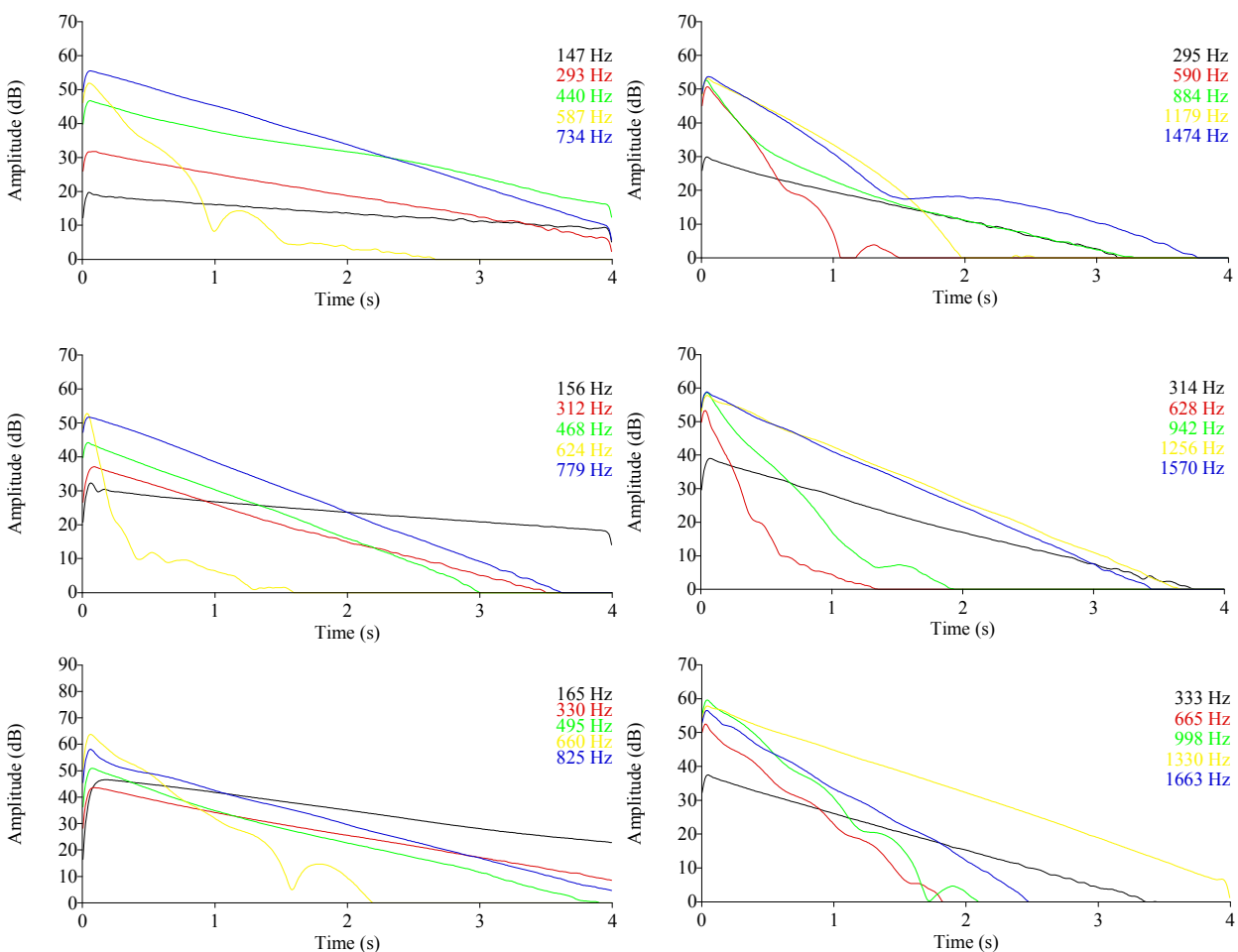


Εικόνα 6.7: Αρχική ένταση και πτώσης έντασης για 51 νότες εκτελεσμένες σε μονές χορδές.

Ωστόσο, το ότι η συνολική διάρκεια της νότας μειώνεται ανάλογα με το μήκος της χορδής μπορεί να εντείνει τα φαινόμενα αυτά για τις υψηλότερες νότες του οργάνου που εκτελούνται κοντά στα όρια της ταστιέρας. Αυτή η παρατήρηση γίνεται σε συνδυασμό με τα διαγράμματα αρχικής ενέργειας και ενέργειας πτώσης όπου στους φασματικούς μέσους όρους δεν φαίνεται να υπάρχει τόσο ραγδαία μείωση του πλάτους κυρίως γύρω από τον τρόπο δόνησης (1,2). Επίσης, από την εικόνα 6.7 φαίνεται πως οι διαφορές αρχικής – πτώσης έντασης γύρω από τις θεμελίους των νοτών που βρίσκονται μεταξύ των τρόπων δόνησης (1,2) και (2,1) είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες γύρω από τον (1,1)T. Άρα, όπως περιγράφηκε, τα φαινόμενα σύζευξης των υψηλότερων τρόπων δόνησης «υπερεκτιμώνται» στα αντίστοιχα διαγράμματα. Τα μέγιστα πλάτη ταλάντωσης των θεμελίων δείχνουν κοινή συμπεριφορά σε σχέση με τα διαγράμματα των

ενεργειακών κατανομών στην θέση 1 όπου τα αρμονικά στοιχεία γύρω από την θέση 1 είναι μικρότερα σε πλάτος από τα υψηλότερά τους.

Στην χορδή D3 εμφανίζεται το φαινόμενο που αναφέρθηκε στα προηγούμενα σχετικά με τα χαρακτηριστικά της σύζευξης της χορδής με τον τρόπο (1,1)H. Φαίνεται λοιπόν πως ο συγκεκριμένος συντονισμός λειτουργεί απλά ως ένα φίλτρο ζώνης που ενισχύει την ένταση των αντίστοιχων αρμονικών και σε αντίθεση με τα μπουζούκια δεν αυξάνει σημαντικά την ένταση πτώσης. Τέλος, στην χορδή A3 γύρω από τα 278Hz εμφανίζεται μείωση μη αναμενόμενη μείωση του πλάτους ταλάντωσης (περί τα 23dB) που αποδίδεται σε κάποιο χαρακτηριστικό του οργάνου ή των χορδών όπως τα αντίστοιχα που εντοπίστηκαν στο τετράχορδο μπουζούκι και στο τρίχορδο μπουζούκι.



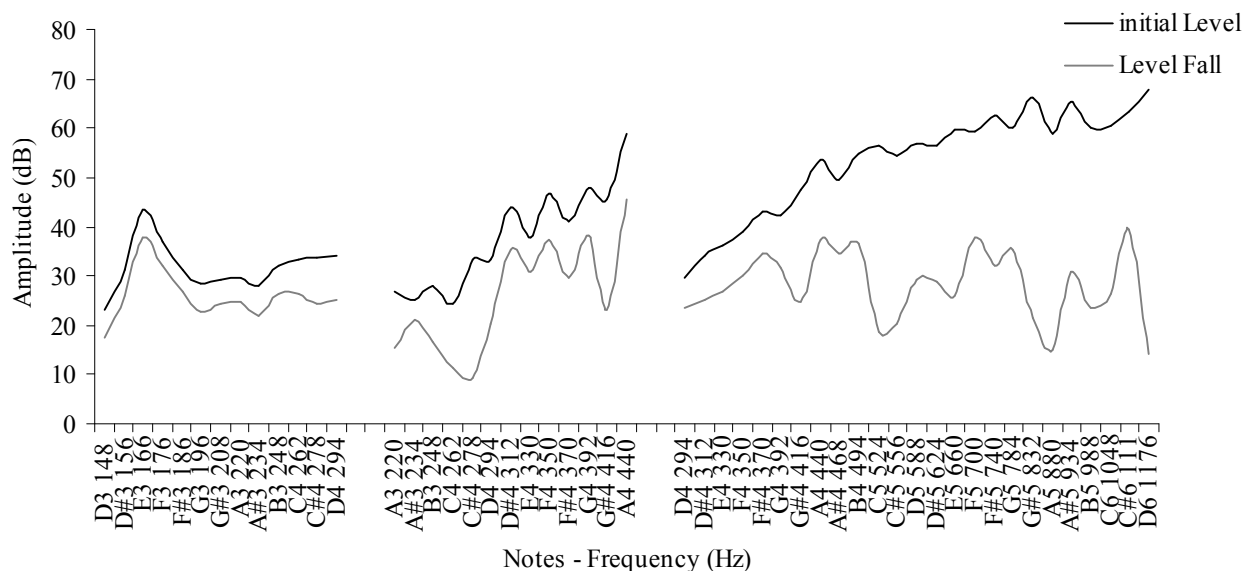
Εικόνα 6.8 : Αρμονικές περιβάλλουσες των νοτών D3-E3 (147Hz-165Hz) στην χορδή D3 και οι αντίστοιχες νότες μια οκτάβα πάνω (294-333Hz) στην χορδή D4.

Παρατηρώντας τυπικές νότες που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές στον τζουρά 1 διακρίνονται τα φαινόμενα της ισχυρής σύζευξης με τον τρόπο δόνησης (1,1)T γύρω από τα 580 με 660Hz στις χορδές D3 και D4 όσο και με τον (1,2) στον 3^ο αρμονικό της νότας D#4 στην χορδή D4 (δεξιά

στήλη). Φαίνεται πως και στις 2 χορδές η ισχυρότερη σύζευξη με τον (1,1)T συμβαίνει στα 624-628Hz όπου ο ρυθμός πτώσης του πλάτους των αντίστοιχων αρμονικών είναι και ο μεγαλύτερος. Χαρακτηριστική είναι η συμπεριφορά των υπόλοιπων αρμονικών στοιχείων που αποσβένουν με σχεδόν εκθετικό ρυθμό αφού δεν συζεύγγονται με κάποιο ισχυρό τρόπο δόνησης. Τέλος, από τις αρχικές εντάσεις των αρμονικών διακρίνεται στην χορδή D3 πως η αέρινη συχνότητα προκαλεί αύξηση της θεμελίου κατά 28dB στην νότα E3 (165Hz) σε σχέση με την πιο μπάσα D3 (147Hz).

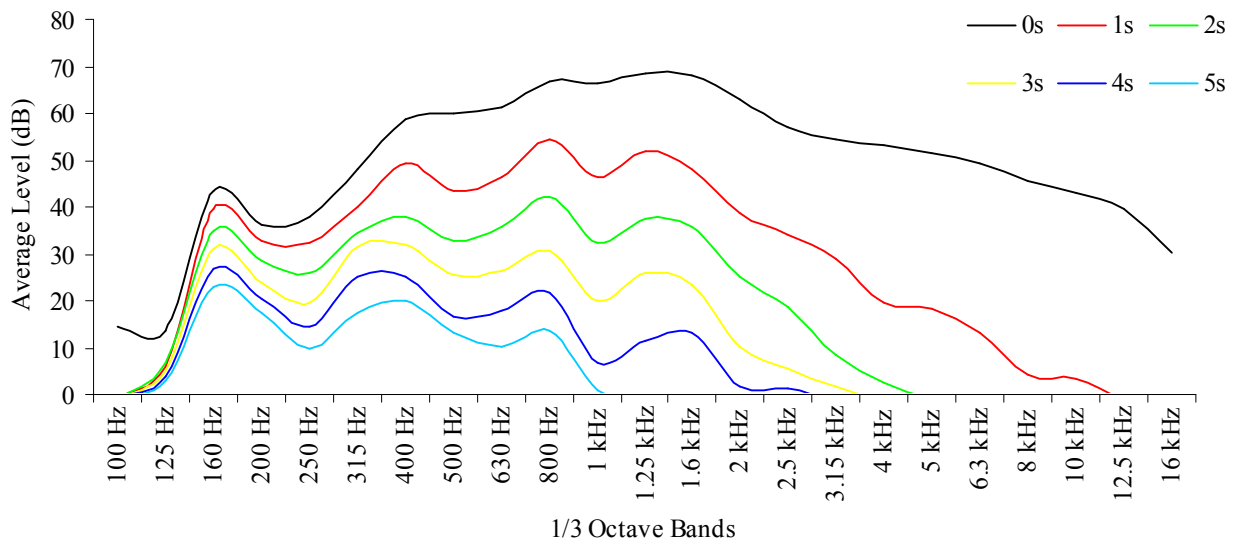
Επεκτείνοντας την ανάλυση του ήχου στις νότες που εκτελέστηκαν σε διπλές χορδές σε μέση ένταση εντοπίζονται φαινόμενα αντίστοιχα με αυτά που παρατηρήθηκαν στα όργανα του μπουζουκιού. Οι σχέσεις ισχυρής σύζευξης αμβλύνονται και η ενέργεια ταλάντωσης των χορδών διατηρείται σε μεγαλύτερα επίπεδα με την πάροδο του χρόνου.

Αυτό φαίνεται στα διαγράμματα αρχικής-πτώσης έντασης των θεμελίων 51 νοτών στην θέση 1.

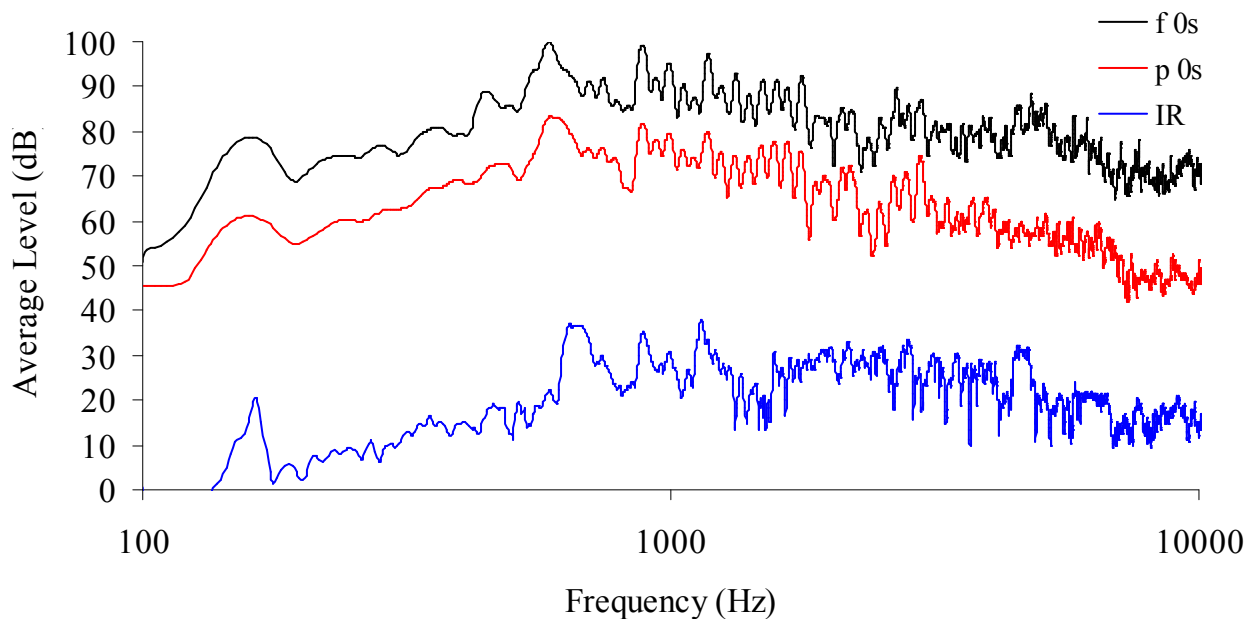


Εικόνα 6.7: Αρχική ένταση και πτώσης έντασης για 51 νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές.

Η γενική συμπεριφορά της ενεργειακής κατανομής 39 νοτών στην θέση 1 περιγράφεται στα αντίστοιχα διαγράμματα σε ανάλυση τριτοκτάβας για 6 διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα. Οι ενεργειακές κατανομές σε ζώνες τριτοκτάβας δείχνουν γενικά πως η αλληλεπίδραση των διπλών χορδών μεταβάλλει τα φαινόμενα σύζευξης χωρίς όμως να επιδρά στον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται η αρχική ενέργεια γύρω από τους ισχυρότερους τρόπους δόνησης του οργάνου. Ωστόσο, λόγω του ότι αυτές οι σχέσεις παρουσιάζονται πιο «ομαλοποιημένες» στο διάγραμμα που ακολουθεί παρατίθενται οι φασματικοί μέσοι όροι 51 νοτών εκτελεσμένες με διπλές χορδές στην θέση 2 σε δύο δυναμικά επίπεδα, ένα χαμηλής έντασης (p) και ένα δυνατής (f). Παράλληλα, παρατίθεται και ένα φάσμα μέσου όρου 15 κρουστικών αποκρίσεων από όπου φαίνεται ο τρόπος με τον ο οποίος οι συντονισμοί του οργάνου «διαμορφώνουν» την αρχική ακουστική ενέργεια.



Εικόνα 6.10: Ενεργειακές κατανομές σε ζώνες τριτοκτάβας για 39 νότες με διπλές χορδές (mf - θέση 1).

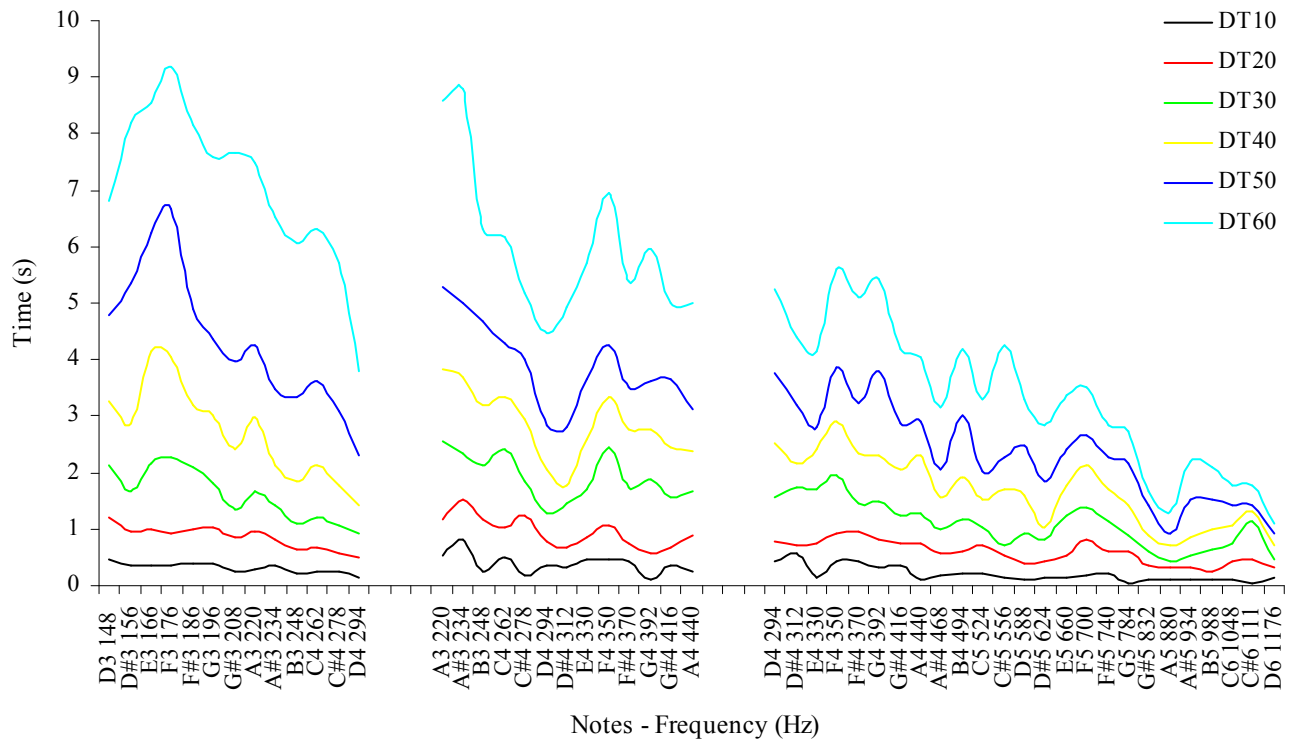


Εικόνα 6.11: Αρχική ενέργεια σε δύο δυναμικά επίπεδα και φασματικός μέσος όρος 15 κρουστικών αποκρίσεων στην θέση 2.

Οι περιβάλλουσες έντασης των θεμελίων που περιγράφονται μέσω των χρονικών τιμών πτώσης της έντασης ανά 10dB δείχνουν:

Στο ζεύγος της πιο μπάσας χορδής D3 ο συντονισμός του αέρινου όγκου (1,1)H έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των χρονικών τιμών DT30-60 των νοτών E3 και F3 ενώ στις υπόλοιπες

νότες εμφανίζεται μια ομαλή πτώση των συνολικών τιμών καθώς το τονικό ύψος των νοτών αυξάνεται. Αυτή η συμπεριφορά είναι απόλυτα αναμενόμενη με βάση τα όσο είναι γνωστά μέχρι



Εικόνα 6.12: Οι χρόνοι DT10-60 για 51 νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές (mf - θέση 1)

στιγμής από το σύνολο της εργασίας. Συγκεκριμένα, στο πρώτο δευτερόλεπτο φαίνεται πως τα υψηλότερα αρμονικά στοιχεία του φάσματος αποσβένουν αρκετά γρήγορα με αποτέλεσμα η ένταση των 2 αυτών νοτών (E3 και F3) να μειώνεται κατά 20dB. Στην συνέχεια όμως που τα μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας εκπέμπονται από τις θεμελίους και έναν μικρό αριθμό αρμονικών που επηρεάζονται λιγότερο από τις δυνάμεις τριβής του «συστήματος» η απόσβεση του πλάτους ταλάντωσης γίνεται βραδύτερη.

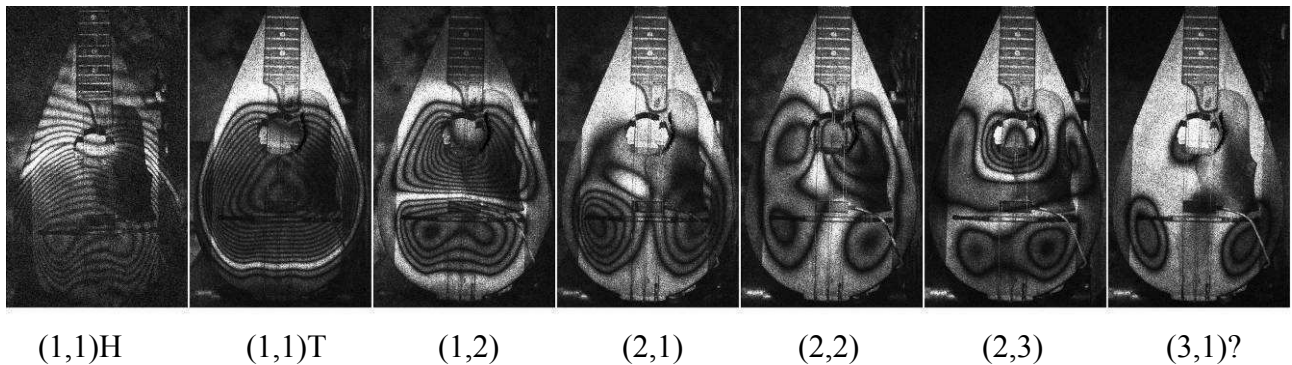
Στην χορδή A3 η συμπεριφορά είναι επίσης αναμενόμενη με εξαίρεση τις νότες D4 και D#4 που αποσβένουν ταχύτερα. Ωστόσο, αυτά τα φαινόμενα αποδίδονται σε άλλα χαρακτηριστικά του οργάνου ή του οργανοπαίκτη και όχι στους βασικούς τρόπους δόνησης και σε αυτό το στάδιο θεωρείται συμπτωματικό το ότι οι 2^{οι} αρμονικοί των νοτών αυτών αντιστοιχούν στον (1,1)T του τζουρά.

Τέλος, στην χορδή D3 διακρίνεται μια ομαλή πτώση της συνολικής διάρκειας των νοτών σε σχέση με την αύξηση του τονικού ύψους όπως έχει παρατηρηθεί και στα υπόλοιπα όργανα της μελέτης.

6.2 Τζουράς 2

6.2.1 Δονητικά και ηχητικά χαρακτηριστικά

Στον δεύτερο τζουρά που μελετήθηκε στην εργασία, παρατηρήθηκαν περίπου οι ίδιοι τρόποι δόνησης με τον πρώτο που περιγράφηκε στα προηγούμενα. Ωστόσο, οι συχνότητες στις οποίες εντοπίστηκαν (οι τρόποι δόνησης) διαφέρουν κατά μεγάλο ποσοστό όπως περιγράφεται στην συνέχεια.

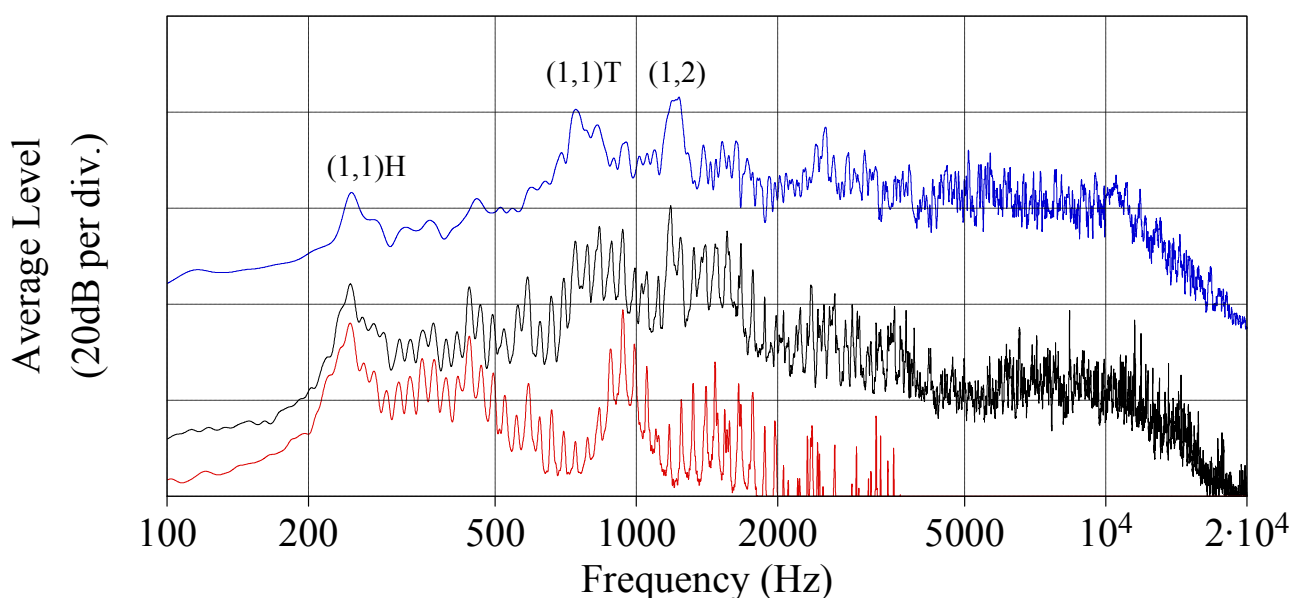


Εικόνα 6.13: Οι τρόποι δόνησης του τζουρά 2

Ο πρώτος τρόπος δόνησης του τζουρά 2 είναι αυτός της αέρινης κοιλότητας (1,1)_H που βρίσκεται στα 248Hz. Από τα 300 Hz έως και τα 650Hz το καπάκι ταλαντώνεται με πολύ μικρό πλάτος γύρω με έναν τρόπο της μορφής (1,1) ενώ ο επόμενος τρόπος δόνησης ο (1,1)_{T1} εμφανίζεται στα 780Hz. Και αυτός ο τρόπος σχηματίζει δεσμό ταλάντωσης στο κάτω μέρος του καπακιού (δίπλα από τον χορδοδέτη) όπως τον αντίστοιχο στον τζουρά 1 που χαρακτηρίστηκε ως (1,1)_{T1}. Έτσι, παρόλο που δεν εντοπίστηκε ο (1,1)_{T2} πιθανολογείται η ύπαρξή του με βάση την συμπεριφορά του τζουρά 1. Επόμενος τρόπος δόνησης στον τζουρά 2 είναι ο (1,2) που έχει μέγιστο πλάτος ταλάντωσης στα 1181Hz. Στην συνέχεια το όργανο δεν αποκρίνεται στην διέγερση και αναγκαστικά η ένταση του ηχείου αυξάνεται κατά 16dB έτσι ώστε να εντοπιστούν και οι υπόλοιποι τρόποι δόνησης. Το καπάκι αρχίζει να ταλαντώνεται με έναν τρόπο της μορφής (2,1) από τα 1360Hz, παρουσιάζει μια ελάχιστη αύξηση του πλάτους (+1 κροσσό συμβολής στην κάτω αριστερή εστία ταλάντωσης) στα 1560Hz και φθίνει έως τα 1660Hz όπου αρχίζει να δημιουργείται ο (2,2) που παρουσιάζει μέγιστο στα 1720Hz. Παρατηρείται από την εικόνα πως ένας τρόπος αντίστοιχος με τον 1,3 του τζουρά 1 εντοπίζεται στα 2130Hz. Ωστόσο, η κατανομή του πλάτους φαίνεται να είναι διαφορετική και ουσιαστικά κατά μήκος του καπακιού εντοπίζονται τουλάχιστον 2 εστίες και με αποτέλεσμα ο τρόπος αυτός να περιγράφεται καλύτερα ως ο (2,3) στο σύστημα των 2 ακεραίων. Τέλος φαίνεται ένας τρόπος με δύο εστίες δόνησης στο κάτω τμήμα του καπακιού στα

2500Hz. Όπως παρατηρείται από την εικόνα 6.13 μεταξύ των δύο αυτών εστιών υπάρχει μία «σκιά» χωρίς να δημιουργείται όμως τρίτη εστία ταλάντωσης. Ωστόσο, με βάση τις παρατηρήσεις που έχουν γίνει πάνω στην σειρά με την οποία εμφανίζονται οι τρόποι δόνησης και στον τζουρά 1, εκεί αναμένεται να υπάρχει ένας τρόπος δόνησης της μορφής (3,2) 2350Hz παρόλο που δεν σχηματίστηκε με την συγκεκριμένη μορφή. Ωστόσο, φαίνεται από τα σχετικά πλάτη ταλάντωσης των τρόπων δόνησης πως ο τζουράς 2 όπως και ο τζουράς 1 χαρακτηρίζεται από 3 βασικούς τρόπους δόνησης έως τα 1200Hz περίπου ενώ στην συνέχεια παρουσιάζει μια πιο «γραμμική» συμπεριφορά ή με άλλα λόγια σταθερή απόκριση σε ένα μεγάλο εύρος χωρίς κάποιον «εξέχοντα» συντονισμό στο εύρος παρατήρησης.

Αντίστοιχα χαρακτηριστικά εντοπίζονται τόσο στην κρουστική απόκριση όσο και στις ενεργειακές κατανομές του ήχου για 39 νότες εκτελεσμένες σε μονές χορδές.



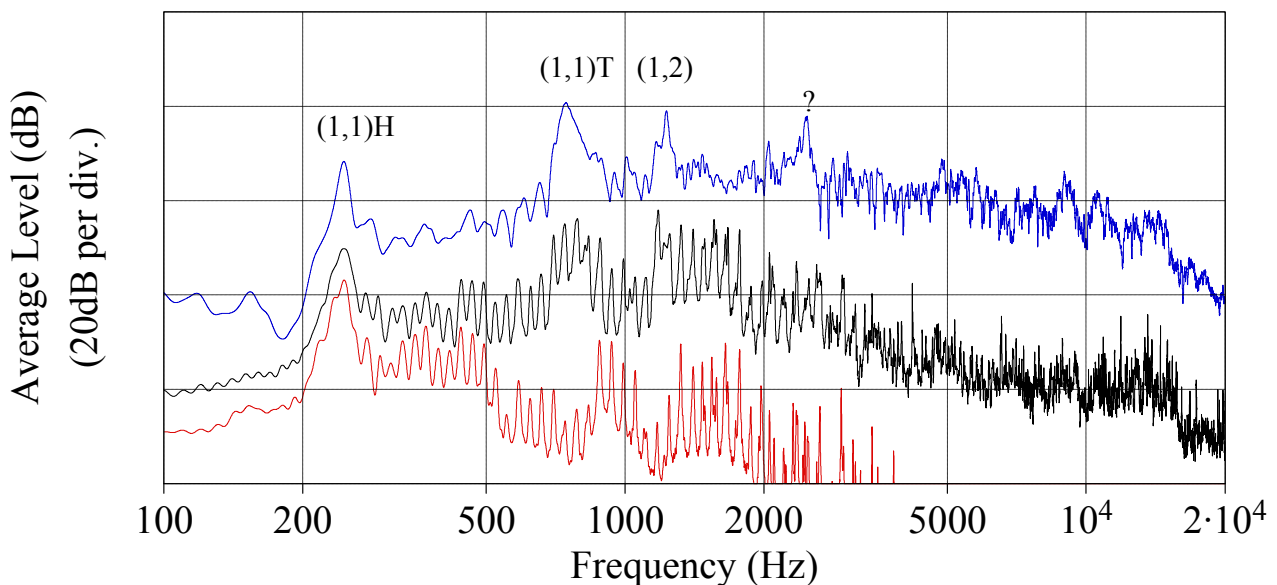
Εικόνα 6.14: Φασματικός μέσος όρος για τις 39 νότες που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές για τρία χρονικά στιγμιότυπα που αντιστοιχούν σε στην «αρχική ενέργεια» (μάυρο), στην ενέργεια πτώσης 1s μετά την αρχική (κόκκινο) και σε 30 κρούσεις με κάθετη ως προς το καπάκι φορά (μπλε) (θέση 1-mf).

Παρατηρείται από το διάγραμμα της κρουστικής απόκρισης (μπλε γραμμή) πως οι μόνοι τρόποι που ξεχωρίζουν είναι αυτοί με το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης όπως εντοπίστηκαν από την ESPI και είναι οι (1,1)H, (1,1)T και (1,2) ενώ ακριβώς όπως και στον τζουρά 1 ο (1,1)T δεν είναι ο ισχυρότερος συντονισμός τους φάσματος. Από τα διαγράμματα του φασματικού μέσου όρου για 39 νότες εντοπίζονται επίσης σημαντικά χαρακτηριστικά του ήχου που είναι τα εξής:

- 1) Από το διάγραμμα της «αρχικής ενέργειας» (μαύρη γραμμή) φαίνεται πως στον τζουρά 2, όπως και στον τζουρά 1, υπάρχει μια ομαλή κατανομή της ενέργειας γύρω από την περιοχή των 700 με 1800Hz χωρίς να εντοπίζονται τοπικά μέγιστα στα αρμονικά στοιχεία που

συζεύγγονται με τον (1,1)Τ. Ωστόσο, τα αρχικά πλάτη των αρμονικών που συζεύγγονται με τον (1,2) είναι λίγο πιο ενισχυμένα.

- 2) Στις χαμηλές συχνότητες που η απόκριση είναι πολύ μικρή* οι θεμέλιοι των χαμηλότερων σε συχνότητα νοτών έχουν ελάχιστο πλάτος σε σχέση με τα αντίστοιχα των υψηλότερων αρμονικών. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η αέρινη συχνότητα του οργάνου είναι κουρδισμένη περίπου στην νότα Β3 (248Hz), δηλαδή 10 ημιτόνια πάνω από την χαμηλότερη σε συχνότητα νότα του οργάνου.
- 3) Από τα διαγράμματα της ενέργειας πτώσης (κόκκινη γραμμή) φαίνεται πως υπάρχει ισχυρή σύζευξη των τρόπων δόνησης των χορδών με τους τρόπους (1,1)Τ και (1,2) αφού τα αρμονικά στοιχεία που βρίσκονται γύρω από τις συγκεκριμένες συχνοτικές περιοχές έχουν αποσβέσει τα μεγαλύτερα ποσοστά της ενέργειάς τους σε χρόνο 1s.
- 4) Τέλος, φαίνεται χαρακτηριστικά πως η επίδραση του τρόπου (1,1)Η στην ενέργεια πτώσης είναι αντίστοιχη με αυτή του τζουρά 1 και διαφοροποιείται σημαντικά από τα όσα έχουν παρατηρηθεί στα όργανα του μουζουκιού. Αυτή η συμπεριφορά όμως περιγράφεται καλύτερα στην συνέχεια της παραγράφου.



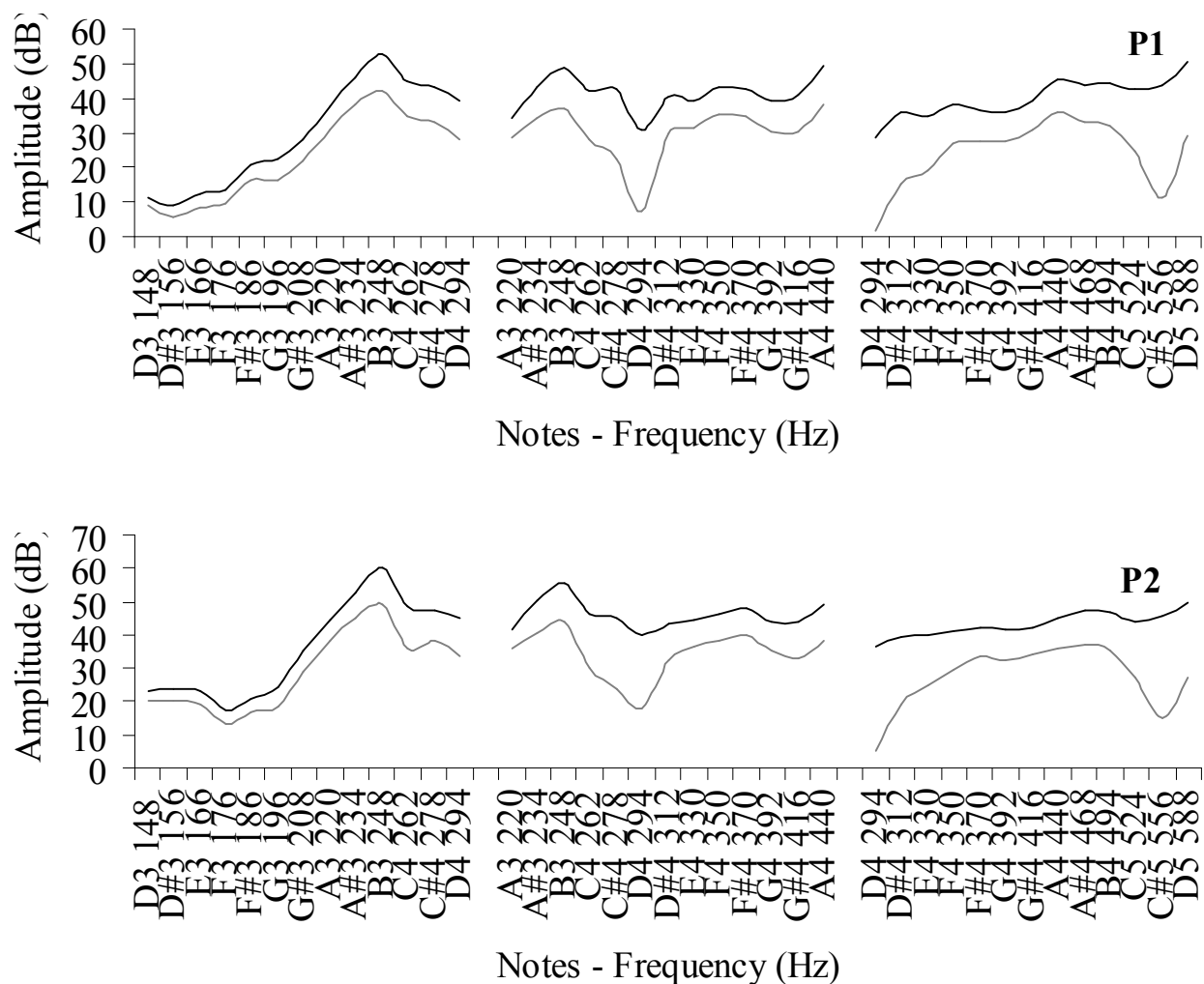
Εικόνα 6.15: Φασματικός μέσος όρος για τις 39 νότες που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές για τρία χρονικά στιγμότυπα που αντιστοιχούν σε στην «αρχική ενέργεια» (μάυρο), στην ενέργεια πτώσης 1s μετά την αρχική (κόκκινο) και σε 30 κρούσεις με κάθετη ως προς το καπάκι φορά (μπλε) (θέση 2-mf).

Στην κοντινή θέση λήψης παρατηρούνται τα αντίστοιχα φαινόμενα όσο αφορά τους βασικότερους τρόπους δόνησης, τις κατανομές ενέργειας και τις σχέσεις σύζευξης. Ωστόσο, φαίνεται από τον φασματικό μέσο όρο 15 κρουστικών αποκρίσεων πως υπάρχει συγκέντρωση

* Αναφέρεται πως η απόκριση είναι αρκετά μικρότερη από τις τιμές του διαγράμματος, ωστόσο για λόγους παρουσίας επιβάλλεται η «ομαλοποίηση» αυτών που φαίνεται να ενισχύει τις τιμές αυτές όπως και ο φασματικός μέσος όρος στα διαγράμματα του ήχου.

ενέργειας γύρω από τα 2400Hz που ιδανικά θα μπορούσε να αποδοθεί στον τρόπο δόνησης 3,1. Αυτός ο συντονισμός εντοπίζεται και στα αντίστοιχα διαγράμματα στην θέση λήψης 1. Ωστόσο, το ότι βρίσκεται σε μια πολύ υψηλή συχνοτική περιοχή όπου ήδη οι δυνάμεις τριβής φαίνεται να επιδρούν στην πτώση του πλάτους ταλάντωσης των αρμονικών στοιχείων από το 1^ο δευτερόλεπτο σε συνδυασμό με το ότι κατά την διαδικασία της ESPI δεν εντοπίστηκε κανένας τόσο ισχυρός συντονισμός οδηγεί στο συμπέρασμα πως το πιο πιθανό είναι η κορυφή αυτή να αντιστοιχεί σε κάποιον συντονισμό του αέρα, της γέφυρας ή άλλων παραγόντων που δεν μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

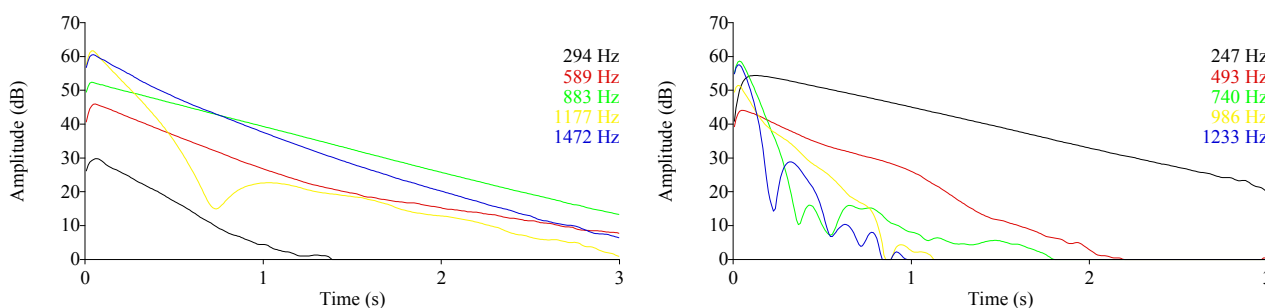
Η επίδραση του συντονισμού του αέρα φαίνεται στα διαγράμματα αρχικής έντασης και πτώσης έντασης στις 39 νότες που εκτελέστηκαν με μονές χορδές.



Εικόνα 6.16:: Αρχική ένταση και πτώσης έντασης για 51 νότες εκτελεσμένες σε μονές χορδές. Θέση 1 (P1) και θέση 2 (P2)

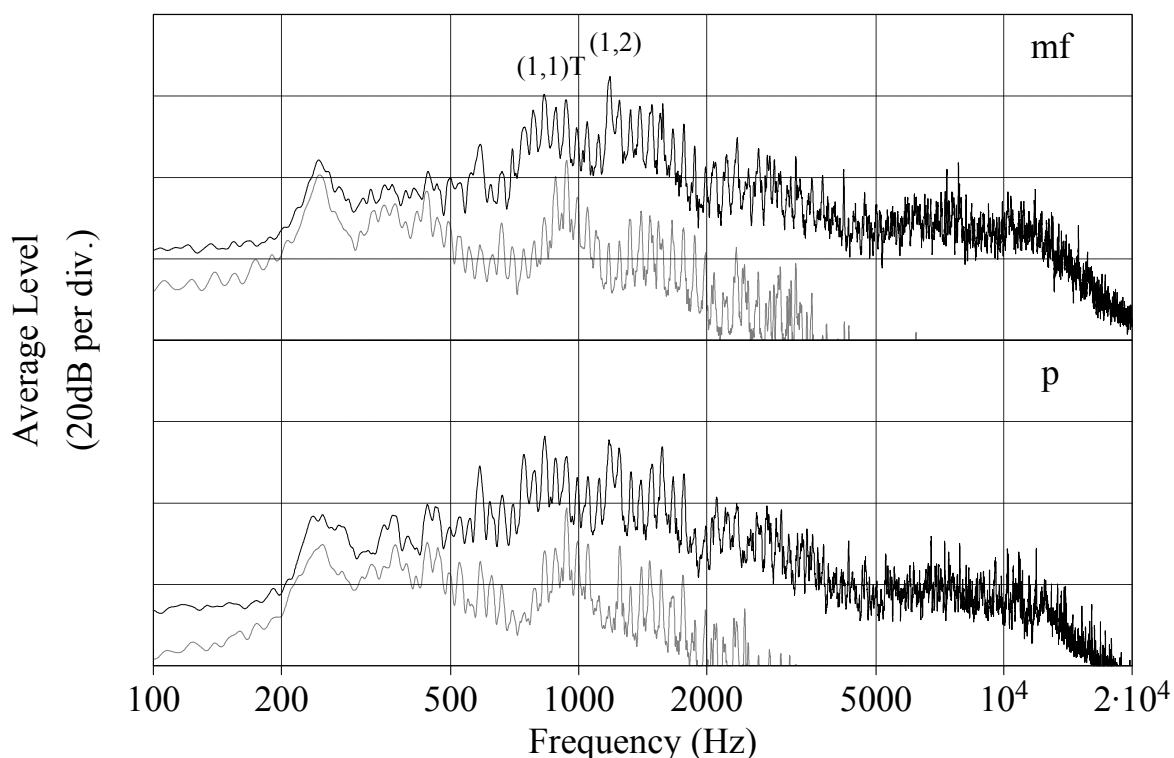
Όπως διακρίνεται από τα διαγράμματα αρχικής-πτώσης έντασης στις 2 θέσεις λήψης το όργανο δεν αποκρίνεται στις χαμηλές συχνότητες οι θεμέλιοι των οποίων είναι κατά πολύ μικρότεροι σε ένταση από τους υψηλότερους. Επίσης, οι μέγιστες εντάσεις και στις 2 θέσεις διακρίνονται γύρω από τον τρόπο δόνησης του αέρινου όγκου (1,1)H χωρίς όμως να παρατηρείται συμπεριφορά αντίστοιχη με αυτήν των μπουζουκιών όπου η σύζευξη με τον συγκεκριμένο τρόπο εκτός από αύξηση της αρχικής ενέργειας προκαλεί και αύξηση στον ρυθμό πτώσης αυτής. Τέλος, ένα χαρακτηριστικό που παρατηρείται είναι πως γύρω από τα 294Hz τόσο στην A3 όσο και στην D3 χορδή η ένταση πτώσης είναι μεγαλύτερη. Λόγω του ότι αυτή η συμπεριφορά δεν παρατηρείται στην χορδή D3 και του ότι δεν υπάρχει κανένας συντονισμός στην συγκεκριμένη περιοχή στο παρόν στάδιο δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι ακριβής της αιτίες. Ωστόσο, το φαινόμενο είναι ανεξάρτητο από την θέση λήψης όπως και τα αντίστοιχα σε άλλα όργανα (για παράδειγμα στην περιοχή των 220Hz στο τετράχορδο μπουζούκι) και μπορεί να οφείλεται είτε στα χαρακτηριστικά των χορδών, του οργανοπαίκτη είτε στην κατασκευή της γέφυρας και της ταστιέρας του οργάνου. Πάντως, αυτού του είδους φαινόμενα προσδιορίζονται σε αυτό το στάδιο είτε ως αποτέλεσμα δυνάμεων τριβής είτε συσχετίζονται με κάποια «βυθίσματα» στην απόκριση όπου θεωρητικά το όργανο δεν «αδυνατεί» να μετατρέψει την ενέργεια ταλάντωσης των χορδών σε ακουστική. Ωστόσο, οι παρατηρήσεις της ταχείας απόσβεσης γύρω από τις συγκεκριμένες περιοχές οδηγούν περισσότερο στην αιτιολόγηση των φαινομένων ως αποτέλεσμα «δυνάμεων τριβής», αλλά στο σύνολό τους πρέπει να αναλυθούν διεξοδικά προτού οδηγηθεί κανείς σε «ασφαλή» συμπεράσματα.

Στην εικόνα που ακολουθεί προβάλλονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά της σύζευξης χορδής καπακιού γύρω από τους τρόπους (1,1)T και (1,2) στα αρμονικά στοιχεία που βρίσκονται γύρω από τα 760Hz και 1180Hz αντίστοιχα καθώς και τα φαινόμενα που περιγράφηκαν στο τέλος της προηγούμενης παραγράφου (γύρω από τα 290Hz).



Εικόνα 6.17: Αρμονικές περιβάλλουσες έντασης στην χορδή D4

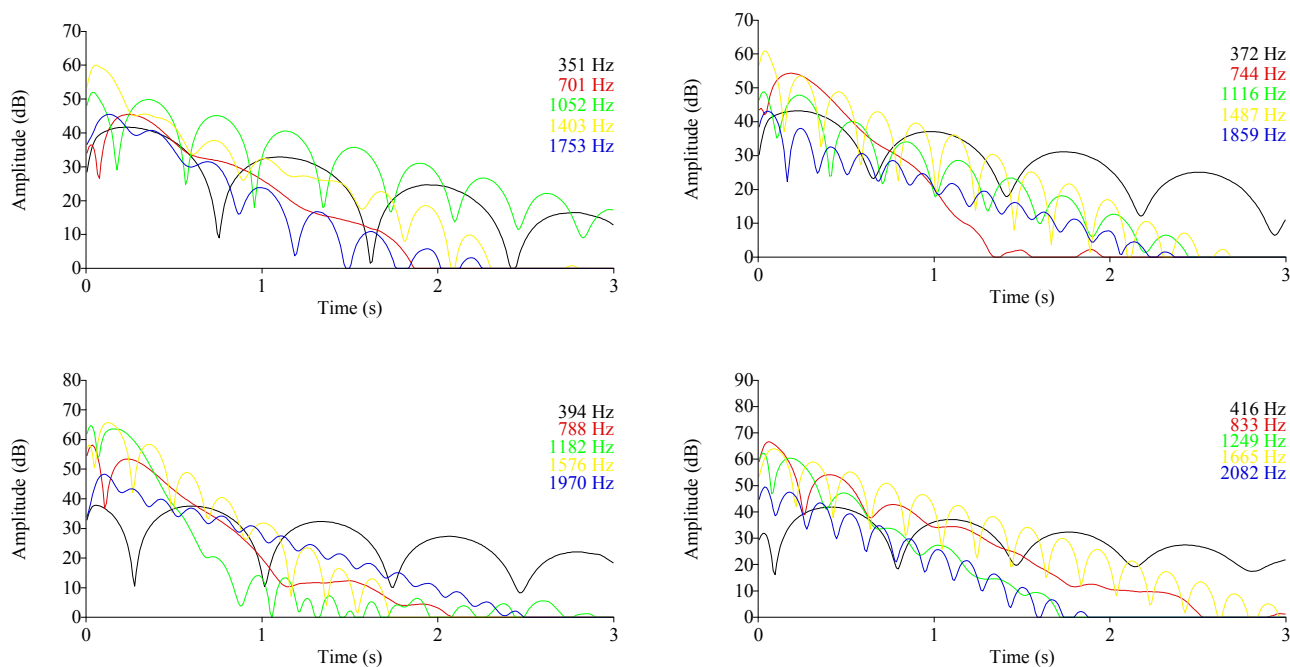
Όταν το όργανο εκτελείται με διπλές χορδές, παρατηρούνται αντίστοιχα φαινόμενα με αυτά που σχολιάστηκαν για τον τζουρά 1. Η συγκέντρωση της αρχικής ενέργειας ανά συχνότητα δεν μεταβάλλεται, ενώ η ενέργεια πτώσης διατηρείται σε λίγο μεγαλύτερα επίπεδα γύρω από τις περιοχές της ισχυρής σύζευξης. Ωστόσο, τα αρχικά πλάτη των αρμονικών εξαρτώνται όπως είναι γνωστό από πολλούς παράγοντες με έναν από τους βασικότερους το δυναμικό επίπεδο στο οποίο εκτελούνται οι νότες.



Εικόνα 6.18: Αρχική ενέργεια και ενέργεια πτώσης για 39 νότες εκτελεσμένες σε διπλές χορδές σε δύο «κοντινά» δυναμικά επίπεδα (ο (1,1)T από «κεκτημένη ταχύτητα» σημειώνεται πάνω από τα 833Hz ενώ στην πραγματικότητα είναι 1 με 2 κορυφές χαμηλότερα όπως εντοπίζεται καλύτερα στο διάγραμμα της ενέργειας πτώσης, εκεί που εμφανίζεται το «τοπικό ελάχιστο».

Από τα διαγράμματα διακρίνεται αυτή η μεταβολή της ενεργειακής κατανομής στο φάσμα σε δύο «κοντινά» δυναμικά επίπεδα. Χαρακτηριστική είναι μεταξύ άλλων η μεταβολή της σχέσης της αρχικής ενέργειας που συγκεντρώνουν τα αρμονικά στοιχεία που βρίσκονται γύρω από τον (1,1)T σε σχέση με τα αντίστοιχα στις υψηλότερες συχνότητες. Ακόμα, ενώ οι σχέσεις σύζευξης φαίνονται να είναι αμβλυνθεί πολύ λίγο, όπως αναφέρθηκε λόγω των διπλών χορδών δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες μεταβολές μεταξύ των δύο διαφορετικών δυναμικών επιπέδων.

Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται οι σχέσεις σύζευξης φαίνεται στις περιβάλλουσες έντασης των αρμονικών των νοτών που εκτελέστηκαν στην D4 χορδή όπου αν και η συνολική διάρκεια είναι επίσης μικρή, παρόλα αυτά οι διπλές χορδές διατηρούν μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας ταλάντωσης από ότι οι μονές.

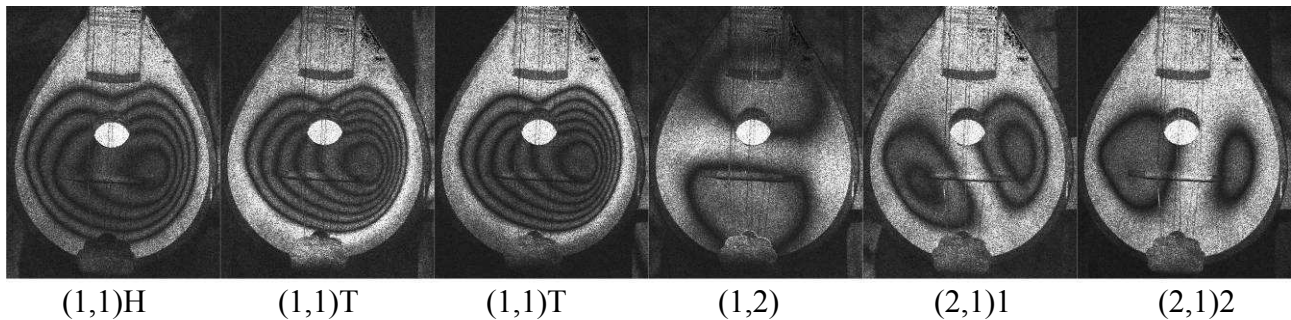


Εικόνα 6.19: Αρμονικές περιβάλλουσες έντασης στην χορδή D4

6.3 Τα όργανα του μπαγλαμά

6.3.1 Μπαγλαμάς 2 – Δονητικά και ηχητικά χαρακτηριστικά με μονές χορδές

Τα όργανα του μπαγλαμά παρουσιάζουν παρόμοια δονητική συμπεριφορά με τα αντίστοιχα του Τζουρά. Ωστόσο, οι τρόποι δόνησης στα καπάκια των οργάνων εμφανίζονται σε πολύ υψηλότερες συχνότητες.

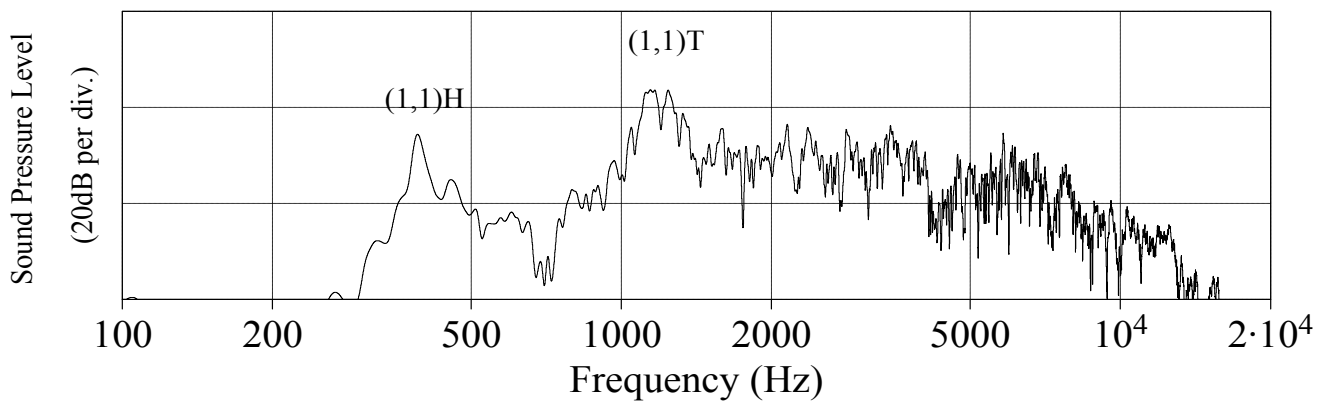


Εικόνα 6.20: Οι τρόποι δόνησης του μπαγλαμά 2

Ο πρώτος τρόπος δόνησης του μπαγλαμά 2 είναι αυτός του αέρινου όγκου (1,1)H που βρίσκεται στα 386Hz. Καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του καπακιού και το μέγιστο βρίσκεται κοντά στο κέντρο. Από τα 450 Hz έως και τα 900Hz το καπάκι ταλαντώνεται με πολύ μικρό πλάτος γύρω με έναν τρόπο της μορφής (1,1) ενώ ο επόμενος τρόπος δόνησης ο (1,1)T1 εμφανίζεται πάνω από τα 1000Hz και συγκεκριμένα στα 1100Hz. Χαρακτηριστικό του (1,1)T είναι πως παρατηρείται με το ίδιο πλάτος ταλάντωσης και στα 1200Hz χωρίς να έχει μεσολαβήσει κάποια ιδιαίτερη μείωση της έντασής του όπως συμβαίνει και με τους αντίστοιχους στα όργανα του τζουρά. Επόμενος τρόπος δόνησης στον μπαγλαμά 1 είναι ο (1,2) στα 1640Hz. Έως τα 2KHz δεν εντοπίζεται κάποιος τρόπος δόνησης και για τον λόγο αυτό η παρατήρηση συνεχίστηκε έως τα 2,5KHz όπου εντοπίζονται άλλοι 2 τρόποι δόνησης: Ο (2,1)1 στα 2127Hz (2,1)2 στα 2340Hz.

Παρατηρείται λοιπόν από την δονητική συμπεριφορά του μπαγλαμά 2 πως θα μπορούσε ουσιαστικά να χαρακτηριστεί ως «το όργανο των 2 τρόπων». Βέβαια μια τέτοια αντίληψη θα ήταν λανθασμένη σε αυτό το στάδιο και αποτελεί μια απόλυτα γενικευμένα διαπίστωση από την στιγμή που δεν λαμβάνονται υπόψη οι αλληλεπιδράσεις όλων των τμημάτων του οργάνου που μπορεί να δημιουργήσουν φαινόμενα τα οποία δεν μπορούν να αιτιολογηθούν με ακρίβεια στην παρούσα εργασία. Παρατίθεται όμως από τον γράφοντα για να δηλώσει πως με απλά λόγια το μικρότερο όργανο της μελέτης δεν αποκρίνεται ουσιαστικά παρά μόνο σε 2 με 3 περιοχές του εύρους μελέτης.

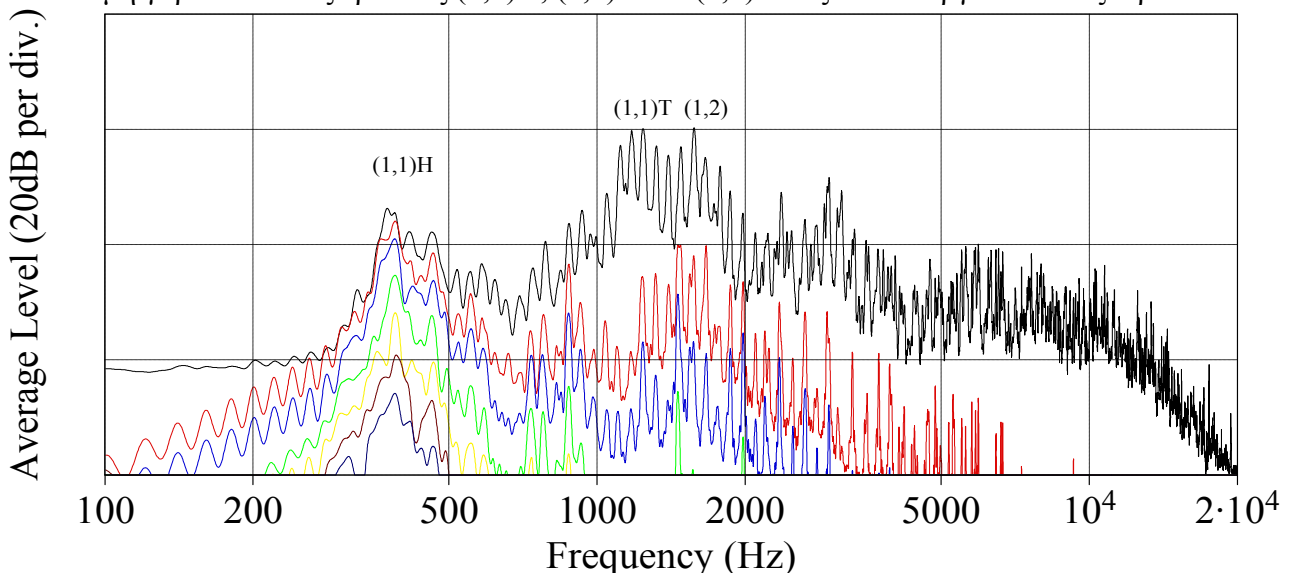
Η μικρή απόκριση φαίνεται και στα διαγράμματα των φασματικών μέσων όρων των κρουστικών αποκρίσεων όπου ουσιαστικά η συγκέντρωση των μεγαλύτερων ποσοστών ενέργειας εντοπίζεται γύρω από τους 2 πρώτους τρόπους δόνησης (1,1)H και (1,1)T.



Εικόνα 6.21: Μέσος όρος κρουστικών 30 αποκρίσεων στην θέση 1

Φαίνεται από τα διαγράμματα πως εκτός από τις προαναφερθείσες περιοχές φαίνεται να ξεχωρίζει λίγο και ο συντονισμός ο τρόπος δόνησης (1,2) στα 1640Hz και κάποιες «κορυφές» αμέσως μετά τα 2KHz όπου βρίσκονται οι (2,1)1 και (2,2)2. Τέλος, χαρακτηριστικό είναι το «βύθισμα» στην περιοχή 670 με 720Hz όπου το όργανο φαίνεται να μην αποκρίνεται καθόλου.

Αντίστοιχα χαρακτηριστικά εντοπίζονται και στην χρονο-φασματική ανάλυση του μέσου των νοτών που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές με τον ήχο του οργάνου να παρουσιάζει αυξημένη κατανομή γύρω από τους τρόπους (1,1)H, (1,1)T και (1,2) όπως και τα όργανα του τζουρά.

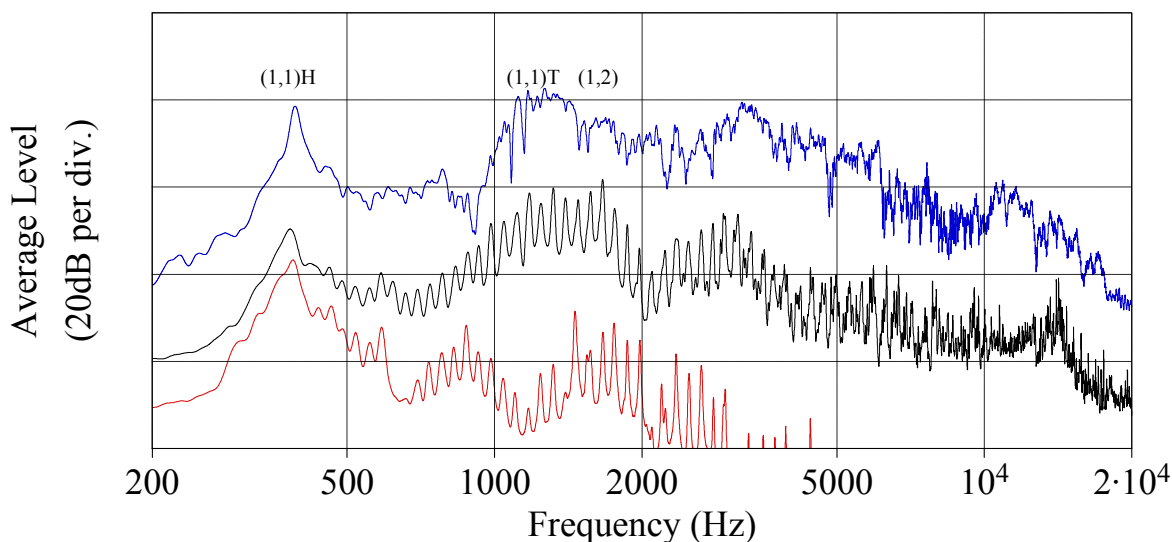


Εικόνα 6.22: Φασματικός μέσος όρος για 39 νότες στον μπαγλαμά: «Αρχική ενέργεια» (μαύρο), ενέργεια μετά από 0,5s (κόκκινο), και τα υπόλοιπα φάσματα αντιστοιχούν σε στιγμιότυπα με βήμα 1s . Για παράδειγμα ενέργεια πτώσης μετά από 1s (μπλε), 2s (πράσινο) κ.ο.κ.

Στην περιοχή όπου υπάρχει το «βύθισμα» μεταξύ (1,1)H και (1,1)T συγκεντρώνονται πολύ μικρά ποσοστά ενέργειας ενώ χαρακτηριστική είναι μια περιοχή γύρω από τα 3150Hz στις υψηλότερες συχνότητες που είναι όμως υψηλότερα από το εξεταζόμενο εύρος.

Επίσης, από τα χρονικά στιγμιότυπα στα οποία υπολογίστηκε ο φασματικός μέσος όρος των νοτών αναφέρεται πως το πρώτο αντιστοιχεί σε χρόνο (0,5s) μετά την αρχική. Αυτή η ανάλυση έγινε έπειτα από παρατήρηση στις διάρκειες των νοτών του μπαγλαμά που όπως διακρίνεται και από τα φάσματα ήδη μετά από χρονικό διάστημα 0,5s έχει αποσβέσει πολύ μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας από ότι μετά από 1s. Σχετικά με τις σχέσεις σύζευξης, φαίνεται πως μόνο ο (1,1)T παρουσιάζει τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά με τον ρυθμό απόσβεσης γύρω από τον (1,1)H να είναι αργός όπως και στα όργανα του τζουρά δίδοντας μια χαρακτηριστική διαφορά μεταξύ των μπουζουκιών και των μικρότερων οργάνων της οικογένειας.

Ταχεία απόσβεση της ενέργειας παρατηρείται και γύρω από την περιοχή του βυθίσματος που υποδεικνύει πως το όργανο αδυνατεί να «διατηρήσει» την ενέργεια ταλάντωσης. Το φαινόμενο τείνει να γίνει χαρακτηριστικό των οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού αφού εντοπίζεται λίγο έως πολύ σε όλα τα όργανα όπου υπάρχει τουλάχιστον μια περιοχή μεταξύ (1,1)H και (1,1)T όπου η απόσβεση του πλάτους ταλάντωσης στον χρόνο είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία είναι δύσκολος ο εντοπισμός των βασικών παραγόντων που την δημιουργούν.



Εικόνα 6.23: Φασματικός μέσος όρος για τις 39 νότες που εκτελέστηκαν σε μονές χορδές για τρία χρονικά στιγμιότυπα που αντιστοιχούν σε στην «αρχική ενέργεια» (μαύρο), στην ενέργεια πτώσης 1s μετά την αρχική (κόκκινό) και σε 30 κρούσεις με κάθετη ως προς το καπάκι φορά (μπλε) (θέση 2-mf).

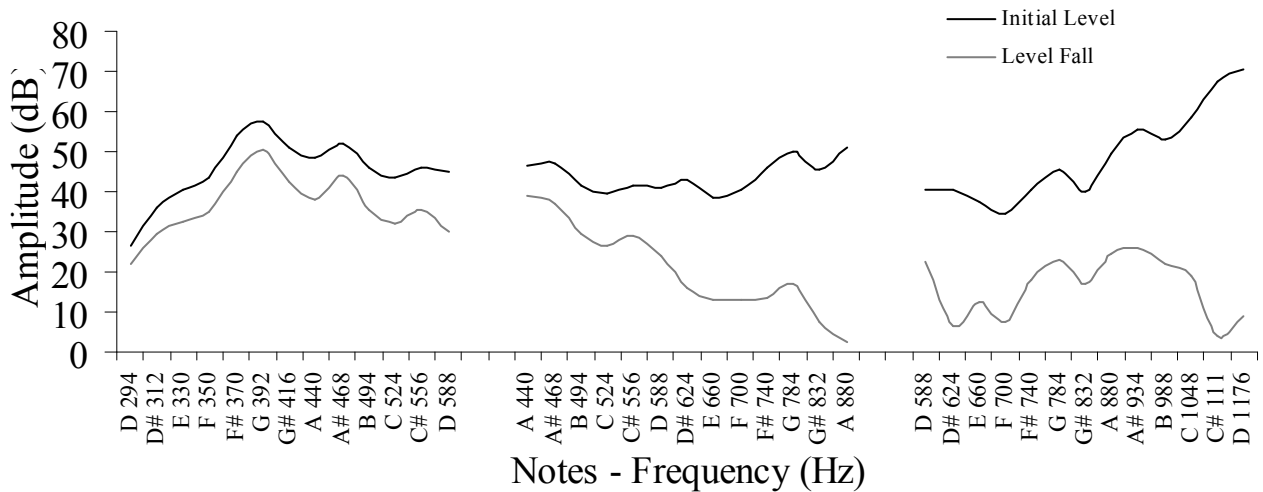
Παρατηρώντας τα αντίστοιχα φάσματα από την κοντινή θέση λήψης που διεξήχθησαν όμως για διαφορετική «ομάδα» κρουστικών αποκρίσεων είναι αρκετά «τονισμένη» η περιοχή γύρω από τα 3150Hz δείχνοντας πως ίσως υπάρχει κάποιος ισχυρός τρόπος δόνησης. Θα μπορούσε ωστόσο να

είναι κάποιο άλλο τμήμα του οργάνου όπως η γέφυρα που προκαλεί αυτήν την συγκέντρωση το οποίο όμως δεν έχει μελετηθεί.

Γενικά, παρατηρείται συμφωνία μεταξύ των κρουστικών αποκρίσεων και της αρχικής ενεργειακής κατανομής του ήχου που ουσιαστικά μπορεί να χαρακτηριστεί, χωρίς καμία υπερβολή, όμοια με αυτή του τζουρά 1, αλλά φυσικά, σε διαφορετικές συχνότητες. Συγκεκριμένα, τα πλάτη των αρμονικών στις χαμηλότερες συχνότητες κατανέμονται ομαλά γύρω από τον συντονισμό του αέρα (1,1)H (386Hz) και σταδιακά αυξάνονται έως την συχνότητα του (1,1)T (1100Hz) από όπου υπάρχει μια περίπου «γραμμική» κατανομή του πλάτους για των μέσο όρο όλων των αρμονικών στοιχείων που έως τα 1800Hz περίπου με εξαίρεση μια περιοχή μεταξύ (1,1)T και (1,2) (1670Hz) που παρουσιάζεται μία πολύ μικρή πτώση του πλάτους.

Τέλος, το βύθισμα στα 660-720Hz φαίνεται να «υποτιμάται» στον μέσο όρο των κρουστικών αποκρίσεων. Είναι ωστόσο εμφανές στο διάγραμμα της πτώσης ενέργειας (κόκκινη γραμμή) που δείχνει πως το φαινόμενο είναι χαρακτηριστικό του οργάνου ανεξάρτητα από την θέση λήψης.

Εστιάζοντας λίγο περισσότερο στις σχέσεις σύζευξης των τρόπων δόνησης της χορδής με τους αντίστοιχους του καπακιού φαίνεται πως οι μεγαλύτερες διαφορές εντοπίζονται γύρω από τον (1,1)T στα 1100-1200Hz.

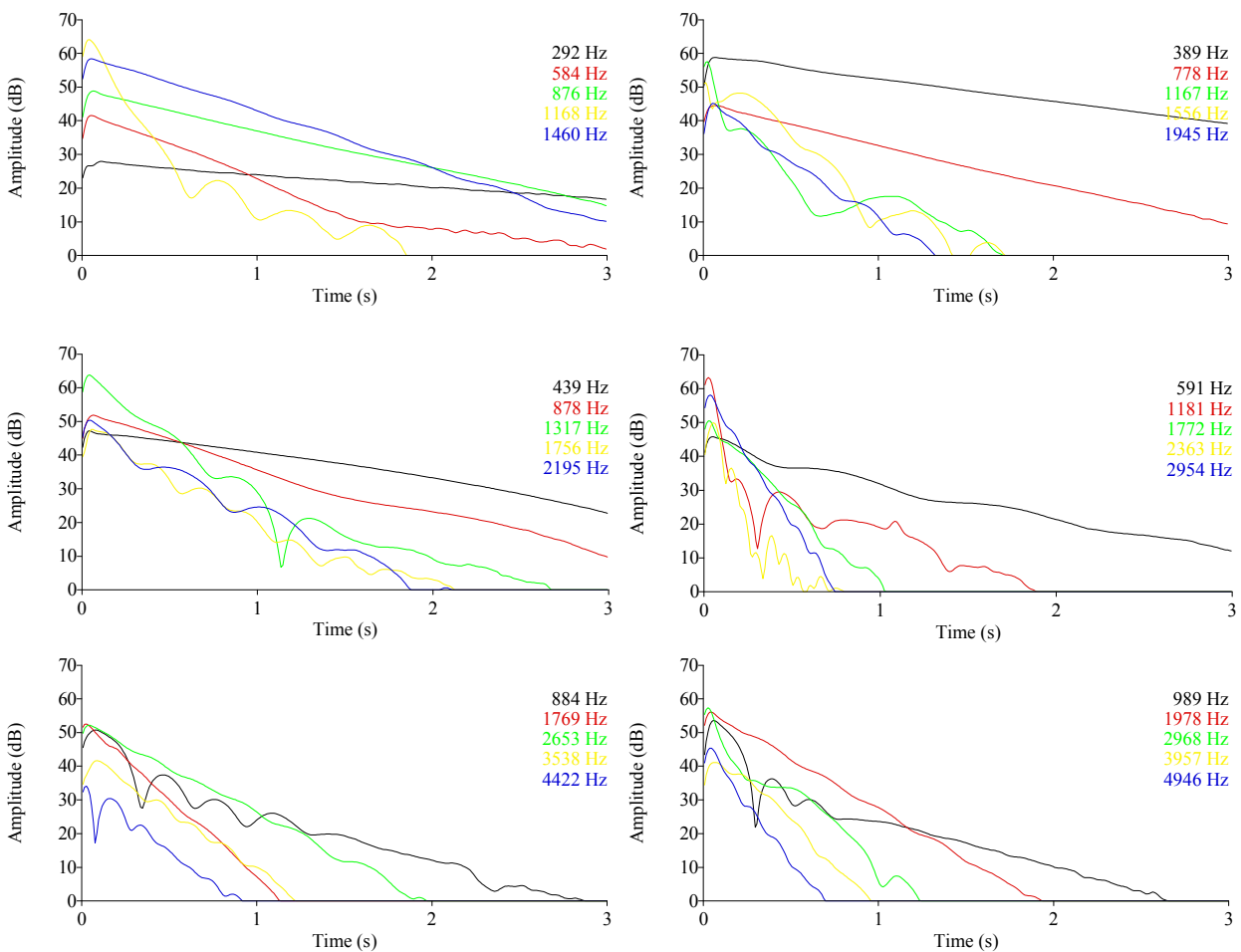


Εικόνα 6.24: Αρχική ένταση και πτώσης έντασης για 39 νότες εκτελεσμένες σε μονές χορδές.

Ακόμα, μεγάλη πτώση έντασης εντοπίζεται στις χορδές A4 και D5 γύρω από την περιοχή που εντοπίζεται το «βύθισμα» που φαίνεται να επηρεάζει τις θεμελίους των νοτών D#5 με F#5. Ωστόσο, καθώς το μήκος χορδής μειώνεται στην A4 χορδή αντιστρόφως ανάλογα αυξάνεται και η διαφορά αρχικής-πτώσης έντασης.

Έτσι, έχοντας παρατηρήσει γενικά τα χαρακτηριστικά της ενεργειακής κατανομής του ήχου και των δεσμών σύζευξης χορδής καπακιού στην συνέχεια παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες έντασης

των αρμονικών για αντιπροσωπευτικές νότες όπου εντοπίζονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του ήχου του μπαγλαμά 2.



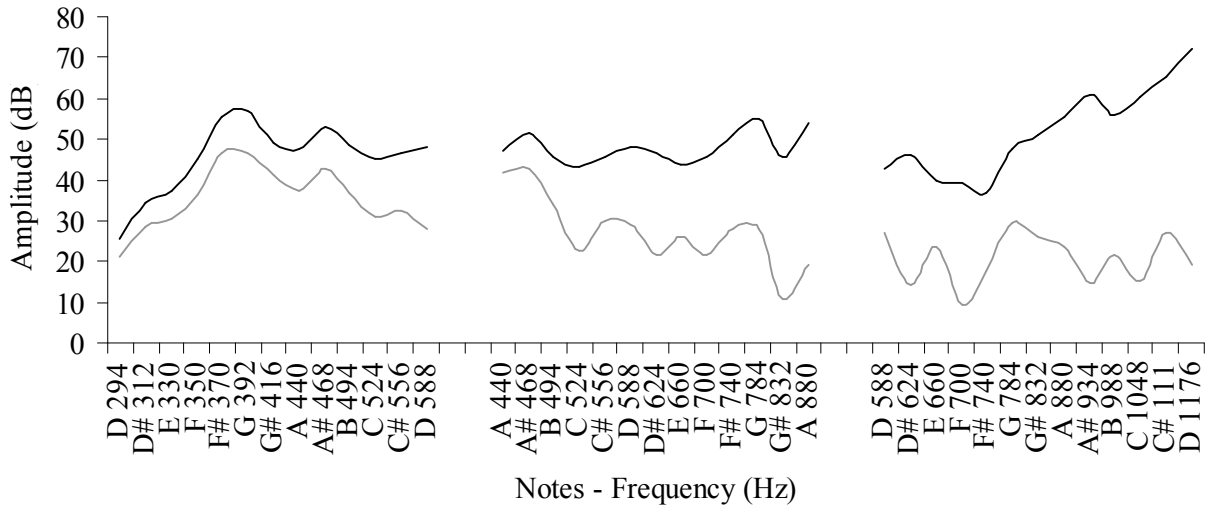
Εικόνα 6.25: Αρμονικές περιβάλλουσες έντασης στην χορδή D4 (292,389Hz), A4 (439Hz,552Hz) και στην D5 (884Hz,989Hz).

Διακρίνεται πως η ισχυρότερη σύζευξη χορδής-καπακιού συμβαίνει στον 2^ο αρμονικό της νότας D5 (589Hz στο γράφημα) στην χορδή A4. Ωστόσο, φαίνεται πως ο γενικά ο ρυθμός πτώσης έντασης των αρμονικών αποκλίνει λίγο περισσότερο, από τα μεγαλύτερα όργανα που έχουν μελετηθεί, όσο αφορά ομαλή εκθετική μορφή ιδίως όταν αυτά τα αρμονικά στοιχεία βρίσκονται σε πολύ υψηλές συχνότητες.

6.3.1.1 Διπλές χορδές

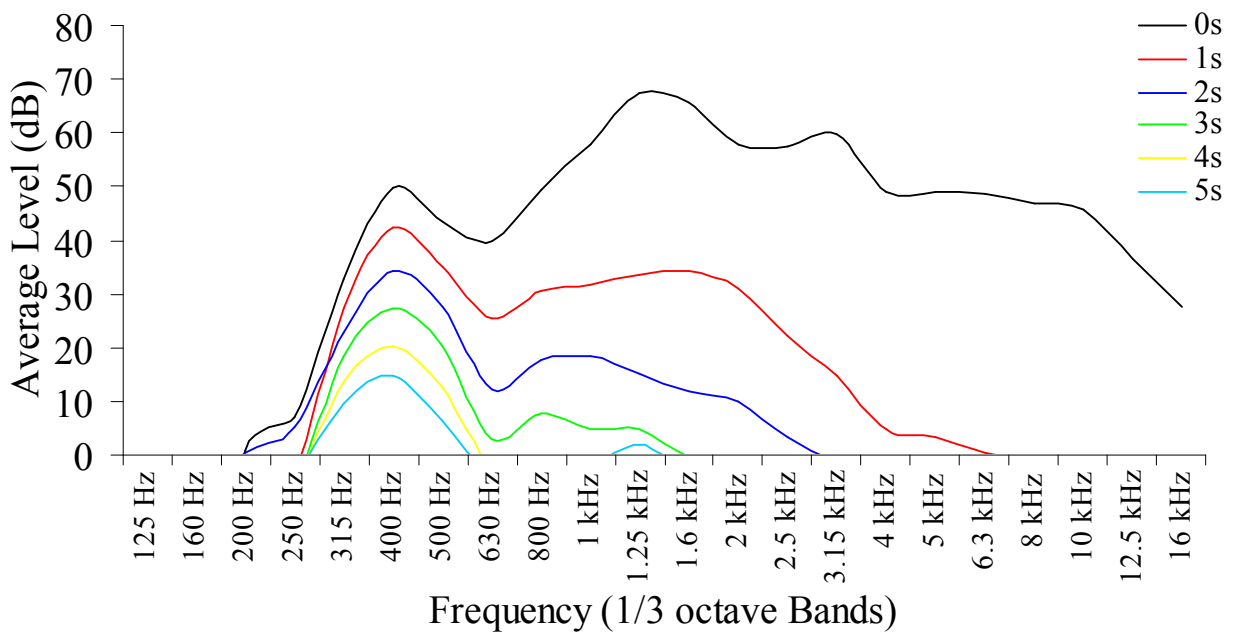
Παρατηρώντας την συμπεριφορά του οργάνου όταν εκτελείται με διπλές χορδές σε σχέση με τα φαινόμενα σύζευξης χορδής-καπακιού δεν σημειώνεται κάποιο χαρακτηριστικό που να αποκλίνει

από τα όσα έχουν αναφερθεί σε όλα τα όργανα της μελέτης. Η ενέργεια που διατηρείται στο όργανο ακόμα και στην περιοχή της σύζευξης είναι μεγαλύτερη ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των διπλών χορδών, ενώ όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί οι τιμές της αρχικής έντασης δεν διαφοροποιούνται σημαντικά από τις αντίστοιχες των μονών χορδών.



Εικόνα 6.26: Αρχική ένταση και πτώσης έντασης για 39 νότες εκτελεσμένες σε μονές χορδές.

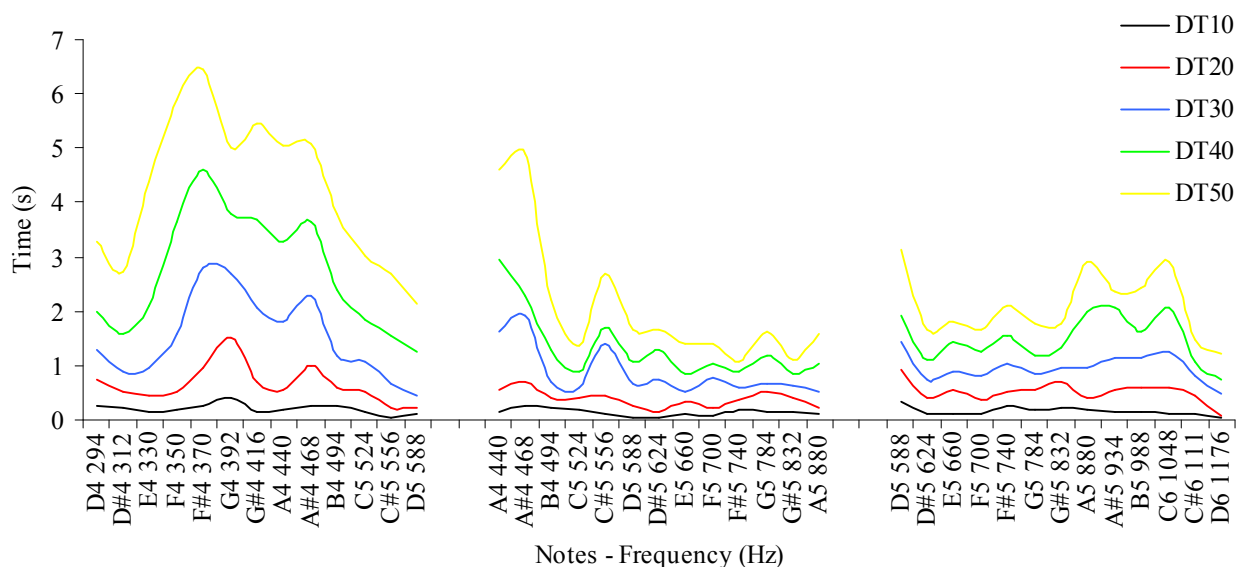
Οι ενεργειακές κατανομές με διπλές χορδές εντοπίζονται στην φασματική ανάλυση σε ζώνες τριτοκτάβας του μέσου όρου 32 νοτών (1 οκτάβα ανά χορδή) που εκτελέστηκαν σε μέση προς δυνατή δυναμική (mf) για διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα.



Εικόνα 6.27: Ενεργειακές κατανομές σε ζώνες τριτοκτάβας για 39 νότες με διπλές χορδές (mf - θέση 1).

Από το διάγραμμα διακρίνεται το χαρακτηριστικό που έχει αναφερθεί στην αρχή της παραγράφου σχετικά με την πολύ γρήγορη ενεργειακή απόσβεση του ήχου του μπαγλαμά. Φαίνεται από τα διαγράμματα αρχικά, πως τα μέγιστα ποσοστά ενέργειας συγκεντρώνονται γύρω από τους γνωστούς τρόπους δόνησης καθώς και στα 3,15KHz όπου όπως έχει αναφερθεί δεν διερευνήθηκε κατά την διαδικασία της ESPI. Μέσα σε χρόνο 1s τα αρμονικά στοιχεία που βρίσκονται κάτω από τα 4KHz ηχούν με πολύ μικρό πλάτος έντασης ενώ μέσα σε διάστημα 3^{ov} δευτερολέπτων από την αρχή τα μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας συγκεντρώνονται σε ένα στενό εύρος γύρω από τον συντονισμό του αέρινου όγκου, (1,1)H, στην τριτοκτάβα των 400Hz.

Η ταχεία εκτόνωση της ακουστικής ενέργειας του μπαγλαμά παρατηρείται και στο πεδίο του χρόνου όπου παρατίθενται οι χρόνοι DT10 έως 50 για 39 νότες που εκτελέστηκαν σε μέση ένταση σε διπλές χορδές. Διακρίνεται χαρακτηριστικά η συνολική επίδραση του συντονισμού του αέρα στην χορδή D4 που έχει ως αποτέλεσμα την ομαλή και ταυτόχρονα αργή πτώση του πλάτους έντασης. Ωστόσο, το ότι ο χρόνος DT10 είναι πολύ μικρός ακόμα και για αυτές τις νότες δείχνει πως τα υψηλότερα αρμονικά στοιχεία του φάσματος που εκτονώνονται σε πολύ μικρούς χρόνους, συγκεντρώνουν σημαντικά ποσοστά της μέσης έντασης των συγκεκριμένων νοτών.

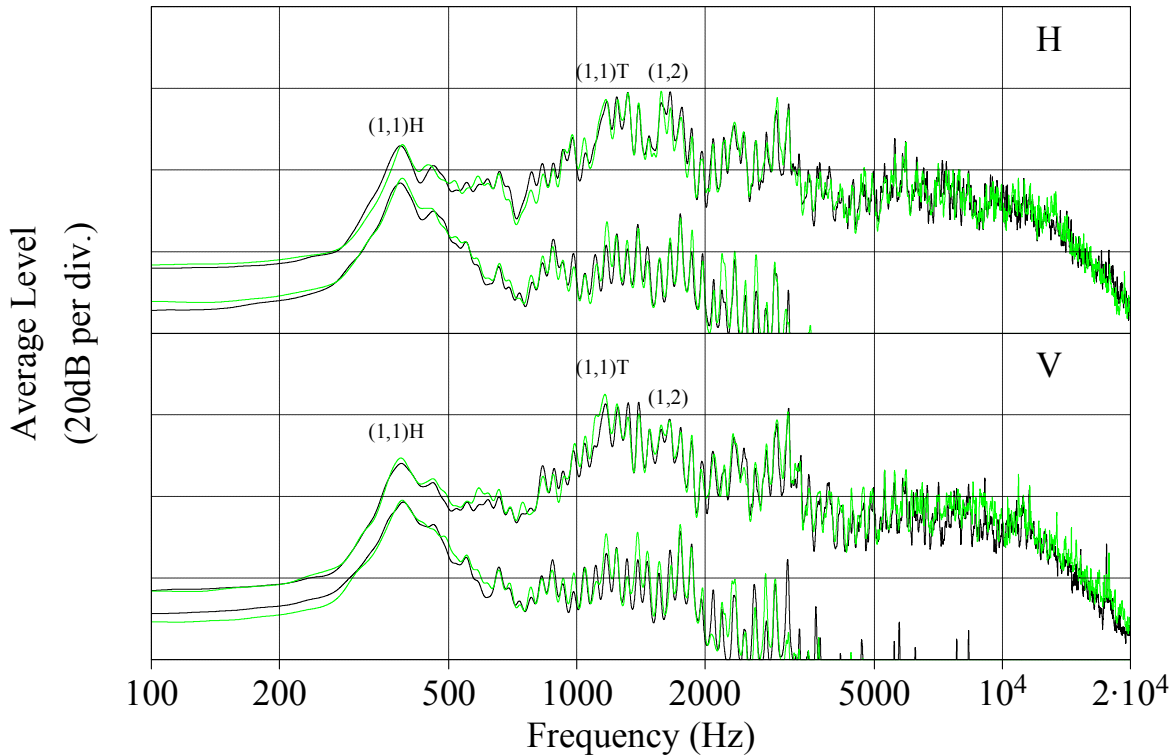


Εικόνα 6.28: Χρονικές τιμές DT10-60 για τις 39 νότες (mf – θέση 1)

Γωνία διέγερσης

Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο του τρίχορδου μουζουκιού ο οργανοπαίκτης «ελέγχει» τον τρόπο με τον οποίο θα αλληλεπιδράσουν χορδές και καπάκι στις περιοχές των συντονισμών μεταβάλλοντας εκτός των άλλων την γωνία διέγερσης. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πως ο τρόπος δόνησης (1,1)T δεν διεγείρεται κατά την εκτέλεση με παράλληλη φορά προς το καπάκι. Για να μελετηθούν τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά στον μπαγλαμά εκτελέστηκαν 39 νότες με

κάθετη και 39 νότες με παράλληλη φορά προς το καπάκι και η μέτρηση επαναλήφθηκε. Τα διαγράμματα αρχικής ενέργειας και πτώσης ενέργειας των 156 νοτών που συγκεντρώθηκαν διακρίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 6.29: Διαγράμματα αρχικής ενέργειας και ενέργειας πτώσης για 39 νότες εκτελεσμένες με διαφορετική γωνία διέγερσης. Παράλληλη με το καπάκι (H) και κάθετη (V). Με πράσινο, τα αντίστοιχα κατά την επανάληψη της μέτρησης (σύνολο 156 νότες).

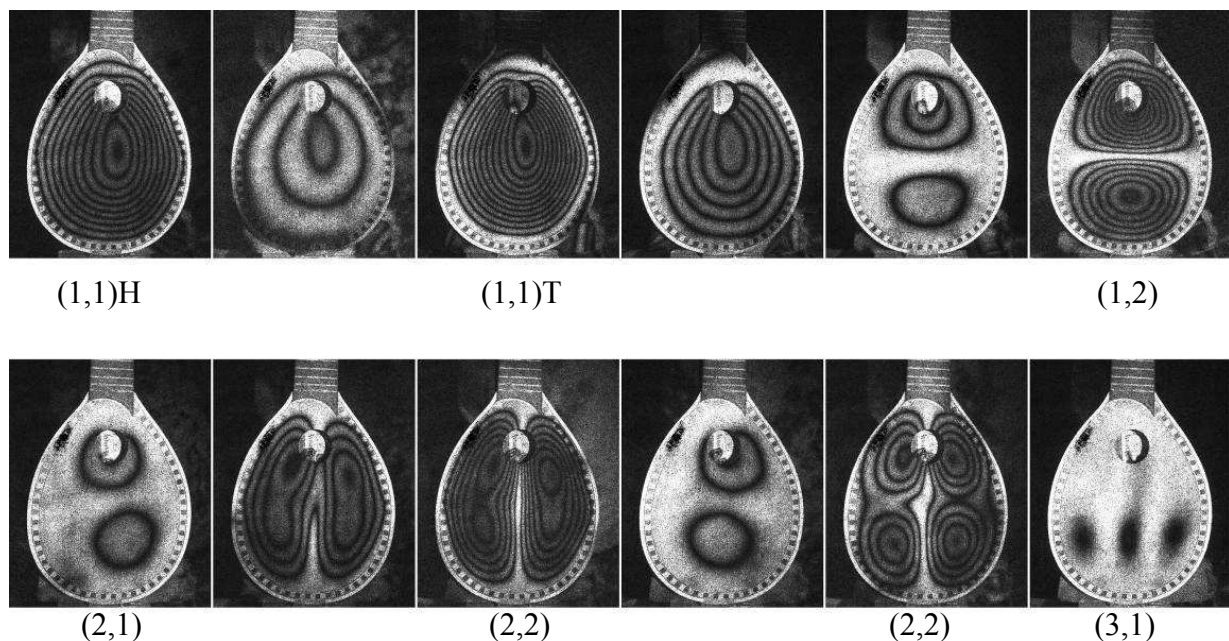
Από τα διαγράμματα διακρίνεται το αναμενόμενο: Ο τρόπος (1,1)T διεγείρεται με πολύ μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης στην κάθετη διέγερση και τα αρμονικά στοιχεία που βρίσκονται γύρω από αυτόν δημιουργούν ένα τοπικό μέγιστο που «συμφωνεί» περισσότερο με τα διαγράμματα της κρουστικής απόκρισης που παρουσιάστηκαν για το συγκεκριμένο όργανο. Αυτό είναι λογικό από την στιγμή που και η κρουστική διέγερση είχε την ίδια διεύθυνση (κάθετα προς το καπάκι). Αντίθετα, στην παράλληλη διέγερση τα διαγράμματα παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά, στην κατανομή ενέργειας ανά συχνотική περιοχή, με τα αντίστοιχα που έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα.

Επεκτείνοντας αυτήν την παρατήρηση και στα όργανα του τζουρά, ισχύουν τα αντίστοιχα. Αν δηλαδή όπως αναφέρθηκε για τον τζουρά 1 η γωνία διέγερσης ήταν πιο κάθετη προς το καπάκι τότε η επίδραση του (1,1)T στα χαρακτηριστικά του ήχου θα ήταν μεγαλύτερη και τα αρμονικά στοιχεία του φάσματος θα δημιουργούσαν αντίστοιχα τοπικά μέγιστα στις αντίστοιχες συχνотικές περιοχές

όπως φάνηκε και στην εικόνα 6.6. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί πολλές φορές στην εργασία, η κάθετη προς το καπάκι διέγερση σίγουρα δεν αποτελεί ρεαλιστική προσέγγιση της εκτέλεσης των νυκτών οργάνων. Έτσι το γεγονός είναι πως τα μικρότερα όργανα της οικογένειας στις δεδομένες συνθήκες δεν παρουσιάζουν αντίστοιχα μεγάλα πλάτη των αρμονικών τους που συζεύγνυνται με τον ισχυρότερο τρόπο δόνησης (1,1)T όπως τα αντίστοιχα του μουζουκιού. Αντίθετα, τα πλάτη των αρμονικών γύρω από τις περιοχές όπου βρίσκεται ο τρόπος αυτός σε κάθε όργανο είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα των υψηλότερων αρμονικών. Αυτό ισχύει και στον μπαγλαμά 1 ο οποίος όμως δεν προσεγγίστηκε ακριβώς όπως τα υπόλοιπα όργανα της μελέτης.

6.3.2 Μπαγλαμάς 1

Κλείνοντας σε αυτό το σημείο την παρουσίαση των μικρότερων οργάνων της οικογένειας του μουζουκιού παρουσιάζονται οι τρόποι δόνησης του μπαγλαμά 1. Ωστόσο, το συγκεκριμένο όργανο διεγέρθηκε χωρίς γέφυρα έτσι ώστε να αποτυπωθούν πιο ευδιάκριτα όλοι οι τρόποι δόνησης λόγω της μεγάλης δυσκολίας που όπως έχει αναφερθεί αντιμετωπίστηκε στην προσπάθεια διέγερσης των τρόπων δόνησης των μικρότερων οργάνων και ιδίως του μπαγλαμά. Έτσι παρόλο που είναι γνωστό πως οι ακριβείς συχνότητες στις οποίες εντοπίζονται μπορεί να αποκλίνουν όταν εφαρμόζεται η γέφυρα και οι χορδές προτιμήθηκε αυτού του είδους η προσέγγιση.

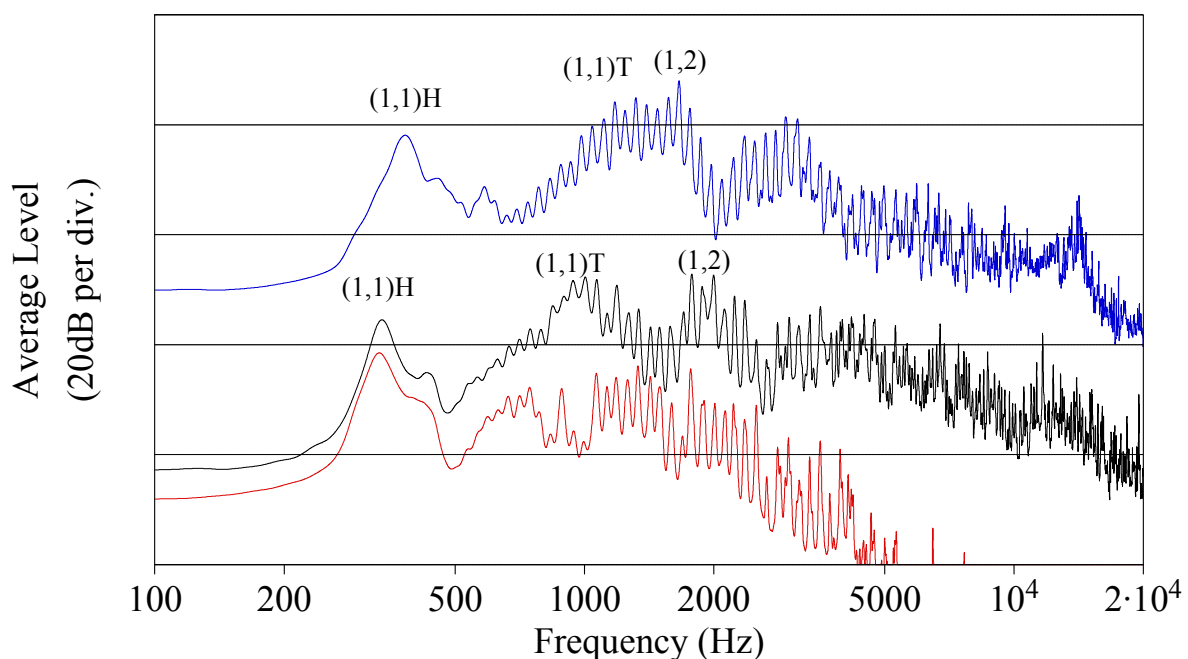


Εικόνα 6.30: Τρόποι δόνησης του μπαγλαμά 1 χωρίς γέφυρα και χορδές

Ο πρώτος τρόπος δόνησης του μπαγλαμά 1 είναι αυτός της αέρινης κοιλότητας (1,1)H που βρίσκεται στα 340Hz. Καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του καπακιού και το μέγιστο βρίσκεται

κοντά στο κέντρο. Από τα 380 Hz έως και τα 800Hz το καπάκι ταλαντώνεται με πολύ μικρό πλάτος γύρω με έναν τρόπο της μορφής (1,1) ενώ ο επόμενος τρόπος δόνησης ο (1,1)T εμφανίζεται στα 970Hz. Επόμενος τρόπος δόνησης στον μπαγλαμά 1 είναι ο (1,2) στα 1800Hz. Στην συνέχεια εμφανίζεται ο τρόπος δόνησης (2,1) στα 2300Hz που όπως φαίνεται και στην εικόνα έχει αρχίσει να σχηματίζεται ήδη από τα 2200Hz με την μορφή (2,1) και το καπάκι συνεχίζει να ταλαντώνεται με το ίδιο τρόπο δόνησης έως και τα 2400Hz. Συνεχίζει ο (2,2) στα 2546 και τέλος ο τρόπος (3,1) εμφανίζεται (έστω και «αχνά») στα 3400Hz.

Από τις συχνότητες που εμφανίζονται οι τρόποι δόνησης παρατηρείται κάτι το οποίο θα μπορούσε να θεωρηθεί ως παράδοξο. Ενώ η συχνότητα Helmholtz και ο (1,1)T του μπαγλαμά 1 είναι σε χαμηλότερες συχνότητες από τους αντίστοιχους τρόπους του μπαγλαμά 2, ο τρόπος (1,3) είναι εντοπίστηκε σε υψηλότερη. Αρχικά θεωρήθηκε πως αυτή μπορεί να είναι μια δραστική μεταβολή της δονητικής συμπεριφοράς του οργάνου λόγω της απουσίας της γέφυρας και των χορδών. Ωστόσο, από τις ενεργειακές κατανομές στο φάσμα του ήχου προκύπτει πως παρά τις μικρές μεταβολές στην συχνότητα που εντοπίζονται τα μέγιστα, όντως ο μπαγλαμάς 1 έχει άλλους τρόπους δόνησης σε χαμηλή και άλλους σε υψηλότερη συχνότητα από τον μπαγλαμά 2.



Εικόνα 6.30: Αρχική ενέργεια για 39 νότες στον μπαγλαμά 2 (μπλε), στον μπαγλαμά 1 (μαύρο) και ενέργεια πτώσης στον μπαγλαμά 1 (κόκκινο)

Παρά το ότι δεν θα ήταν ορθό να γίνουν άμεσες συγκρίσεις στα φάσματα λόγω της διαφορετικής θέσης λήψης του μικροφώνου στον μπαγλαμά 1 παρατηρείται πως ο ήχος των οργάνων μέχρι τα 2KHz διαμορφώνεται από έναν πολύ μικρό αριθμό διαφορετικών τρόπων δόνησης ενώ

παρατηρώντας το διάγραμμα της ενέργειας πτώσης και στον μπαγλαμά 1 φαινόμενα ισχυρής σύζευξης χορδής καπακιού εντοπίζονται μόνο γύρω από τον τρόπο δόνησης $(1,1)T$.

Σύνοψη και μελλοντική εργασία

Συνοψίζοντας τα βασικότερα επιτεύγματα της εργασίας, αρχικά δημιουργήθηκε τράπεζα ηχητικών δειγμάτων από επτά όργανα της οικογένειας του μπουζουκιού και καταγράφηκαν κρουστικές αποκρίσεις των οργάνων με μηχανική και χειροκίνητη διέγερση. Τόσο ο ήχος όσο και η απόκριση των οργάνων καταγράφηκε και αναλύθηκε σε δύο διαφορετικές γωνίες και αποστάσεις από τα όργανα μέσα σε στούντιο ηχογραφήσεων. Ακόμα, δημιουργήθηκε αρχείο συμβολογραμμάτων, μέσω της τεχνικής ESPI, που απεικονίζουν την κατανομή του πλάτους στα καπάκια των οργάνων γύρω από τους βασικούς τρόπους δόνησης αλλά και σε ενδιάμεσες περιοχές.

Από την παράλληλη ανάλυση των αποτελεσμάτων εντοπίστηκαν οι τρόποι δόνησης των ολοκληρωμένων οργάνων και προσδιορίστηκαν οι βασικότεροι με κριτήρια:

1. Το πλάτος ταλάντωσής τους και την σχετική ακουστική ισχύ με την οποία ακτινοβολούν στις συναρτήσεις μεταφοράς που προκύπτουν από τις κρουστικές αποκρίσεις και
2. Την επίδρασή τους στις χρονικές και φασματικές ιδιότητες του εκπεμπόμενου ήχου.

Περιγράφηκαν οι σημαντικότερες ιδιότητες του εκπεμπόμενου ήχου των οργάνων στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας και εντοπίστηκαν σημαντικά χαρακτηριστικά της αλληλεπίδρασης των διπλών χορδών. Επίσης, παρουσιάστηκαν χαρακτηριστικά του ήχου τα οποία ελέγχονται από τον οργανοπαίκτη και αντίστοιχα που διαμορφώνονται από τα δονητικά χαρακτηριστικά των οργάνων (όπως ο ρόλος της ηχητικής οπής στο τετράχορδο μπουζούκι).

Τα αποτελέσματα της εργασίας στο σύνολό τους παρέχουν απαραίτητες πληροφορίες για τους οργανοποιούς, τους μηχανικούς ήχου, τους μουσικούς και γενικά τον όποιο ενδιαφερόμενο σχετικά με την δονητική συμπεριφορά και τα ηχητικά χαρακτηριστικά ολοκληρωμένων οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού.

Εκτός από την περιγραφή της δονητικής και ηχητικής συμπεριφοράς των οργάνων, τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές που αφορούν στην σύνθεση του ήχου με την μέθοδο της “model based synthesis” αφού οι κρουστικές αποκρίσεις που καταγράφονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αντίστοιχα φίλτρα σε συνδυασμό με φυσικά μοντέλα χορδής μέσω της μεθόδου κυματοδηγών (“digital waveguides”) προσομοιώνοντας βασικά φυσικά χαρακτηριστικά των οργάνων. Η σύνθεση του ήχου των οργάνων βασισμένη σε φυσικά χαρακτηριστικά τους εκτός από την χρησιμότητά της στον χώρο της μουσικής με υπολογιστές (κάτι που ωστόσο δεν συνάδει με την αισθητική το γράφοντος) μπορεί να πραγματοποιηθεί για ερευνητικούς και παιδαγωγικούς σκοπούς.

Επίσης, μέσα από την γενική περιγραφή της λειτουργίας των οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού ανοίγεται δρόμος για την εξειδικευμένη μελέτη κάθε οργάνου ξεχωριστά που μπορεί να αποκαλύψει με μεγάλη ακρίβεια τον ρόλο του κάθε τμήματος στην δημιουργία του εκπεμπόμενου ήχου. Συγκεκριμένα, γνωρίζοντας τις βασικότερες δονητικές ιδιότητες των ολοκληρωμένων οργάνων η έρευνα μπορεί να επικεντρωθεί στα επιμέρους τμήματα τόσο όσο αφορά την «ελεύθερή» τους κατάσταση (από το αρχικό στάδιο κατασκευής) όσο και στις σχέσεις σύζευξής τους στα ολοκληρωμένα όργανα.

Τέλος, ένας τομέας της ακουστικής όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα της μελέτης είναι η ψυχοακουστική όπου μέσα από εξειδικευμένα ψυχοακουστικά τεστ, ομάδες εμπειρογνομόνων θα καλούνται να προσδιορίσουν ποιοτικά χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου από τα όργανα ήχου.

Η επέκταση της έρευνας στους προαναφερθέντες τομείς της μουσικής τεχνολογίας και της ακουστικής είναι καίριας σημασίας για την προαγωγή της τέχνης της οργανοποιίας, της τεχνολογίας των οργάνων και κατ' επέκταση της παραδοσιακής λαϊκής μουσικής του τόπου μας.

Αναφορές

- [1] Tzevelekos, P. and Kouroupetroglou, G., Acoustical analysis of woodwind musical instruments for virtual instrument implementation by physical modelling. Proceedings of the Conference ACOUSTICS 2004, Thessalonica, Greece, 27-28 Sept. 2004, pp. 49-60, http://speech.di.uoa.gr/sppages/spppdf//acoustica2004_physicalmodeling.pdf
- [2] Τζεβελέκος, Π. και άλλοι., Χρόνο-φασματική ανάλυση ακουστικού σήματος αντιπροσωπευτικών τύπων ζουρνά. Πανελλήνιο Συνέδριο, ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2008, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, Ελλάδα, 29/09/2008 έως 1/10/2008, Εκδ.: Ν. Μπάρκας, σελ.182-191
- [3] Χαρτοφύλακας, Λ., Μπακαρέζος, Μ., Ορφανός, Ι. και Παπαδογιάννης, Ν. Α., Σύνδεση των ακουστικών χαρακτηριστικών της κατασκευαστικής δομής της Κρητικής λύρας με την ποιότητα του εκπεμπόμενου ήχου. Πανελλήνιο Συνέδριο, ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2008, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, Ελλάδα, 29/09/2008 έως 1/10/2008, Εκδ.: Ν. Μπάρκας, σελ.182-191
- [4] Κουκουρίγκος, Ι., «Η τεχνική της φέτας». (Περιγραφή του τρόπου κατασκευής του σκάφους και χρήσιμες πληροφορίες πάνω στα παραδοσιακά και όχι μόνο μουσικά όργανα) http://www.lutherie.gr/stave/stave_3.htm
- [5] Kinsler, L. E., et al., Fundamentals of Acoustics. 4th ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 2000
- [6] Fletcher, N. and Rossing, T., The Physics of musical instruments. 2nd ed., Springer, New York, 1998.
- [7] Boyce, E. W. and DiPrima, C. R., Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems. John Wiley & Sons, 1992.
- [8] Roederer G. J., The Physics and Psychophysics of Music. 3rd ed., Springer, New York, 1995.

- [9] Fletcher, N. H., the nonlinear physics of musical instruments. Rep. Prog. Phys., 62, pp. 723-764, Institute of Physics, Bristol, 1999
- [10] Goodway, M. and Odell, S., The metallurgy of the 17th and 18th century music wire (In The historical Harpichord). Pendragon Press, Stuyvensant, Vol. 2, Ch. 6, New York, 1987
- [11] Benade, H. A., Fundamentals of Musical Acoustics. 2nd ed., Oxford University Press, London, 1976
- [12] Legge K. A. and Fletcher N. H., Nonlinear generation of missing modes on a vibrating string. J. Acoust. Soc. Am., 76, pp. 5-12,1984.
- [13] Gough, C., The nonlinear free vibration of a damped elastic string, J. Acoust. Soc. Am., 75, pp. 1770–1776, 1984
- [14] Bucur, V., Acoustic of Wood. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2006.
- [15] Chakraverty, S., Vibration of Plates. Taylor & Francis, Inc., 2008
- [16] Janson, E., Acoustics for Violin and guitar makers. Erik Janson, 2002
<http://www.speech.kth.se/music/acviguit4/>
- [17] Jansson, E. V., A study of acoustical and hologram interferometric measurements on the top plate vibrations of a guitar. Acustica, 25, pp. 95-100, 1971
- [18] Helmholtz, H.V., On the Sensations Of tone. Dover, New York,1954 (Αγγλική μετάφραση της γερμανικής έκδοσης του 1877)
- [19] Morse, P. and Ingard, U., Theoretical Acoustics, Princeton University Press,1986
- [20] Harry, F. O., Music, Physics and Engineering. 2nd ed., Dover, New York, 1967
- [21] C. E. Gough, Acoustical studies of stringed instruments using string resonances, SMAC83, Royal Swedish Academy of Music, pp. 19-45, 1983

- [22] McLennan, J. E., A0 and A1 studies on the violin using CO₂, Helium and air/Helium mixtures, *Acustica*, 89, pp. 176–180, 2003
- [23] Φρονιμόπουλος, Ν. και Παντελιάς, Γ., Τρόποι δόνησης και διαγράμματα Chladni. Άρθρο στο διαδικτυακό περιοδικό «Klika».
http://www.klika.gr/cms/index.php?option=com_content&task=view&id=306&Itemid=151
- [24] French, R. M., *Eginning the guitar*. Springer, New York, 2009
- [25] Intra, R., *The acoustics of the steel string guitar*. PhD thesis, UNSW, 2007
- [26] Wright, H., *The Acoustics and psychoacoustics of the guitar*. PhD Thesis. University of Wales, College of Cardiff. 1996.
- [27] Rossing, T. D., Fletcher, N. H., *Principles of Vibration and Sound*. 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 2004
- [28] Gough C. E., "The theory of string resonances on musical instruments", *Acustica*, 49, pp. 124-141, 1981
- [29] Jansson, E. V., *Coupling of string motions to top plate motions in a guitar*. Preliminary report, STL-QPSR,14, pp. 19-38, 1973
- [30] Caldersmith, G.W. and Jansson, E.V., *Frequency Response and Played Tones of Guitars*. STL-QPSR, (Dept of Speech Communication and Music Acoustics, Royal Inst. of Technology), pp. 50-61, 1980
- [31] Erkut C. et al, *Acoustical analysis of tanbur, a Turkish long-necked lute*. ICSV6, Lyngby, Denmark, 5-8/7/1999, 1, pp. 345-352, (By permission)
- [32] Boersma, P., Weenink, D., *Praat (Version 5.1.21)*, Λογισμικό, Τελευταία έκδοση
<http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>

- [33] Leendertz, J.A., Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect, *J. Phys. E: Scientific Instruments*, 3, pp. 214 – 218, 1970
- [34] Butters, J.N. and Leendertz, J.A., Holographic and video techniques applied to engineering measurement, *Journal of Measurement and Control*, 4, pp. 349 – 354, 1971
- [35] Molin, N.E., Applications of whole field interferometry in mechanics and acoustics, *Opt. Lasers Eng.*, 31, pp. 93-111, 1999
- [36] Rastogi, P.K., *Digital speckle pattern interferometry and related techniques*, John Wiley Sons Ltd., Chichester, 2001
- [37] Jones, R. and Wykes, C., *Holographic and speckle interferometry*, Cambridge University Press, Cambridge, 1989
- [38] Huang, C. H. and Ma, C. C., Experimental and numerical investigations of resonant vibration characteristics for piezoceramic plates. *J. Acoust. Soc. Am.*, 109, pp. 2780-2788, 2001
- [39] Bakarezos, M., Gymnopoulos, S., Brezas, S., Orfanos, Y., Maravelakis, E., Papadopoulos, C. I., Tatarakis, M., Antoniadis, A. and Papadogiannis, N.A., Vibration Analysis of the Top Plates of Traditional Greek String Musical Instruments. *Proceedings of the 13th International Congress of Acoustics and Vibration (ICSV13)*, Vienna, Austria, In CD-ROM Proceedings, Editors: J. Eberhardsteiner, H.A. Mang, H. Waubke
- [40] Γυμνόπουλος, Σ., Μπακαρέζος, Ε., Βάθης, Β., Χαρτοφύλακας, Λ., Μπρέζας, Σ., Ορφανός, Ι., Μαραβελάκης, Ε., Παπαδόπουλος, Χ., Ταταράκης, Μ., Αντωνιάδης, Α. και Παπαδογιάννης, Ν.Α., Ακουστική και συμβολομετρική ανάλυση της Κρητικής λύρας. *Ακουστική 2006*, Ι.Τ.Ε., Ηράκλειο, Ελλάδα, 18-19 Σεπτεμβρίου 2006, Πρακτικά σσ. 239-246, Εκδ.: Μ. Ταρουδάκης & Π. Παπαδάκης
- [41] Jansson, E. V., Molin, N. E. and Sundin, H., Resonances of a Violin Body Studied by Hologram Interferometry and Acoustical Methods. *Phys. Scripta*, 2, pp. 243-256, 1970

- [42] Müller, S. and Massarani, P., Transfer-function measurements with sweeps, *J.Audio Eng. Soc.* 49, 443–471, 2001
- [43] Jansson, E. V., Admittance measurements of 25 high quality violins. *Acustica-Acta Acustica*, 83, 337-341, 1997
- [44] Erkut, C. and Välimäki, V., Model-based sound synthesis of tanbur, a Turkish long-necked lute. *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'00)*, Istanbul, Turkey, 5-9/6/2000, 2, pp. 769-772, (© 2000 IEEE. By permission)
- [45] Meyer, J., *Acoustics and the performance of music*. Verlag Das Musikinstrument, Frankfurt. pp. 75-102, 1978
- [46] Everest, F.A., *Master Handbook of Acoustics*. 4th Ed. Mc-Grow Hill, 2001