



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΜΕΝΗΣ ΥΛΗΣ

Ψυχοακουστική μελέτη διφωνιών απλών τόνων  
ως προς το λόγο των συχνοτήτων τους  
και το τονικό ύψος



Στεφανία Κακλαμάνη

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Σιμσερίδης

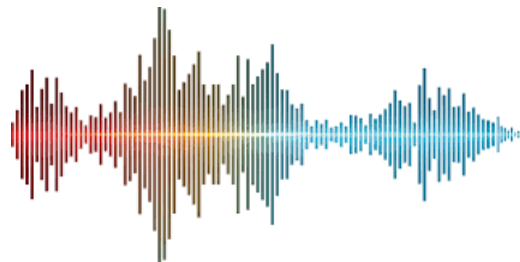
ΑΘΗΝΑ 2022





NATIONAL AND KAPODISTRIAN UNIVERSITY OF ATHENS  
DEPARTMENT OF PHYSICS  
SECTION OF CONDENSED MATTER PHYSICS

**Psychoacoustic study of simple-tone diphonies  
relative to their frequency ratio  
and pitch**



**Stefania Kaklamani**

Diploma Thesis

Supervisor: Constantinos Simserides

ATHENS 2022





## Ευχαριστίες

Θα ήθελα πρώτα από όλους να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Σιμσερίδη, ο οποίος, μέσα από τη δική του πρόταση και παρότρυνση, μου έδωσε την ευκαιρία να συνδυάσω δύο πράγματα, που αγαπώ, τη φυσική και τη μουσική. Έτσι ανακάλυψα την Ακουστική, που μου προσέφερε πολλές καινούργιες γνώσεις στο πεδίο της φυσικής και της μουσικής. Με τις συμβουλές του και την καθοδήγησή του με βοήθησε πολύ στη μελέτη του θέματος, αλλά και στην επεξεργασία του. Σε όλη τη διάρκεια της εργασίας ήταν πάντα διαθέσιμος για απορίες και ερωτήσεις τις οποίες απαντούσε πάντα με υπομονή και με συζήτηση, μέσα από την οποία προέκυψαν πολλά ενδιαφέροντα και καινούργια πράγματα και δίνοντάς μου χώρο να εκφραστώ και να μάθω να δουλεύω σε ερευνητικό επίπεδο. Οι γνώσεις που αποκόμισα από αυτή τη διαδικασία, αλλά κυρίως η εμπιστοσύνη και η ενθάρρυνση που εισέπραξα είναι πράγματα που θα τα θυμάμαι.

Δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους φοιτητές του τμήματος φυσικής αλλά και καθηγητές αυτού καθώς και τους φοιτητές του τμήματος μουσικών σπουδών, που πήραν μέρος στο πείραμα πρόθυμα και διέθεσαν λίγο από το χρόνο τους. Χωρίς αυτούς δεν θα είχε πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη εργασία με τόσο μεγάλο αριθμό ατόμων, αφού αποτέλεσαν το μεγαλύτερο κομμάτι του δείγματος. Ακόμη μέσα από τη συζήτηση μαζί τους μου έδωσαν καινούργιες ιδέες για περαιτέρω έρευνα, αλλά και να δω από άλλη σκοπιά το πείραμα.

Τέλος ευχαριστώ θερμά όλους τους φίλους και συγγενείς, που έλαβαν μέρος στο πειραματικό μέρος ευχαρίστως και με βοήθησαν πολύ με τη διεξαγωγή του πειράματος και την εύρεση ατόμων, αλλά και επειδή με στήριξαν και με ενθάρρυναν καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας, ενώ κάποιoi από αυτούς, με συμβουλές και παρατηρήσεις, με βοήθησαν πολύ με την προσέγγιση του θέματος της διπλωματικής.



## Περίληψη

Μελετήσαμε πιθανούς λόγους για τους οποίους μία διφωνία απλών τόνων μπορεί να χαρακτηριστεί από τον-την ακροατή-ακροάτρια ως σύμφωνη ή διάφωνη, δηλαδή ως ευχάριστη ή όχι στο άκουσμά της, με την πραγματοποίηση ενός πειράματος σε ένα σύνολο 70 προσώπων. Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιήσαμε ένα πλήθος διφωνιών με διαφορετικούς λόγους των συχνοτήτων τους, ώστε αυτοί να αντιστοιχούν στα διαστήματα της δυτικής μουσικής, τα οποία είναι πιο διαδεδομένα και αναγνωρίσιμα από το γενικό κοινό, ενώ παράλληλα οι διφωνίες έχουν μεταβλητό τονικό ύψος, ώστε να διερευνηθεί εάν υπάρχει σχέση της προτίμησης ενός ήχου με τη συχνότητά του. Οι απλοί τόνοι, οι απαρτίζοντες μια διφωνία, δεν αντιστοιχούν στις συνηθισμένες νότες, αλλά διατηρείται ο λόγος των συχνοτήτων. Επί παραδείγματι, για τη δημιουργία μιας οκτάβας δεν παίρνουμε 220 Hz (La3) και 440 Hz (La4) αλλά 200 Hz και 400 Hz. Ένας κατάλογος με τις χρησιμοποιηθείσες διφωνίες βρίσκεται στο Παράρτημα Α'.

Οι διφωνίες φτιάχτηκαν στον υπολογιστή με το λογισμικό Audacity και το ψυχοακουστικό πείραμα με το λογισμικό PsychoPy. Οι διφωνίες παρουσιάστηκαν με τυχαία σειρά στα υποκείμενα (πρόσωπα). Το υποκείμενο απαντούσε με Ναι ή Όχι αν του αρέσει ή όχι μια διφωνία. Μεταφράσαμε το Ναι σε 1 και το Όχι σε 0, και μελετήσαμε στατιστικά τις προτιμήσεις των υποκειμένων. Δηλαδή, η προτίμηση ορίζεται ως η μέση τιμή των Ναι (1) και Όχι (0). Διακρίναμε κατηγορίες όπως άνδρες - γυναίκες, μουσικοί - μη μουσικοί, καθώς και ηλικιακές. Η στατιστική μελέτη έγινε με μέσες τιμές, τυπικές αποκλίσεις, σφάλματα, σύγκριση μέσων τιμών με κριτήριο Whitney-Mann και μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Γενικά, φαίνεται πως η αύξηση της συχνότητας μειώνει την προτίμηση, ενώ μεγαλύτεροι λόγοι είναι ίσως προτιμητέοι.



## Abstract

We studied possible reasons for which a dipphony of simple tones can be characterized from the listener as consonant or dissonant, i.e., as pleasant or not at hearing it, with the realization of an experiment in a set of 70 persons. For this study we used a number of diphonies with different frequency ratios, so that they correspond to the intervals of western music, which are the most widespread and recognizable by the general public, while in parallel these diphonies have variable pitch, in order to investigate whether there is a relationship between the preference of a sound and its frequency. The simple tones, constituting a dipphony, do not correspond to usual notes, but we keep the ratio of frequencies. For example, to construct an octave we do not take 220 Hz (La3) and 440 Hz (La4) but 200 Hz and 400 Hz. A catalogue of the used diphonies is given in Appendix A'.

These diphonies were constructed in a computer with the software Audacity and the psychoacoustic experiment with software PsychoPy. These diphonies were presented in random order to the subjects (persons). The subject responded with Yes or No if they liked the dipphony or not. We translated Yes to 1 and No to 0, and studied statistically the subjects' preferences. In other words, *preference* is defined as the mean value of Yes (1) and No (0). We discriminate categories as men - women, musicians - non musicians, as well as relative to age. The statistical study was performed with mean values, standard deviations, errors, comparison of mean values with the Whitney-Mann criterion and the least squares method. Generally, it seems that increasing the pitch decreases preference, while larger ratios may be preferred.



---

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Βασικά χαρακτηριστικά του ήχου</b>	<b>3</b>
1.1	Αντικειμενικά μεγέθη του ήχου . . . . .	4
1.2	Αντικειμενικά μεγέθη του ήχου στην ακουστική και κλίμακες μέτρησής τους . . . . .	7
1.2.1	Φυσικό περιεχόμενο των αντικειμενικών μεγεθών της ακουστικής . . . . .	7
1.2.2	Ψυχοφυσικός νόμος Weber-Fechner και στάθμες υποκειμενικών μεγεθών ήχου . . . . .	9
1.2.3	Κλίμακα decibel (dB) και στάθμες ακουστικών μεγεθών του ήχου . . . . .	9
1.3	Υποκειμενικά μεγέθη του ήχου . . . . .	11
1.3.1	Ακουστότητα (Loudness) . . . . .	12
1.3.2	Στάθμη Ακουστότητας (Loudness Level) . . . . .	12
1.3.2.1	Διάγραμμα ισοακουστικών καμπυλών . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Απλοί τόνοι και η υπέρθεσή τους</b>	<b>16</b>
2.1	Απλός τόνος και χαρακτηριστικά του . . . . .	16
2.2	Υπέρθωση δύο απλών τόνων . . . . .	18
2.2.1	Υπέρθωση δύο τρεχόντων κυμάτων απλών τόνων με διαφορετικές συχνότητες και ίδιο πλάτος . . . . .	18

2.2.2	Διφωνία: Υπέρθυση δύο απλών τόνων με διαφορετικές συχνότητες στο ίδιο σημείο του χώρου . . . . .	19
2.2.3	Περίπτωση υπέρθεσης 2 απλών τόνων με πολύ κοντινές συχνότητες . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Το αυτί και η αντίληψη του ήχου</b>	<b>27</b>
3.1	Δομή του αυτιού . . . . .	27
3.1.1	Εξωτερικό αυτί . . . . .	28
3.1.2	Μεσαίο αυτί . . . . .	28
3.1.3	Εσωτερικό αυτί . . . . .	29
3.1.3.1	Η ανταπόκριση του βασικού υμένα στις διαφορετικές συχνότητες .	30
<b>4</b>	<b>Πείραμα και επεξεργασία πειραματικών δεδομένων</b>	<b>34</b>
4.1	Περιγραφή πειράματος και παραμέτρων . . . . .	34
4.1.1	Διφωνίες πειραματικού μέρους . . . . .	34
4.1.2	Λογισμικό και διαδικασία πειράματος . . . . .	36
4.1.3	Δείγμα ατόμων . . . . .	37
4.2	Παράθεση και σχολιασμός διαγραμμάτων γενικής εικόνας . . . . .	38
4.2.1	Διαγράμματα μέσω τιμών για το γενικό σύνολο . . . . .	39
4.2.2	Διαγράμματα μέσω τιμών μουσικών και μη μουσικών . . . . .	41
4.2.3	Διαγράμματα μέσω τιμών ανδρών και γυναικών . . . . .	43
4.2.4	Διαγράμματα μέσω τιμών για τις ομάδες άνω των 50 ετών και κάτω των 50 ετών . . . . .	46
4.2.5	Διαγράμματα μέσω τιμών για τις ομάδες 35 ετών και άνω και 35 ετών και κάτω . . . . .	49



---

4.3	Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών . . . . .	52
4.3.1	Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών γενικού συνόλου . . . . .	52
4.3.2	Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών μουσικών και μη μουσικών . . . . .	53
4.3.3	Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών ανδρών και γυναικών του δείγματος .	54
4.3.4	Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών για τις ομάδες άνω των 35 κάτω των 35 . . . . .	55
4.3.5	Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών για τις ομάδες άνω των 50 και κάτω των 50 . . . . .	56
4.4	Διαγράμματα X-Υ για τη σύγκριση των μέσων τιμών των υποομάδων του συνόλου	58
4.4.1	Διαγράμματα X-Υ για τις ομάδες μουσικών και μη μουσικών . . . . .	58
4.4.2	Διαγράμματα X-Υ για τις ομάδες ανδρών και γυναικών . . . . .	60
4.4.3	Διαγράμματα X-Υ για τις ομάδες ατόμων με ηλικίες άνω των 50 και ατόμων με ηλικίες κάτω των 50 ετών . . . . .	62
4.4.4	Διαγράμματα X-Υ για τις ομάδες ατόμων με ηλικίες άνω των 35 και ατόμων με ηλικίες κάτω των 35 ετών . . . . .	63
4.5	Διαγράμματα για τις μέσες τιμές κάθε κατηγορίας διφωνίας και διαγράμματα για τις μέσες τιμές κάθε κατηγορίας συχνότητας . . . . .	65
4.5.1	Διαγράμματα γενικής εικόνας για τις ομάδες του δείγματος των μουσικών και των μη μουσικών . . . . .	66
4.5.2	Διαγράμματα γενικής εικόνας για τις ομάδες του δείγματος των ανδρών και των γυναικών . . . . .	67
4.5.3	Διαγράμματα γενικής εικόνας για τις ομάδες του δείγματος ηλικίας άνω των 50 ετών και κάτω των 50 ετών . . . . .	68
4.5.4	Διαγράμματα γενικής εικόνας για τις ομάδες του δείγματος ηλικίας άνω των 35 ετών και κάτω των 35 ετών . . . . .	69

---

5	Συμπεράσματα από την πειραματική διαδικασία	71
5.1	Συμπεράσματα που προκύπτουν από το πείραμα . . . . .	71
5.1.1	Μελέτη των αποτελεσμάτων ως προς το λόγο των διφωνιών . . . . .	71
5.1.2	Μελέτη των αποτελεσμάτων του πειράματος ως προς τη συχνότητα των διφωνιών . . . . .	73
	Κατάλογος Σχημάτων	76
	Κατάλογος Πινάκων	84
	Α΄ Κατάλογος των διφωνιών του πειράματος	85
	Β΄ Κυματοσυναρτήσεις και φάσματα Fourier για κάθε κατηγορία διφωνίας	88
	Βιβλιογραφία	93

---

# Εισαγωγή

Οι πρώτες έρευνες γύρω από τη συμφωνία και τη διαφωνία των ήχων θεωρείται ότι έγιναν από τον Πυθαγόρα. Η φιλοσοφική του θεώρηση για τον κόσμο βασιζόταν στην πίστη ότι τα πάντα πρέπει να ερμηνεύονται με αριθμούς. Διατύπωσε πολλές θεωρίες για την μουσική και την ακουστική και ανακάλυψε τις σχέσεις διαστημάτων και μήκους χορδών κάνοντας πειράματα στο μονόχορδο, ένα όργανο δικής του επινόησης. Με αυτόν τον τρόπο βρήκε τους αριθμητικούς λόγους των συμφωνιών και έτσι είχαν οριστεί ως απόλυτα σύμφωνα διαστήματα αυτά της ταυτοφωνίας, της οκτάβας, της τετάρτης και της πέμπτης. Η σειρά αυτή των σύμφωνων διφωνιών εμπλουτίστηκε την εποχή της Αναγέννησης από τον Ιταλό μουσικό και συνθέτη Geoseffo Zarlino, ο οποίος διεύρυνε την Πυθαγόρεια τετρακτύς για να προσθέσει τους αριθμούς 5 και 6 και έτσι με αυτόν τον τρόπο να συμπεριληφθούν και τα διαστήματα της τρίτης και της μεγάλης έκτης, τα οποία εκείνη την περίοδο ήταν ιδιαίτερα δημοφιλή.

Στη συνέχεια πολλοί ασχολήθηκαν με τους πιθανούς λόγους για τους οποίους μας αρέσουν κάποιοι ήχοι και κάποιοι άλλοι δεν μας ελκύουν προσπαθώντας να το εξηγήσουν με όρους φυσικής και μελετώντας τις ιδιότητες του ήχου. Η επιστήμη του ήχου προσέλκυσε πολλούς επιστήμονες, όπως τον Γαλιλαίο, τον Descart, τον Bernulli και τον Euler και τον Fourier. Μέσα από τις έρευνές τους κατάφεραν να προχωρήσουν και να αποκαλύψουν πιο πολλά για το φάσμα των ήχων και για τις συνιστώσες που το αποτελούν, ειδικά για τις αρμονικές του, και να συνδέσουν τη θεμελιώδη συχνότητα ενός ήχου και την αρμονική σειρά που παράγει με τους διαφορετικούς τρόπους, που ταλαντώνεται ένα σώμα. Η πιο σημαντική συμβολή ήρθε από τον Γερμανό φυσικό Hermann von Helmholtz, ο οποίος πρότεινε ότι η συμφωνία ενός ήχου, πηγάζει από την απουσία τραχύτητας στο άκουσμά του. Η βάση για την ακουστική τραχύτητα είναι η αλληλεπίδραση ηχητικών κυμάτων με παρόμοιες συχνότητες, των οποίων ο συνδυασμός δίνει κύματα με περιοδικές ενισχυτικές και καταστρεπτικές συμβολές. Ήχοι με έντονες τέτοιες εναλλαγές, θεωρούνται διάφωνοι και ενοχλητικοί, ενώ σύμφωνοι κατά τον Helmholtz, είναι ήχοι που έχουν πολύ μικρή ή καθόλου τραχύτητα. Η ενόχληση αυτή συνδέθηκε από τον ίδιο με τις περιοχές του αυτιού, που διεγείρουν και οι οποίες είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους.

Σε πιο σύγχρονες έρευνες υπάρχει μία αμφιβολία για το κατά πόσο ισχύει πάντα η σύνδεση της τραχύτητας με τη διαφωνία ενός ήχου, καθώς παρατηρήσεις με ήχους με κοντινές συχνότητες που εφαρμόζονται ξεχωριστά σε κάθε αυτί δεν δείχνουν να θεωρούνται λιγότερο ενοχλητικοί παρ' όλο

που επηρεάζουν διαφορετικές περιοχές του αυτιού. Ακόμη στις συγχορδίες ενώ όταν προσθέτουμε νότες γενικά θεωρείται ότι αυξάνεται η διαφωνία τους δεν παρατηρείται πάντα κάτι τέτοιο, ενώ και να αφαιρεθούν τεχνητά τα διακροτήματα πάλι δεν αυξάνεται η συμφωνία της.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία αναφορά στα αντικειμενικά και υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου και στο φυσικό τους περιεχόμενο. Παρουσιάζεται η λογαριθμική κλίμακα Decibel και στη συνέχεια ορίζονται με βάση αυτή οι στάθμες της έντασης, της πίεσης και της ακουστότητας, που χρησιμοποιούνται στην ακουστική για την απεικόνιση των ιδιοτήτων του ήχου και τον τρόπο που εμείς τις αντιλαμβανόμαστε. Τέλος παρουσιάζεται η καμπύλη Fletcher-Munson, που αποτελεί μία χαρτογράφηση της διαφορετικής ευαισθησίας του ανθρώπινου αυτιού στις διάφορες συχνότητες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο απλός τόνος και τα φυσικά του χαρακτηριστικά, ενώ στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η υπέρθεση δύο τέτοιων τόνων, που αποτελεί και βασικό κομμάτι του πειράματος αφού τέτοιοι είναι οι ήχοι που χρησιμοποιήσαμε. Παρατίθενται παραδείγματα από διφωνίες που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Εξετάζεται η ειδική περίπτωση της υπέρθεσης δύο τόνων με κοντινές συχνότητες μέσα από παραδείγματα και η ανάλυση του διακροτήματος δύο ηχητικών κυμάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται το ανθρώπινο αυτί και ο τρόπος με τον οποίο αυτό ενισχύει τους ήχους και τους επεξεργάζεται, ενώ γίνεται αναφορά στην περίπτωση, που ένα διακρότημα από δύο ηχητικά κύματα αλληλεπιδράσει με το αυτί.

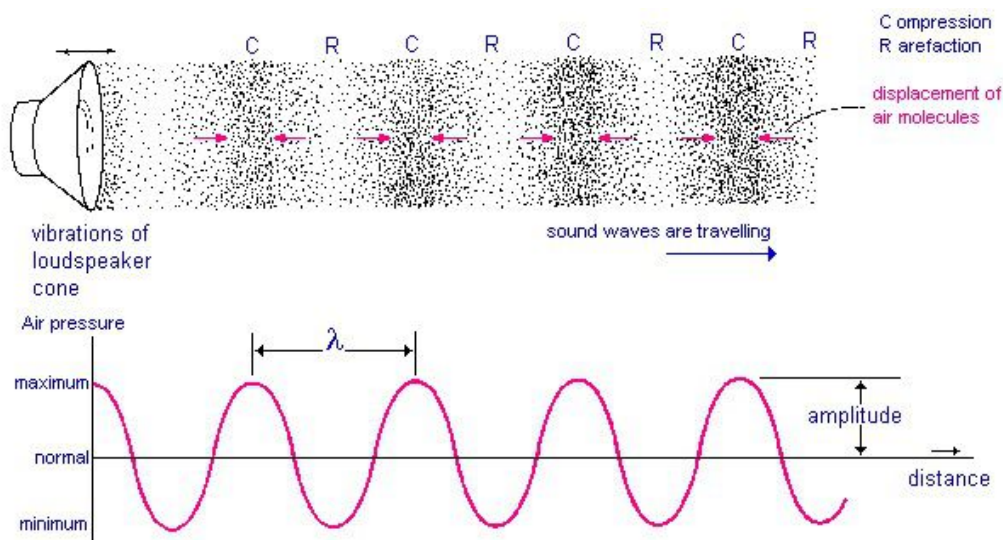
Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά το πείραμα, πληροφορίες για παραμέτρους του, όπως το δείγμα των ατόμων, τους ήχους που χρησιμοποιήσαμε και ο τρόπος με τον οποίο έγινε η επεξεργασία των αποτελεσμάτων του. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις απαντήσεις του συνόλου του δείγματος αλλά και από τις διάφορες ομάδες του. Αυτό γίνεται με δύο διαφορετικούς τρόπους. Αναφερόμαστε στον τρόπο, που συγκρίναμε τα αποτελέσματα στις περιπτώσεις, που χωρίσαμε το δείγμα σε δύο ομάδες.

Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μία επισκόπηση των συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα του πειράματος και τα διαγράμματα του τέταρτου κεφαλαίου, το οποίο γίνεται χωριστά για το λόγο των συχνοτήτων των διφωνιών και χωριστά για το τονικό ύψος τους.

# Κεφάλαιο 1

## Βασικά χαρακτηριστικά του ήχου

Οι ήχοι βρίσκονται μέσα στην καθημερινότητά μας και έχουμε μάθει να ζούμε και να λειτουργούμε με αυτούς. Από το πρωί που θα ξυπνήσουμε με έναν ήχο αφύπνισης, στο δρόμο που θα βγούμε και θα ξέρουμε πώς θα κινηθούμε με βάση τους ήχους των οχημάτων και των ανθρώπων που κινούνται δίπλα μας, αργότερα η μουσική που θα ακούσουμε και τόσοι άλλοι που συνοδεύουν την καθημερινότητά μας και τους έχουμε συνηθίσει. Σαν ηχητικό κύμα, ορίζεται κάθε διάμηκες μηχανικό κύμα, όπου οι ταλαντώσεις των στοιχείων του μέσου στο οποίο διαδίδεται είναι παράλληλες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος [1].



**Εικόνα 1.1** Απεικόνιση ενός ημιτονοειδούς ήχου που παράγεται από μία πηγή, όπου φαίνονται τα αραιώματα και τα πυκνώματα των μορίων του αέρα και αντίστοιχα το ελάχιστο και το μέγιστο της κυματομορφής. Πηγή: [www.miniphysics.com](http://www.miniphysics.com).

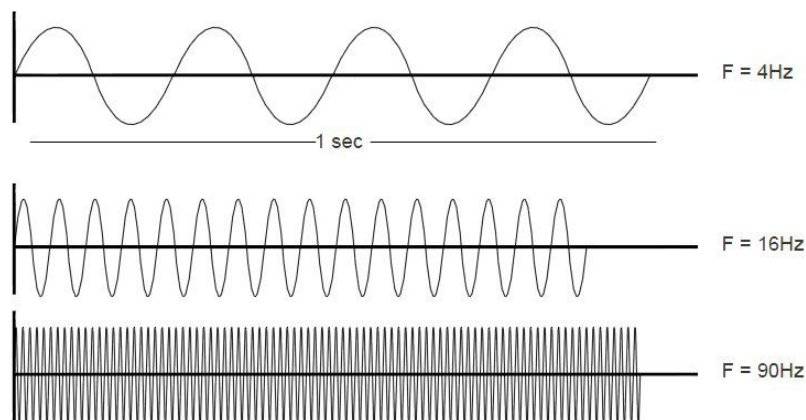
Έτσι για ένα ηχητικό κύμα το οποίο διαδίδεται π.χ. στον αέρα, αυτό που γίνεται είναι τα μόρια του αέρα να σχηματίζουν αραιώσεις και πυκνώσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στο μέγιστο και στο ελάχιστο πλάτος, αντίστοιχα του κύματος. Με αυτόν τον τρόπο διαδίδεται η ενέργεια του κύματος και έχουμε και τη μεταφορά του κατά μήκος του μέσου.

Οι ήχοι χαρακτηρίζονται από ορισμένα φυσικά μεγέθη τα οποία έχουν να κάνουν και με τις φυσικές τους ιδιότητες, αλλά και με τον τρόπο που εμείς, δηλαδή το ακουστικό μας σύστημα, αντιλαμβανόμαστε του εξωτερικούς ήχους που φτάνουν στο αυτί μας. Τα πρώτα λέγονται αντικειμενικά χαρακτηριστικά, ενώ τα δεύτερα υποκειμενικά.

## 1.1 Αντικειμενικά μεγέθη του ήχου

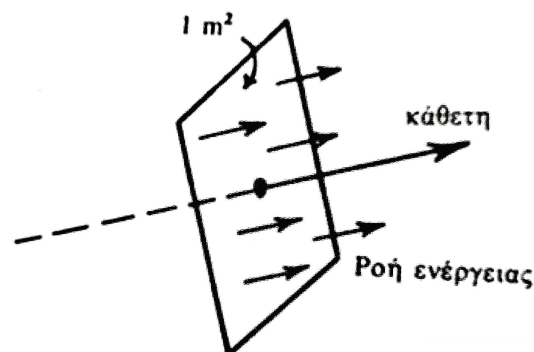
Τα αντικειμενικά μεγέθη ενός ήχου, έχουν να κάνουν με τα μετρήσιμα φυσικά χαρακτηριστικά του και δεν εξαρτώνται, ούτε από το περιβάλλον στο οποίο διαδίδεται το ηχητικό κύμα, ούτε από το πώς εμείς αντιλαμβανόμαστε τους ήχους. Αυτά είναι τα εξής:

- **(α) Η συχνότητα** η οποία έχει να κάνει με τον αριθμό των πλήρων ταλαντώσεων που πραγματοποιούνται στη μονάδα του χρόνου. Όσοι περισσότερες ταλαντώσεις έχουμε μέσα στο ίδιο χρονικό διάστημα, τόσο η συχνότητα ενός ήχου αυξάνεται και έχει σαν αποτέλεσμα να ανεβαίνει τονικό ύψος, όπως λέμε στη μουσική. Το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται ήχους, που βρίσκονται ανάμεσα στα 20 Hz και τα 20 kHz. Κάποια παραδείγματα με απλούς τόνους φαίνονται στην Εικόνα 1.2.



**Εικόνα 1.2** Ηχητικά κύματα (απλοί τόνοι) διαφορετικής συχνότητας. Από πάνω προς τα κάτω η συχνότητα των κυμάτων αυξάνεται με αποτέλεσμα να έχουμε ένα όλο και πιο πυκνό ημιτονοειδές σήμα, το οποίο δείχνει ότι μέσα στην ίδια μονάδα του χρόνου, πραγματοποιούνται όλο και περισσότερες ταλαντώσεις. Πηγή: e-learning.sch.gr.

- **(β) Η ένταση**, η οποία εκφράζει τη ροή της ενέργειας του ήχου προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και ορίζεται ως το πηλίκο της ηχητικής ενέργειας  $W$ , που διαπερνά κάθετα τη μονάδα της επιφάνειας στη μονάδα του χρόνου. Η ηχητική ενέργεια ξεκινάει από την πηγή και απομακρύνεται από αυτήν σχηματίζοντας μια επιφάνεια σφαίρας της οποίας η ακτίνα ολοένα και μεγαλώνει. Έτσι εάν πάρουμε δύο επιφάνειες ίδιου εμβαδού, οι οποίες απέχουν διαφορετική απόσταση από την πηγή, τότε αντίστοιχα, όπως θα συνέβαινε σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, η ροή ενέργειας για την επιφάνεια που βρίσκεται πιο μακριά από την πηγή θα είναι μικρότερη. Στην ένταση αναφέρεται η Εικόνα 1.3.

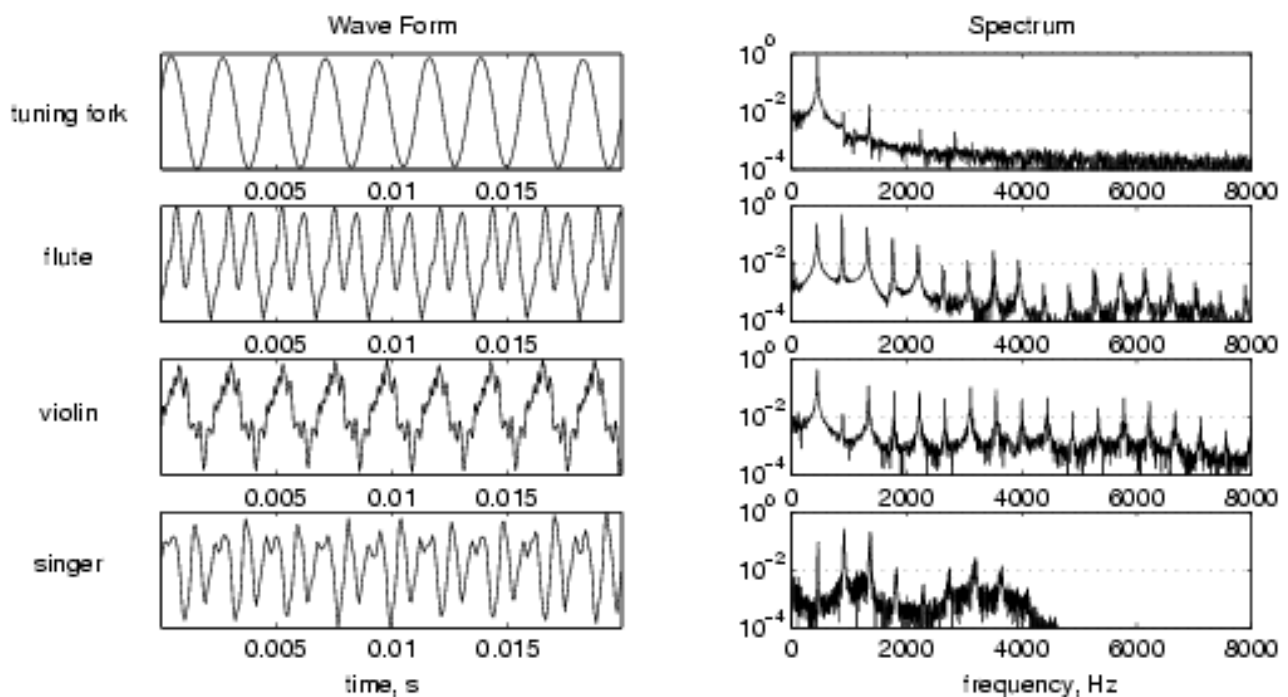


**Εικόνα 1.3** Για τον ορισμό της έντασης του ήχου. Η ποσότητα ενέργειας που διαπερνά την επιφάνεια στην οποία διαδίδεται το κύμα, καθορίζει και την ένταση του κύματος. Αυτή εξαρτάται από τη δύναμη με την οποία παράγεται ο ήχος αλλά και με το πόσο κοντά είμαστε στην ηχητική πηγή. Πηγή: Χαράλαμπος Σπυρίδης, Φυσική και Μουσική ακουστική, σελ. 214.

Η ένταση ενός ηχητικού κύματος σχετίζεται με το πλάτος της κυματομορφής του, δηλαδή με το πλάτος του ημιτονοειδούς κύματος που το αναπαριστά. Επομένως ένα ημιτονοειδές κύμα με πλάτος διπλάσιο από ένα άλλο, αναπαριστά αντίστοιχα και έναν ήχο με ένταση διπλάσια από τον πρώτο.

- **(γ) Η κυματομορφή**, δηλαδή η μορφή που έχει το σήμα του ήχου και το οποίο σχετίζεται με το σώμα από το οποίο παράγεται ο ήχος και τις ιδιότητές αυτού (σχήμα, μέγεθος, υλικό). Ένα σώμα που ταλαντώνεται, όπως για παράδειγμα μία χορδή ή το σώμα ενός οργάνου, δεν ταλαντώνεται με τον ίδιο τρόπο σε όλη την έκτασή του. Επειδή η χορδή είναι ακλόνητη και στα δύο άκρα, τα κύματα που διαδίδονται σε αυτήν, ανακλώνται στα άκρα της και κινούνται στη συνέχεια προς τα πίσω σε όλο το μήκος της [1]. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται στάσιμα κύματα, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και συμβάλλουν. Ο μεγαλύτερος τρόπος ταλάντωσης περιλαμβάνει στην περίπτωση της χορδής, όλο το μήκος της και παράγει την πιο ενεργητική συνιστώσα του φάσματος, δηλαδή τη συχνότητα που κυριαρχεί. Αυτή η συχνότητα ονομάζεται θεμελιώδης συχνότητα της ταλάντωσης. Ο αμέσως επόμενος τρόπος ταλάντωσης αντιστοιχεί στο μισό του μήκους της χορδής (1ος αρμονικός),

ο επόμενος στο ένα τρίτο (2ος αρμονικός) και ούτω καθεξής. Αυτό συμβαίνει επειδή οι δεσμοί, που δημιουργούνται στα άκρα της αποκλείουν τις συχνότητες ταλάντωσης που δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας ταλάντωσης ολόκληρου του μήκους της χορδής. Η σύνθεση όλων αυτών των επιμέρους κυμάτων με τα διαφορετικά μήκη κύματος, μας δίνει την τελική μορφή της κυματομορφής του ηχητικού σήματος, δείτε την Εικόνα 1.4.



**Εικόνα 1.4** Η κυματομορφή (αριστερά) και το φάσμα (δεξιά) διαφορετικών μουσικών οργάνων που παίζουν τη νότα ΛΑ (440 Hz). Από πάνω προς τα κάτω: (α) διαπασών (β) φλάουτο (γ) βιολί και (δ) τραγουδίστρια. Όπως βλέπουμε και οι κυματομορφές και τα φάσματα έχουν αισθητές διαφορές μεταξύ τους, καθώς διαφέρουν στον αριθμό και τη θέση των κορυφών που περιέχουν, παρόλο που αναπαράγουν την ίδια νότα. Έτσι μπορούμε να ξεχωρίσουμε την πηγή και να καταλάβουμε από ποιο όργανο προέρχεται κάθε φορά ο ήχος. Πηγή: [amath.colorado.edu/pub/matlab/music](http://amath.colorado.edu/pub/matlab/music).

Η κυματομορφή ενός ήχου λοιπόν, προσδιορίζεται από όλους αυτούς τους αρμονικούς τρόπους ταλάντωσης με το θεμελιώδη όπως είπαμε να χαρακτηρίζει το φάσμα και τον ήχο. Οι υπόλοιποι αρμονικοί βρίσκονται πάνω από τον θεμέλιο. Το πλάτος τους είναι μικρότερο από αυτό του θεμέλιου και γι' αυτό το λόγο δεν ακούγονται καθαρά. Όλοι σχεδόν οι ήχοι στη φύση είναι σύνθετοι, όπως λέμε, δηλαδή έχουν μία θεμελιώδη συχνότητα και έναν αριθμό αρμονικών συχνοτήτων. Μόνο το διαπασών είναι μία ηχητική πηγή, που παράγει με πολύ μεγάλη προσέγγιση απλούς ημιτονοειδείς ήχους, δηλαδή ήχους αποτελούμενους από μία μόνο συχνότητα, όπως φαίνεται και στην παραπάνω Εικόνα 1.4.



## 1.2 Αντικειμενικά μεγέθη του ήχου στην ακουστική και κλίμακες μέτρησής τους

Στην ακουστική μας ενδιαφέρει να χρησιμοποιήσουμε κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη ενός ηχητικού σήματος με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούμε να τα μετράμε και να κάνουμε μία εκτίμηση του μεγέθους τους και έτσι να διαχωρίζουμε τους διαφορετικούς ήχους μεταξύ τους. Τα πιο βασικά αντικειμενικά μεγέθη που υπάρχουν είναι ( $\alpha$ ) η ισχύς του ταλαντούμενου μηχανικού συστήματος, ( $\beta$ ) η ένταση του ήχου, και ( $\gamma$ ) η πίεση του ηχητικού κύματος [2]

### 1.2.1 Φυσικό περιεχόμενο των αντικειμενικών μεγεθών της ακουστικής

**α) Ένταση του ήχου.** Όπως είπαμε και προηγουμένως η ένταση του ήχου, εκφράζει τη ροή της ενέργειας του ήχου προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και αποτελεί το μέσο ρυθμό ανά μονάδα επιφάνειας με τον οποίο μεταφέρεται ενέργεια από το κύμα στην επιφάνεια ή διαμέσου της επιφάνειας [1]. Αυτό γράφεται ως:  $I = \frac{P}{A}$ , όπου  $P$  ο χρονικός ρυθμός μεταφοράς ενέργειας (δηλαδή η ισχύς) του ηχητικού κύματος και  $A$  το εμβαδόν της επιφάνειας μέσα από την οποία περνάει το κύμα.

Θεωρούμε τώρα ένα ηχητικό κύμα, που διαδίδεται στον αέρα και προκαλεί αραιώσεις και πυκνώσεις των μορίων του και μία λεπτή φέτα αέρα πάχους  $dx$ , εμβαδού  $A$  και μάζας  $dm$ , που ταλαντώνεται μπρος-πίσω καθώς το ηχητικό κύμα περνάει από αυτήν. Η εξίσωση του κύματος είναι

$$s(x, t) = s_m \cos(kx - \omega t) \quad (1.1)$$

όπου  $s_m$  το πλάτος μετατόπισης του,  $k$  ο κυματαριθμός του και  $\omega$  η γωνιακή του συχνότητα. Η κινητική ενέργεια  $dK$  της φέτας είναι

$$dK = \frac{1}{2} dm v_s^2 \quad (1.2)$$

όπου  $v_s$  η ταχύτητα του ταλαντούμενου στοιχείου του αέρα, η οποία λαμβάνεται από την 1.1 ως:

$$v_s = \frac{ds}{dt} = -\omega s_m \sin(kx - \omega t)$$

Χρησιμοποιώντας αυτή τη σχέση και θέτοντας  $dm = \rho A dx$  μας επιτρέπει να γράψουμε την 1.2 ως

$$dK = \frac{1}{2} (\rho A dx) (-\omega s_m)^2 \sin^2(kx - \omega t) \quad (1.3)$$

και η διαίρεση αυτής με  $dt$  μας δίνει το ρυθμό με τον οποίον η κινητική ενέργεια μεταφέρεται με το κύμα. Το  $\frac{dx}{dt}$  για εγκάρσια κύματα είναι η ταχύτητα του κύματος  $v$ , συνεπώς έχουμε ότι:

$$\frac{dK}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v \omega^2 s_m^2 \sin^2(kx - \omega t) \quad (1.4)$$

Ο μέσος ρυθμός με τον οποίον μεταφέρεται κινητική ενέργεια είναι

$$\left(\frac{dK}{dt}\right)_{avg} = \frac{1}{2}\rho A v \omega^2 s_m^2 [\sin^2(kx - \omega t)]_{avg} = \frac{1}{4}\rho A v \omega^2 s_m^2 \quad (1.5)$$

αφού η μέση τιμή του τετραγώνου της συνάρτησης του ημιτόνου σε μία πλήρη ταλάντωση είναι  $\frac{1}{2}$ . Υποθέτουμε ότι η δυναμική ενέργεια μεταφέρεται από το κύμα με τον ίδιο ρυθμό. Η ένταση του κύματος  $I$ , η οποία είναι ο μέσος ρυθμός με τον οποίον μεταφέρεται ενέργεια και των δύο ειδών από το κύμα ανά μονάδα επιφάνειας, είναι τότε από την 1.5:

$$I = \frac{2(dK/dt)_{avg}}{A} = \frac{1}{2}\rho v \omega^2 s_m^2 \quad (1.6)$$

Αντικαθιστώντας την κυκλική συχνότητα  $\omega = 2\pi f$  και  $s_m = x_0$  για το πλάτος της ταλάντωσης των μορίων του αέρα και  $v = v_{\text{ήχου}}$ , παίρνουμε την εξίσωση

$$I = 2\pi^2 f^2 x_0^2 \rho v_{\text{ήχου}}, \quad (1.7)$$

από την οποία φαίνεται ότι η ένταση ενός ήχου είναι ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας του ήχου ( $f^2$ ), του τετραγώνου του πλάτους της ταλάντωσης των μορίων του αέρα ( $x_0^2$ ), της πυκνότητας του αέρα ( $\rho$ ), της ταχύτητας διάδοσης του ήχου εντός του αέρα ( $v_{\text{ήχου}}$ ).

**β) Πίεση ηχητικού κύματος.** Η πίεση ενός ηχητικού κύματος, έχει να κάνει με την περιοδική μεταβολή της συγκέντρωσης των μορίων του μέσου, δηλαδή με τον περιοδικό σχηματισμό αραιωμάτων και πυκνωμάτων που δημιουργεί το κύμα στο μέσο στο οποίο διαδίδεται. Καθώς το κύμα διαδίδεται, η πίεση του αέρα σε κάθε θέση  $x$  μεταβάλλεται ημιτονοειδώς. Για να περιγράψουμε αυτή τη μεταβολή γράφουμε

$$\Delta p(x, t) = \Delta p_m \sin(kx - \omega t) \quad (1.8)$$

όπου  $\Delta p(x, t)$  είναι η μεταβολή της πίεσης και  $\Delta p_m$ : το πλάτος της πίεσης που είναι η μέγιστη αύξηση ή μείωση της πίεσης εξαιτίας του κύματος. Μία αρνητική τιμή του  $\Delta p$  αντιστοιχεί σε διόγκωση του αέρα και μια θετική σε συμπίεση. Στην περιοχή όπου έχουμε πύκνωση του αέρα, η πίεση αντίστοιχα είναι μεγάλη, ενώ εκεί που έχουμε αραιώση, έχουμε χαμηλή πίεση.

**γ) Ισχύς ταλαντούμενου μηχανικού συστήματος.** Η ισχύς ενός ταλαντούμενου συστήματος εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο ένα σύστημα, το οποίο ταλαντώνεται αρμονικά, χάνει ενέργεια με αποτέλεσμα να εκτελεί φθίνουσα αρμονική ταλάντωση. Εκφράζεται με το πηλίκο  $\frac{\text{Ενέργεια}}{\text{Χρόνος}}$  και μετριέται σε Watt.

### 1.2.2 Ψυχοφυσικός νόμος Weber-Fechner και στάθμες υποκειμενικών μεγεθών ήχου

Πολύ μικρά ερεθίσματα δεν γίνονται αντιληπτά από τον άνθρωπο, παρά μόνο όταν φτάσουν σε μια συγκεκριμένη τιμή, η οποία ονομάζεται κατώφλι του αισθήματος. Εάν συνεχίσει να αυξάνεται το αίσθημα σιγά σιγά πάνω από το κατώφλι του αισθήματος, στην αρχή δε θα παρατηρήσουμε διαφορά σε αυτό που αντιλαμβανόμαστε μέχρι να φτάσουμε σε μια τιμή, όπου θα καταλάβουμε ότι το αίσθημα έγινε πιο έντονο. Τη διαφορά μεταξύ του αισθήματος κατωφλίου και της τιμής, στην οποία αντιληφθήκαμε διαφορά, την ονομάζουμε κατώφλι διαφοράς.

Το 1834 ο E. Weber ισχυρίστηκε μέσα από πειράματα, ότι η ευαισθησία των αισθήσεων στα διαφορετικά ερεθίσματα εξαρτάται απόλυτα από το κατώφλι διαφοράς  $\Delta S$  και ακολουθεί την παρακάτω σχέση

$$\Delta S = K \cdot S, \quad (1.9)$$

όπου  $S$  το αρχικό ερέθισμα (stimulus) και  $K$  μια σταθερά. Αυτό ορίζεται ως ουδός διαφορά, just noticeable difference (JND), δηλαδή, μόλις αισθητή διαφορά. Η Εξ. 1.9 εκφράζεται με λόγια ως εξής: Όσο μεγαλύτερο είναι το αρχικό ερέθισμα, τόσο μεγαλύτερο θα πρέπει να είναι και το κατώφλι διαφοράς, ώστε να αντιληφθούμε το δεύτερο ερέθισμα ως διαφορετικό από το αρχικό ερέθισμα. Έτσι ο E. Weber έδειξε ότι δεν αντιλαμβανόμαστε τις απόλυτες διαφορές μεταξύ των ερεθισμάτων, αλλά τις σχετικές τους διαφορές.

Το 1860 ο G. Fechner για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ ‘της δύναμης’ του ερεθίσματος,  $S$ , και ‘της έντασης’ του προκαλούμενου αισθήματος,  $I$ , διατύπωσε τον ψυχοφυσικό νόμο, τον αποκαλούμενο σήμερα νόμο Weber-Fechner [2], ο οποίος εκφράζεται ως εξής

$$I = K \log \left( \frac{S}{S_0} \right). \quad (1.10)$$

Ο νόμος αυτός αποτελεί μαθηματικοποίηση των παρατηρήσεων του G. Fechner σχετικά με τον τρόπο που το αίσθημα ακολουθεί το ερέθισμα, καθώς κατάλαβε ότι δεν είναι γραμμική η σχέση μεταξύ τους. Η τιμή  $S_0$  αντιστοιχεί στο πλάτος κατωφλίου του μεγέθους, δηλαδή στη χαμηλότερη τιμή στην οποία το αισθητήριο όργανο αρχίζει να ανταποκρίνεται και αντίστοιχα ο άνθρωπος αρχίζει να αντιλαμβάνεται το ερέθισμα.

### 1.2.3 Κλίμακα decibel (dB) και στάθμες ακουστικών μεγεθών του ήχου

Για τη μέτρηση των ακουστικών μεγεθών του ήχου χρησιμοποιούμε την κλίμακα Decibel, η οποία εκφράζει το δεκαπλάσιο του λογαρίθμου του πηλίκου δύο τιμών ενός μεγέθους και δείχνει πόσο μεγαλύτερη ή μικρότερη είναι η τιμή του αριθμητή σε σχέση με την τιμή του παρονομαστή,

δηλαδή το επίπεδο, η στάθμη (level,  $L$ ), π.χ. ισχύος ή εντάσεως, ορίζεται ως

$$L(\text{dB}) = 10 \cdot \log \left( \frac{\text{αριθμητική τιμή του μεγέθους 1}}{\text{αριθμητική τιμή του μεγέθους 2}} \right). \quad (1.11)$$

Το decibel είναι το 1/10 της μονάδας bel. Για να μπορέσουμε να τη χρησιμοποιήσουμε για τη μέτρηση των διαφόρων μεγεθών της Ακουστικής θα πρέπει ο παρονομαστής να έχει μια σταθερή και γνωστή τιμή, την οποία την θεωρούμε ως τιμή αναφοράς. Έτσι μπορούμε να έχουμε ένα αρχικό σημείο και σύμφωνα με αυτό να μετράμε το κάθε μέγεθος.

**α) Στάθμη ισχύος (power level, PL).** Για να μετρήσουμε τη στάθμη ισχύος ενός σήματος υπολογίζουμε το πηλίκο

$$PL(\text{dB}) = 10 \cdot \log \left( \frac{\text{αριθμητική τιμή ισχύος σήματος}}{\text{αριθμητική τιμή ισχύος σήματος αναφοράς}} \right) = 10 \cdot \log \left( \frac{P_1}{P_{\text{αναφοράς}}} \right). \quad (1.12)$$

**β) Στάθμη έντασης (intensity level, IL).** Όπως είπαμε, η ένταση  $I$  ενός κύματος ορίζεται ως η ισχύς (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου) που διαπερνά κάθετα μια επιφάνεια μοναδιαίου εμβαδού, δηλαδή  $1 \text{ m}^2$  στο Διεθνές Σύστημα SI. Μονάδα μέτρησης της έντασης στο Διεθνές Σύστημα SI είναι το  $1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Η στάθμη έντασης (intensity level, IL), ενός σήματος υπολογίζεται ως

$$IL(\text{dB}) = 10 \cdot \log \left( \frac{\text{ένταση σήματος}}{\text{ένταση σήματος αναφοράς}} \right) = 10 \cdot \log \left( \frac{I_1}{I_{\text{αναφοράς}}} \right). \quad (1.13)$$

Ως ένταση αναφοράς λαμβάνουμε την τιμή  $I_{\text{αναφοράς}} = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ , η οποία αντιστοιχεί στο κατώφλι ακουστότητας για συχνότητα 1000 Hz ενός ανθρώπου με οξεία ακοή.

**γ) Στάθμη Πίεσης Ήχου (Sound Pressure Level, SPL).** Η ένταση ενός ημιτονοειδούς ήχου, ο οποίος διαδίδεται σε ελαστικό μέσο πυκνότητας  $\rho$ , μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του πλάτους της πίεσης του κύματος,  $P_0$ , ως

$$I = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_0^2}{\rho v_{\text{ήχου}}} \quad (1.14)$$

όπου  $\rho v_{\text{ήχου}}$  είναι η ακουστική αντίσταση του ελαστικού μέσου και  $P_0$  είναι το πλάτος της πίεσης του κύματος σε Pa.

Θεωρώντας ως ένταση αναφοράς  $I_{\text{αναφοράς}} = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  και για ελαστικό μέσο τον αέρα, μπορούμε να εκτιμήσουμε την τιμή του πλάτους της πίεσης αναφοράς  $P_{0,\text{αναφοράς}}$ . Σε θερμοκρασία  $T = 298 \text{ K}$ , η πυκνότητα του αέρα είναι  $\rho \approx 1.2 \text{ kg m}^{-3}$  και η ταχύτητα του ήχου είναι  $v \approx 346 \text{ m s}^{-1}$ . Οπότε,  $P_{0,\text{αναφοράς}} \approx 28.8 \text{ } \mu\text{Pa}$ . Θεωρούμε όμως  $P_{0,\text{αναφοράς}} \approx 20 \text{ } \mu\text{Pa}$ .

Με βάση τα παραπάνω, λόγω της Εξ. 1.14, η σχέση που δίνει τη στάθμη έντασης του ήχου,

μετασχηματίζεται στη σχέση, που δίνει τη στάθμη πίεσης του ήχου ως εξής:

$$IL(\text{dB}) = 10 \log \left( \frac{I_1}{I_{\text{αναφοράς}}} \right) = 10 \log \left( \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{P_{0,1}^2}{\rho v_{\text{ήχου}}}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{P_{0,\text{αναφοράς}}^2}{\rho v_{\text{ήχου}}}} \right) \implies \quad (1.15)$$

$$SPL(\text{dB}) = 20 \cdot \log \left( \frac{P_{0,1}}{P_{0,\text{αναφοράς}}} \right). \quad (1.16)$$

Για ένα τρέχον (ή αλλιώς καλούμενο, οδεύον) κύμα οι προκύπτουσες αριθμητικές τιμές από τις σχέσεις για την IL και την SPL είναι ταυτόσημες και τα IL και SPL αντιπροσωπεύουν ένα και το αυτό μέγεθος. Στην περίπτωση όμως των στάσιμων κυμάτων, επειδή δεν υπάρχει ροή της ενέργειας, δεν μπορεί να προσδιοριστεί η ένταση του ήχου, οπότε η IL χάνει το νόημα της.

### 1.3 Υποκειμενικά μεγέθη του ήχου

Τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου έχουν να κάνουν με τον τρόπο που εμείς και το ακουστικό μας σύστημα αντιλαμβανόμαστε τα ηχητικά σήματα. Δεν ταυτίζονται με τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά, τα οποία αναφέραμε πιο πάνω, και αυτό συμβαίνει επειδή το ανθρώπινο αυτί παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία στις διάφορες ακουστές συχνότητες. Τα πιο βασικά υποκειμενικά χαρακτηριστικά ενός ηχητικού σήματος είναι **α) το τονικό ύψος β) η ακουστότητα και γ) η χροιά**. Κάθε ένα από αυτά συνδέεται με ένα αντίστοιχο αντικειμενικό μέγεθος του ήχου.

**Το ύψος** (pitch) εξαρτάται από τη συχνότητα της δόνησης του σώματος, δηλαδή από τον αριθμό των δονήσεων ανά δευτερόλεπτο. Όσο πιο μεγάλη είναι η συχνότητα ενός ήχου, τόσο πιο οξύς ακούγεται ένας ήχος, ενώ όταν έχουμε λιγότερες ταλαντώσεις στην ίδια μονάδα του χρόνου, τόσο πιο βαρύς ή μπάσος ακούγεται ένας ήχος.

**Η ακουστότητα** (loudness) σχετίζεται με την ένταση ενός ηχητικού σήματος και εμείς αντιλαμβανόμαστε έναν ήχο ως πιο δυνατό όταν έχει μεγάλη ένταση και έναν ήχο ως πιο αδύναμο όταν αντίστοιχα η έντασή του είναι μικρή.

**Η χροιά** (timbre) συνδέεται με την κυματομορφή του ηχητικού σήματος και είναι αυτό που μας κάνει να είμαστε σε θέση να προσδιορίζουμε τη διαφορά στο χρώμα ενός ίδιου τονικά φθόγγου, ο οποίος παίζεται από διαφορετικά όργανα ή φωνές. Με λίγα λόγια η χροιά μας βοηθά να καταλάβουμε αν αυτό που ακούμε είναι κιθάρα, βιολί ή πιάνο ακόμα κι αν παίζουν την ίδια νότα σε ένταση και ύψος.

### 1.3.1 Ακουστότητα (Loudness)

Η ακουστότητα είναι ένα ψυχοφυσικό μέγεθος, το οποίο χαρακτηρίζει τους σύνθετους ήχους, όπως η ένταση τους απλούς ημιτονοειδείς. Έχει σχέση με το πόσο έντονα (δυνατά) ακούγεται ένα ερέθισμα, δηλαδή χαρακτηρίζει το ποσοτικό αίσθημα της ακοής, το οποίο προκαλεί ένας ήχος στον άνθρωπο. Η ακουστότητα εξαρτάται από τη συχνότητα και τη στάθμη έντασης του ηχητικού σήματος και, ως ψυχοφυσικό μέγεθος, στηρίζεται σε υποκειμενικά κριτήρια. Ως μονάδα μετρήσεως της ακουστότητας χρησιμοποιείται το sone, το οποίο είναι μία γραμμική μονάδα. Ως 1 sone ορίζεται η ακουστότητα ήχου τον οποίο αντιλαμβάνεται ένας άνθρωπος, όταν ακούει έναν ήχο συχνότητας 1000 Hz και στάθμη πίεσης 40 dB SPL.

### 1.3.2 Στάθμη Ακουστότητας (Loudness Level)

Η στάθμη ακουστότητας ορίζεται με παρόμοιο τρόπο, όπως ορίστηκαν οι στάθμες έντασης και πίεσης ενός ηχητικού κύματος στην προηγούμενη ενότητα. Σαν πρότυπος τόνος για τη στάθμη ακουστότητας, χρησιμοποιείται ένα ημιτονοειδές σήμα με συχνότητα 1000 Hz, καθώς η συχνότητα αυτή βρίσκεται κοντά στην περιοχή της μεγάλης ευαισθησίας του αυτιού μας.

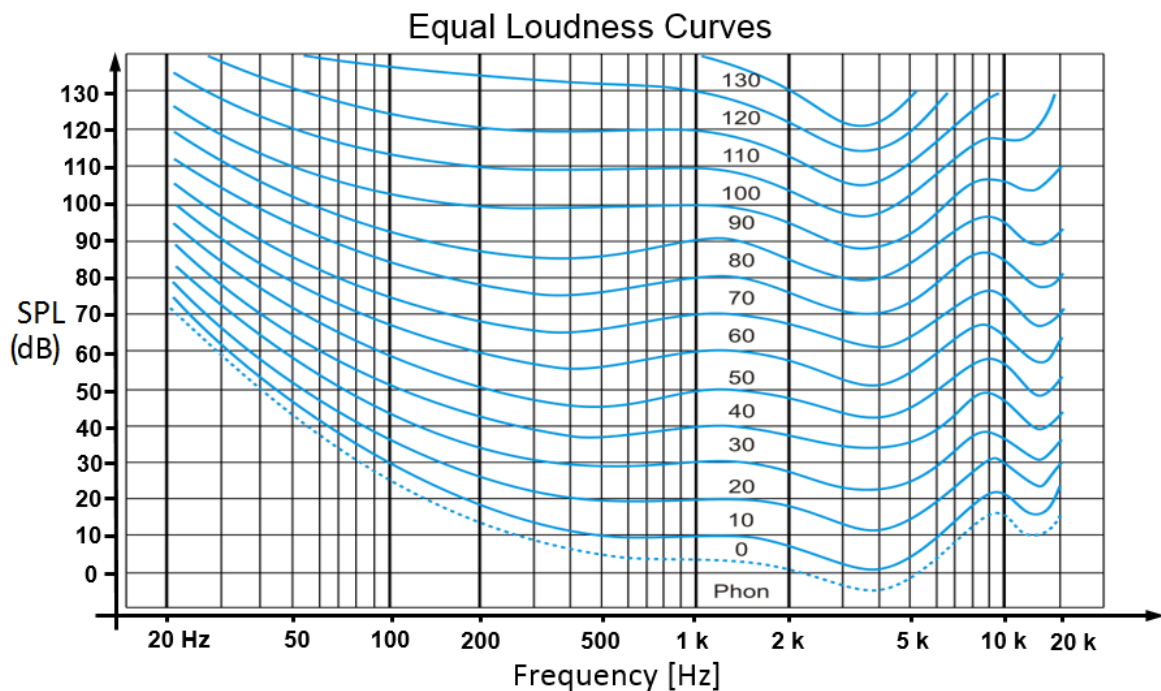
Το ανθρώπινο αυτί παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία σε ήχους διαφορετικής συχνότητας. Έτσι, ενώ δύο διαφορετικοί τόνοι μπορεί να προκαλούν την ίδια πίεση στο αυτί, ψυχοακουστικά μπορεί να γίνουν αντιληπτοί με διαφορετική ακουστότητα. Για το λόγο αυτό έχει δημιουργηθεί μία μονάδα λογαριθμικής κλίμακας για τη μέτρηση του επιπέδου ακουστότητας των απλών τόνων και των σύνθετων ήχων, το phon. Σκοπός αυτής της μονάδας είναι να παρέχει μία λογαριθμική κλίμακα όπως είναι αυτή των decibels για το μέγεθος του ήχου που αντιλαμβανόμαστε. Το phon είναι αντίστοιχο με το SPL σε decibels ενός απλού τόνου 1000 Hz. Έτσι το επίπεδο ακουστότητας σε phon ενός ήχου είναι το SPL ενός απλού τόνου με συχνότητα 1000 Hz, ο οποίος θεωρείται από τον μέσο άνθρωπο ότι έχει την ίδια ακουστότητα. Για παράδειγμα αν ένας ήχος γίνεται αντιληπτός με ένταση ισοδύναμη με αυτή ενός ήχου 1000 Hz με SPL των 50 dB, τότε έχει ακουστότητα 50 phons, ανεξάρτητα από τις φυσικές του ιδιότητες.

Η μονάδα phon δεν είναι μία διεθνής μονάδα SI στην μετρολογία και έχει οριστεί σαν μονάδα του επιπέδου ακουστότητας από την American National Standards Institute.

#### 1.3.2.1 Διάγραμμα ισοακουστικών καμπυλών

Το 1933 οι H. Fletcher και W. A. Munson [3], [4], πραγματοποίησαν ψυχοακουστικά πειράματα για τη μέτρηση της ακουστότητας και την απόκριση του ανθρώπου στις διαφορετικές συχνότητες, στο ιστορικό άρθρο με τίτλο Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation. Για να καθορίσουν τη μορφή της αναπαραστούσας την ακουστότητα συναρτήσεως έκαναν μετρήσεις

των επιπέδων ακουστότητας πολλών απλών τόνων αλλά και συνθέτων κυματομορφών. Για κάθε συχνότητα και τιμή έντασης, τα άτομα-αχροατές, άκουγαν και έναν ήχο αναφοράς με συχνότητα 1000 Hz και κατόπιν ρύθμιζαν την ένταση του πρότυπου ήχου, ώστε να ακουγόταν σε αυτούς το ίδιο δυνατά με τον ήχο του πειράματος. Από τα πειράματα αυτά, προέκυψαν οι ισοακουστικές καμπύλες, δηλαδή οι καμπύλες οι οποίες δείχνουν την απαιτούμενη στάθμη πίεσης SPL σε κάθε συχνότητα ώστε να μπορεί ο ήχος να γίνεται αντιληπτός με μία συγκεκριμένη στάθμη ακουστότητας [2]. Με αυτόν τον τρόπο κατάφεραν να χαρτογραφήσουν την SPL απλών τόνων σε σχέση με το επίπεδο ακουστότητας, το οποίο αντιλαμβανόμαστε σε phons.



**Εικόνα 1.5** Διάγραμμα ισοακουστικών καμπυλών, το οποίο δείχνει το απαιτούμενο SPL σε κάθε συχνότητα ώστε να μπορεί να γίνεται αντιληπτός ένας ήχος από τον άνθρωπο με μία συγκεκριμένη στάθμη ακουστότητας. Η πιο χαμηλή από αυτές (διακεκομμένη γραμμή) αντιστοιχεί στο κατώφλι της ακουστότητας του ανθρώπου, δηλαδή στο ελάχιστο SPL συναρτήσει της συχνότητας το οποίο πρέπει να έχει ένας ήχος ώστε να γίνει αντιληπτός. Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί στην ίδια στάθμη ακουστότητας, όπως την αντιλαμβάνεται ο μέσος άνθρωπος. Η μεγαλύτερη ευαισθησία του ακουστικού μας συστήματος είναι στην περιοχή των 3000 με 4000 Hz, όπου και έχουμε τις μικρότερες τιμές SPL.

Πηγή: [www.acousticlab.org](http://www.acousticlab.org).

Η πιο χαμηλή από τις ισοακουστικές καμπύλες, η οποία περνά από τη συχνότητα των 1000 Hz και από τα 0 dB (και στα phons) της στάθμης έντασης, αντιστοιχεί στο κατώφλι ακουστότητας, ενώ η υψηλή η αντιστοιχούσα στα 120 phons, αντιπροσωπεύει το κατώφλι του πόνου (ο ακροατής αισθάνεται δυσφορία και πόνο). Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η ανθρώπινη αντίληψη παρουσιάζει διαφορές στην απόκριση και στην ευαισθησία σε κάθε συχνότητα. Οι καμπύλες ίσης ακουστότητας επανακαθορίστηκαν αργότερα από τους D. W. Robinson και R. S. Dadson [5] για απλούς τόνους.



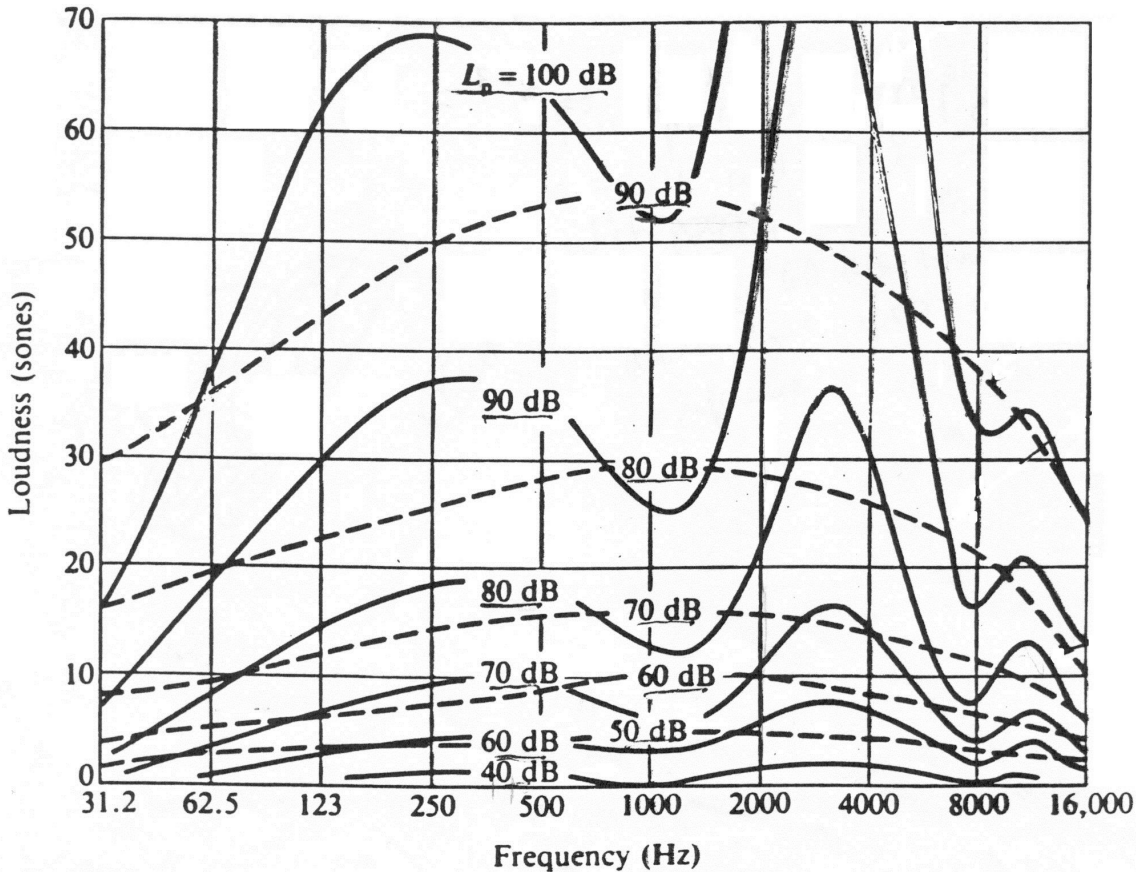
Μεταγενέστερες μετρήσεις διαμόρφωσαν περαιτέρω τις καμπύλες και εν τέλει καταλήξαμε στη δημιουργία του ISO 226 Standard [6].

### Παρατηρήσεις επάνω στο διάγραμμα ισοακουστικών καμπυλών

- **Ανταπόκριση ανθρώπινου αυτιού σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες.** Στις χαμηλές συχνότητες το αυτί είναι λιγότερο ευαίσθητο. Για παράδειγμα στα 50 Hz η στάθμη πίεσης του ήχου πρέπει να είναι 40 decibels για να γίνει αντιληπτός ο ήχος. Τα αυτιά μας έχουν αναπτύξει αυτή τη χαμηλοσυχνοτική μη ευαισθησία στους ήχους, έτσι ώστε να μην ενοχλούνται από εσωτερικούς ήχους όπως αυτούς της καρδιάς, της πίεσης του αίματος και άλλους. Για ήχους συχνοτήτων πάνω από 1000 Hz, το κατώφλι ακουστότητας πέφτει αρκετά δείχνοντας έτσι ότι η ευαισθησία του αυτιού αυξάνεται αρκετά σε αυτή την περιοχή με το μέγιστο να βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ 3000 και 4000 Herz [7]. Η μέγιστη ευαισθησία του αυτιού σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων οφείλεται στο γεγονός ότι το αυτί μας συμπεριφέρεται σαν ένας σωλήνας με δύο άκρα, εκ των οποίων το ένα είναι ανοιχτό και το άλλο είναι κλειστό και στο σύστημα των τριών οστών στο μεσαίο αυτί. Ένα τέτοιο σύστημα έχει συχνότητες διέγερσης (ιδιοσυχνότητες) σε αυτό το διάστημα συχνοτήτων και επομένως θα χρειάζεται την ελάχιστη ενέργεια για να διεγερθεί σε αυτές τις συνθήκες [8].
- **Αρνητική τιμή στάθμης έντασης.** Παρατηρούμε ότι στην καμπύλη κατωφλίου ακουστότητας, στην περιοχή συχνοτήτων 2000 με 6000 Hz, οι τιμές της στάθμης έντασης είναι αρνητικές για όλες αυτές τις συχνότητες. Αυτό συμβαίνει, επειδή το αυτί μπορεί να διεγερθεί με τιμή έντασης μικρότερη από την ένταση αναφοράς  $I_0 = 10^{-12} \left(\frac{W}{m^2}\right)$ , η οποία χρειάζεται για συχνότητα 1000 Hz. Για παράδειγμα για συχνότητα 4000 Hz, η στάθμη έντασης του ήχου για να διεγερθεί το αυτί, είναι -7 dB SPL [2].
- **Όριο της ακοής (όριο πόνου).** Η ισοακουστική καμπύλη των 120 phon αντιστοιχεί στο όριο της ανθρώπινης ακοής, καθώς ένας ήχος με μεγαλύτερη τιμή στάθμης ακουστότητας από αυτή, προκαλεί αίσθημα πόνου και ενόχλησης στον ακροατή.
- **Σχέση έντασης και ακουστότητας.** Επειδή η μονάδα της στάθμης ακουστότητας phon, ορίστηκε με βάση τη στάθμη έντασης ημιτονοειδούς ήχου συχνότητας 1000 Hz, τότε όσα είναι τα dB SPL ενός ημιτονοειδούς ήχου 1000 Hz, τόσα είναι αντίστοιχα και τα phon της στάθμης ακουστότητας αυτού. Για παράδειγμα ένας ήχος συχνότητας 1000 Hz και στάθμης έντασης 80 dB SPL, θα έχει αντίστοιχα και στάθμη ακουστότητας 80 phon και αντίστροφα. Για ήχους διαφορετικής συχνότητας, όταν θα γνωρίζουμε τη στάθμη έντασής τους και θα ζητάμε να βρούμε τη στάθμη ακουστότητας τους, τότε θα χρησιμοποιούμε το διάγραμμα ισοακουστικών καμπυλών, παραδοσιακά καλούμενο διάγραμμα Fletcher-Munson αν και έχει γίνει τροποποιήσεις στο αρχικό λόγω μεταγενέστερων μετρήσεων.

Αντίστοιχα μπορούμε να δούμε, πώς αλλάζει η αντίληψη της ακουστότητας ενός ήχου, όταν αλλάζουμε τη συχνότητά του, αλλά αφήνουμε την στάθμη πίεσής του σταθερή [2]. Το αποτέλεσμα αυτών των μετρήσεων μας δίνει το παρακάτω διάγραμμα:





**Εικόνα 1.6** Διάγραμμα ισοβαρών καμπυλών για διαφορετικές συχνότητες, το οποίο απεικονίζει τις καμπύλες για τις οποίες η πίεση του ήχου είναι ίδια, άρα και η SPL είναι σταθερή, για διαφορετικές τιμές συχνότητων και ακουστότητας. Οι συνεχείς καμπύλες αντιστοιχούν σε απλούς τόνους, ενώ οι διακεκομμένες σε σύνθετους μουσικούς ήχους με 5 αρμονικές. Πηγή: [knilt.arcc.albany.edu](http://knilt.arcc.albany.edu).

Η αντίληψη των μεταβολών της ακουστότητας ενός ήχου ο οποίος έχει μια συγκεκριμένη σταθερή τιμή SPL, διαφέρει όταν η τιμή της πίεσης είναι υψηλή και όταν είναι χαμηλή. Για παράδειγμα, η μεταβολή της ακουστότητας για την περιοχή συχνότητων μεταξύ 1000 και 3000 Hz είναι μόνο 4 sones, όταν το αυτί διεγείρεται από έναν ήχο με τιμή πλάτους πίεσης 1000 φορές πιο πάνω από την τιμή αναφοράς, δηλαδή  $SPL = 60$  dB. Αντίθετα η μεταβολή της ακουστότητας είναι πολύ μεγαλύτερη στην ίδια περιοχή συχνότητων, κατά 64 sones, όταν η στάθμη πίεσης είναι στα 90 SPL.

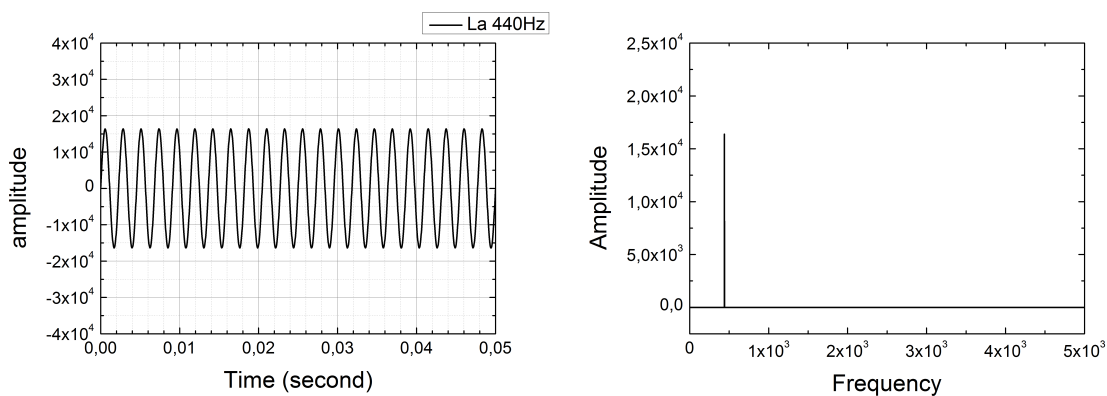
---

## Κεφάλαιο 2

# Απλοί τόνοι και η υπέρθεσή τους

### 2.1 Απλός τόνος και χαρακτηριστικά του

Όταν λέμε απλός τόνος, εννοούμε τον ήχο που όταν φτάνει στο αυτί μας, προκαλεί αρμονική ταλάντωση στο ακουστικό τύμπανο με σταθερά χαρακτηριστικά: συχνότητα, πλάτος ταλάντωσης και φάση [8]. Πάντως για τη φυσική, απλός τόνος σημαίνει πως πρόκειται για ημιτονοειδή συνάρτηση, δηλαδή μίας μόνο συχνότητας. Ένας απλός τόνος φαίνεται στην Εικόνα 2.1.



**Εικόνα 2.1** Κυματομορφή απλού αρμονικού ήχου συχνότητας 440 Hz, δημιουργημένη με το λογισμικό Audacity (αριστερά) καθώς και το φάσμα του (δεξιά), προκύπτουν όταν κάνουμε σε αυτήν ανάλυση Fourier. Η συχνότητα του ημιτονοειδούς κύματος αντιστοιχεί στη νότα ΛΑ 4. Όπως είναι αναμενόμενο, στο φάσμα του σήματος έχουμε μία μόνο γραμμή, η οποία και αντιστοιχεί στη μοναδική συχνότητα από την οποία αποτελείται ο ήχος. Αν είχαμε σύνθετο ήχο με αρμονικές, τότε θα υπήρχαν περισσότερες από μία κορυφές.

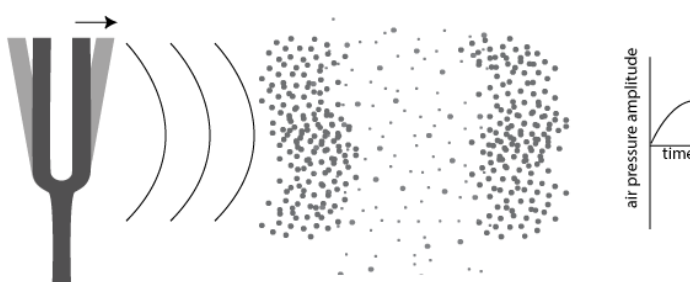
Ένας τέτοιος ήχος περιγράφεται από την εξίσωση:

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

όπου  $A$  είναι το πλάτος του κύματος,  $k$  ο κυματαριθμός του,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , και  $\omega$  η κυκλική συχνότητα του κύματος,  $\omega = 2\pi f$ . Η ποσότητα  $\phi = kx - \omega t$  ονομάζεται φάση, είναι γωνία, αδιάστατη, και τη μετράμε σε ακτίνια. Η φυσική της σημασία είναι ότι δυο σημεία επάνω στο κύμα τα οποία διαφέρουν κατά ένα μήκος κύματος, διαφέρουν κατά φάση  $\Delta\phi = 2\pi$ .

Επομένως οι απλοί τόνοι χαρακτηρίζονται από μία συχνότητα (μονοσυχνοτικοί), σταθερό πλάτος ταλάντωσης και φάση και το περιεχόμενό τους δεν περιλαμβάνει και άλλες συχνότητες, τις λεγόμενες αρμονικές, οι οποίες προκύπτουν από επιμέρους αραιώσεις και πυκνώσεις του αέρα πέρα από τις προερχόμενες από την κύρια συχνότητα. Οι απλοί τόνοι έχουν μαλακό και λίγο αδιάφορο για τα μουσικά δεδομένα ήχο. Στη φύση όλοι σχεδόν οι ήχοι που παράγονται είναι σύνθετοι και περιέχουν πολλούς αρμονικούς ήχους. Ο μόνος τρόπος για να τους δημιουργήσουμε, με πολύ μεγάλη προσέγγιση, είναι με κάποιο λογισμικό διαθέτον γεννήτρια τέτοιων ήχων.

Το διαπασών, Εικόνα 2.2, είναι το μόνο ηχητικό σύστημα, του οποίου οι ήχοι και το σήμα προσεγγίζουν αρκετά εκείνα ενός απλού τόνου. Ο κύριος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται το διχαλωτό σχήμα (Υ) είναι ότι, σε αντίθεση με πολλούς άλλους τύπους ηχητικών αντικειμένων, παράγει ένα πολύ καθαρό ήχο, με το μεγαλύτερο μέρος της δονητικής ενέργειας στη θεμελιώδη συχνότητα και με αρκετά μικρότερο στους απόηχους (αρμονικούς). Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι ότι η συχνότητα του πρώτου απόηχου είναι περίπου  $52/22 = 25/4 = 6\frac{1}{4}$  φορές η θεμελιώδης (περίπου  $2\frac{1}{2}$  οκτάβες πάνω από αυτή). Επομένως το φάσμα του ήχου, που παράγει ένα διαπασών προσεγγίζει αρκετά αυτό της Εικόνας 2.1. Αυτά αναφέρονται στο κλασικό πια βιβλίο του J. Tyndall [9], [10].



**Εικόνα 2.2** Το διαπασών και η κίνηση που προκαλεί στη μάζα αέρα, που βρίσκεται γύρω του. Πηγή: [physics.stackexchange.com](http://physics.stackexchange.com).

Επειδή παράγει αυτό τον καθαρό ήχο, είναι εύκολο να συντονίσει άλλα όργανα και για αυτό χρησιμοποιείται από ορισμένες ορχήστρες για το κούρδισμα των οργάνων σε μία κοινή συχνότητα. Επί του παρόντος, τα πιο κοινά διαπασών παράγουν ένα ημιτονοειδές ήχο συχνότητας  $A = 440$

Hz. Ανάλογα με το μήκος των ράβδων που έχει ένα διαπασών παράγει και ένα ημιτονοειδές σήμα διαφορετικής συχνότητας με συχνότητες από 64 Hz - 4096 Hz. Έτσι διαφορετικά διαπασών, χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στη νευρολογία ή την κλινική ωτολογία για την εξέταση των αυτιών.

## 2.2 Υπέρθεση δύο απλών τόνων

### 2.2.1 Υπέρθεση δύο τρεχόντων κυμάτων απλών τόνων με διαφορετικές συχνότητες και ίδιο πλάτος

Έστω δύο ηχητικά κύματα με κυματαριθμούς  $k_1$  και  $k_2$ , συχνότητες  $f_1$  και  $f_2$ , ίδιο πλάτος  $A$  και αρχικές φάσεις  $\phi_1$  και  $\phi_2$ , αντιστοίχως. Η χρονικά εξαρτώμενη μεταβολή της μετατόπισης για το κάθε ένα περιγράφεται από τις σχέσεις

$$y_1(x, t) = A \cos(k_1 x - \omega_1 t + \phi_1) \quad \text{και} \quad y_2(x, t) = A \cos(k_2 x - \omega_2 t + \phi_2), \quad (2.2)$$

αντιστοίχως. Αντικαθιστώντας την γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  με τη συχνότητα θα πάρουμε τις σχέσεις

$$y_1(x, t) = A \cos(k_1 x - 2\pi f_1 t + \phi_1) \quad \text{και} \quad y_2(x, t) = A \cos(k_2 x - 2\pi f_2 t + \phi_2). \quad (2.3)$$

Το αποτέλεσμα της υπέρθεσης αυτών των δύο κυμάτων θα είναι

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) = A [\cos(k_1 x - 2\pi f_1 t + \phi_1) + \cos(k_2 x - 2\pi f_2 t + \phi_2)]. \quad (2.4)$$

Με τη χρήση της τριγωνομετρικής ταυτότητας

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \left( \frac{\alpha - \beta}{2} \right) \cos \left( \frac{\alpha + \beta}{2} \right), \quad (2.5)$$

μπορούμε να γράψουμε

$$y(x, t) = 2A \cos \left( \frac{(k_1 + k_2)x + (\phi_1 + \phi_2) - 2\pi(f_1 + f_2)t}{2} \right) \cos \left( \frac{(k_1 - k_2)x + (\phi_1 - \phi_2) - 2\pi(f_1 - f_2)t}{2} \right). \quad (2.6)$$

Εάν ορίσουμε

$$\omega' = \pi(f_1 - f_2), \quad (2.7)$$

$$\omega = \pi(f_1 + f_2), \quad (2.8)$$

$$k = \frac{k_1 + k_2}{2}, \quad (2.9)$$

$$k' = \frac{k_1 - k_2}{2}, \quad (2.10)$$

$$\phi = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}, \quad (2.11)$$

$$\phi' = \frac{\phi_1 - \phi_2}{2}, \quad (2.12)$$

τότε

$$y(x, t) = 2A \cos(kx - \omega t + \phi) \cos(k'x - \omega't + \phi'), \quad (2.13)$$

η οποία είναι εξίσωση δύο συσχετιζομένων κυμάτων εκ των οποίων το ένα λειτουργεί σαν περιβάλλουσα για το άλλο. Το κύμα με κυματαριθμό  $k$  και γωνιακή συχνότητα  $\omega$  έχει συχνότητα  $f = \frac{f_1+f_2}{2}$ , ενώ το κύμα με κυματαριθμό  $k'$  και γωνιακή συχνότητα  $\omega'$  έχει συχνότητα  $f' = \frac{f_1-f_2}{2}$ , δηλαδή μικρότερη από το προηγούμενο. Τα δύο κύματα εξελίσσονται με διαφορετικές συχνότητες και έτσι τα πλάτη τους μεταβάλλονται διαφορετικά στο ίδιο χρονικό διάστημα. Το κύμα με συχνότητα  $f$  μεταβάλλεται πιο γρήγορα, ενώ το κύμα με συχνότητα  $f'$  μεταβάλλεται πιο αργά και αποτελεί την περιβάλλουσα του πρώτου. Ανάλογα με τη σχετική φάση των απομακρύνσεων των κυμάτων  $y_1$  και  $y_2$ , μεταβάλλεται και το πλάτος της συνάρτησης  $y(x, t)$ .

### 2.2.2 Διφωνία: Υπέρθωση δύο απλών τόνων με διαφορετικές συχνότητες στο ίδιο σημείο του χώρου

Ας απορροφήσουμε τα χωρικά κομμάτια στις αρχικές φάσεις  $\phi_1$  και  $\phi_2$ . Ας υποθέσουμε πως οι απλοί τόνοι  $y_1$  και  $y_2$ , με συχνότητες και περιόδους  $f_1 = 1/T_1$  και  $f_2 = 1/T_2$ , συνθέτουν τη διφωνία  $y$ . Τότε μπορούμε να γράψουμε

$$y_1 = A_1 \sin(\phi_1 + \frac{2\pi}{T_1}t), \quad (2.14)$$

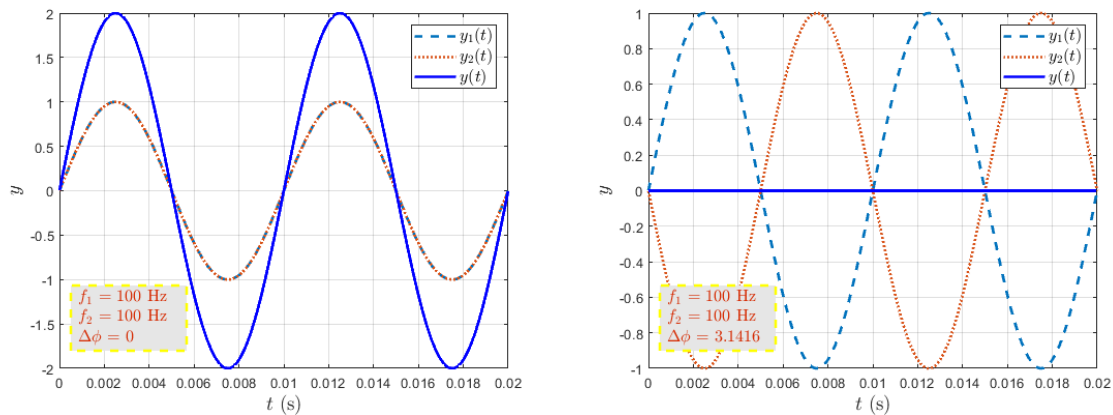
$$y_2 = A_2 \sin(\phi_2 + \frac{2\pi}{T_2}t), \quad (2.15)$$

$$y = y_1 + y_2 \quad (2.16)$$

Η τυμπανική μεμβράνη είναι έτσι σχεδιασμένη, ώστε όταν προσπίπτει σε αυτή κάποιο κύμα, ταλαντώνεται μέσα-έξω σύμφωνα με τη συχνότητα του ηχητικού κύματος. Εάν ένα κύμα έχει συγκεκριμένο πλάτος και συγκεκριμένη συχνότητα, τότε εμείς αντιλαμβανόμαστε έναν ήχο με συγκεκριμένη ένταση και τονικό ύψος, αντίστοιχα. Τώρα, όταν δύο τέτοιοι ήχοι με διαφορετικές συχνότητες ο καθένας και διαφορετικά πλάτη διεγείρουν ταυτόχρονα το τύμπανο, τότε αυτό αντιδρά σαν να εκτελεί δύο διαφορετικές εντολές την ίδια χρονική στιγμή, οι οποίες δίνονται από τον κάθε ήχο. Η κίνηση, που προκύπτει είναι το άθροισμα των ξεχωριστών ταλαντώσεων, που θα εκτελούσε η μεμβράνη, εάν δρούσε σε αυτή κάθε ήχος ξεχωριστά. Αυτό αποκαλείται γραμμική υπέρθεση δύο ταλαντώσεων [8].

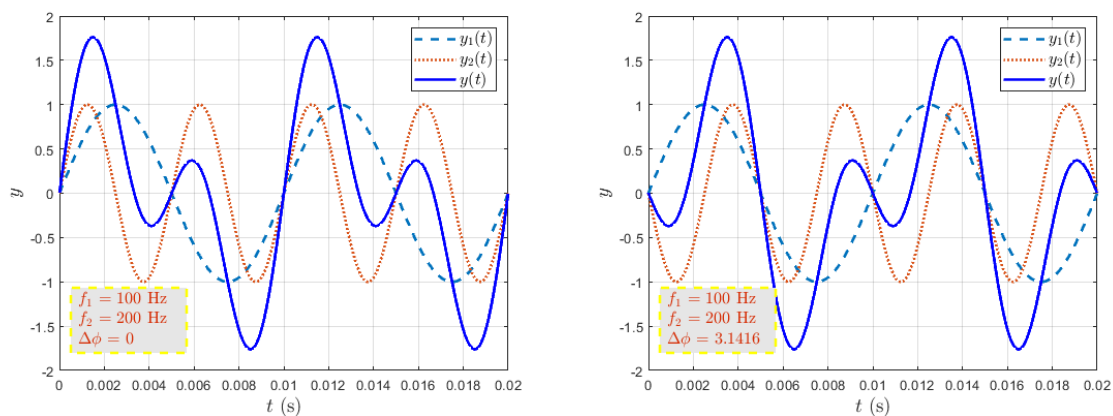
Στην περίπτωση που έχουμε ίσες συχνότητες, ίσα πλάτη και ίσες αρχικές φάσεις, το συνισταμένο κύμα έχει διπλάσιο πλάτος από τα συνιστώντα, άρα και η ακουστότητά του θα είναι τετραπλάσια από αυτά. Στην περίπτωση που έχουμε ίσες συχνότητες, ίσα πλάτη και αρχική διαφορά φάσεως  $\pi$ , το συνισταμένο κύμα έχει μηδενικό πλάτος. Αυτά απεικονίζονται στην Εικόνα 2.3.

Μία χαρακτηριστικά απλή υπέρθεση δύο απλών τόνων φαίνεται στην Εικόνα 2.4. Οι τόνοι έχουν



**Εικόνα 2.3** Διφωνία ίδιων τόνων με διαφορά φάσεως 0 (αριστερά),  $\pi$  (δεξιά).

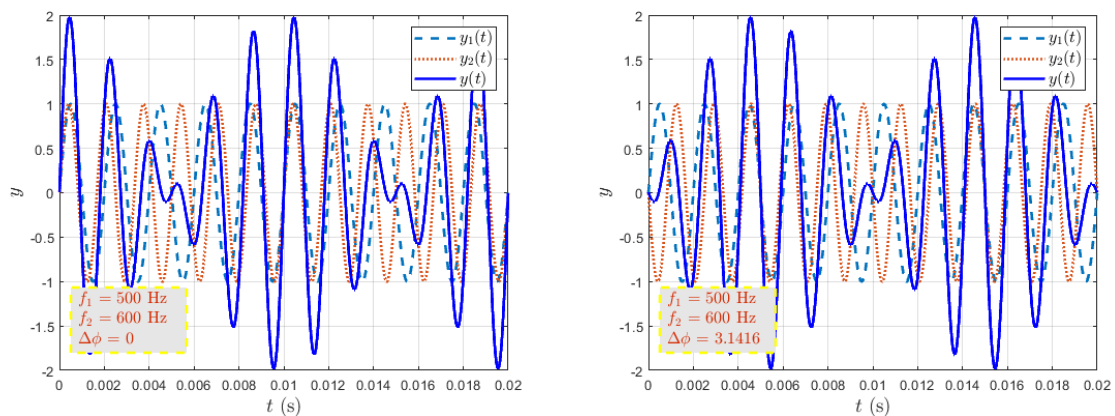
συχνότητες  $f_1 = 100 \text{ Hz}$  και  $f_2 = 200 \text{ Hz}$ , δηλαδή λόγο συχνοτήτων 2/1. Μια τέτοια διφωνία αντιστοιχεί στο μουσικό διάστημα, το οποίο ονομάζουμε οκτάβα. Στο χρόνο μιας περιόδου η κυματομορφή του πρώτου τόνου κάνει 1 πλήρη κίνηση, ενώ του δεύτερου 2 πλήρεις κινήσεις. Η κυματομορφή που προκύπτει από την υπέρθεσή τους είναι και αυτή μία περιοδική συνάρτηση, με περίοδο ίδια με τη μεγαλύτερη των δύο συνιστωσών περιόδων, δηλαδή των δύο επιμέρους τόνων.



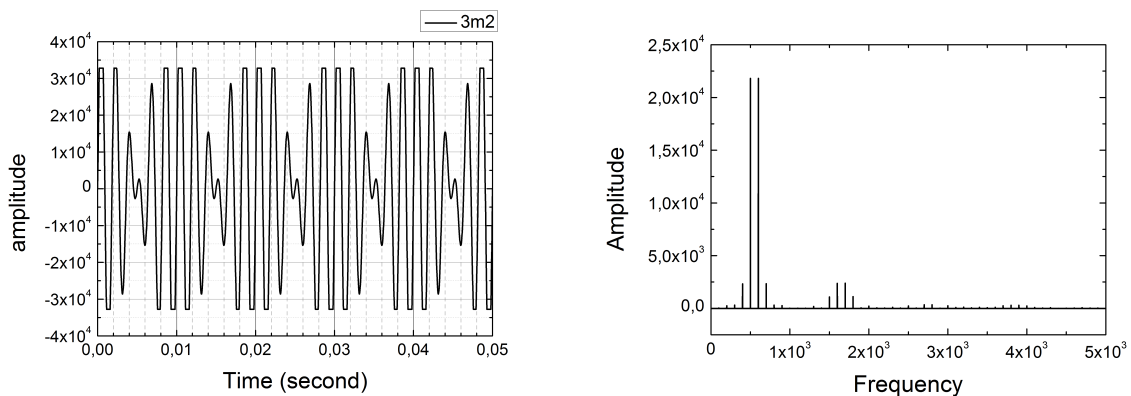
**Εικόνα 2.4** Διφωνία δύο απλών τόνων συχνότητας  $f_1 = 100 \text{ Hz}$  και  $f_2 = 200 \text{ Hz}$ , δηλαδή με λόγο συχνοτήτων 2/1. Επομένως στο χρόνο μιας περιόδου η κυματομορφή του πρώτου τόνου κάνει 1 πλήρη κίνηση, ενώ του δεύτερου 2 πλήρεις κινήσεις. Αντιστοιχεί στη γνωστή μας οκτάβα. Η προκύπτουσα από την υπέρθεσή των απλών τόνων κυματομορφή (διφωνία) είναι και αυτή περιοδική συνάρτηση, με περίοδο ίση με τη μεγαλύτερη των δύο συνιστωσών περιόδων. Αριστερά με διαφορά φάσεως 0 και δεξιά με διαφορά φάσεως  $\pi$ .

Στην Εικόνα 2.5 απεικονίζεται μια διφωνία, κάποια από τις μικρές τρίτες, η οποία χρησιμοποιήθηκε στο πείραμά μας. Οι δύο τόνοι έχουν συχνότητες  $f_1 = 500 \text{ Hz}$  και  $f_2 = 600 \text{ Hz}$  και λόγο συχνοτήτων 6/5. Στο χρόνο μιας περιόδου η κυματομορφή του πρώτου τόνου κάνει 5 πλήρεις κινήσεις, ενώ του δεύτερου 6 πλήρεις κινήσεις. Μετά, στην Εικόνα 2.6 φαίνεται η κυματομορφή της

διφωνίας και ο μετασχηματισμός Fourier της κυματομορφής. Στο μετασχηματισμό Fourier παρατηρούμε ότι εκτός από τις δύο κορυφές των συχνοτήτων των δύο τόνων, προκύπτουν και άλλες πολύ μικρότερου πλάτους. Αυτό οφείλεται στο ότι η κυματομορφή είναι πεπερασμένου πλάτους και όχι απείρου και επομένως δεν θα προκύψουν δύο συναρτήσεις δέλτα, όπως θα περιμέναμε στην ιδανική περίπτωση. Ένας ακόμη λόγος της ύπαρξης αυτών των κορυφών είναι και πιθανός θόρυβος, που προκύπτει από το ίδιο το Audacity.



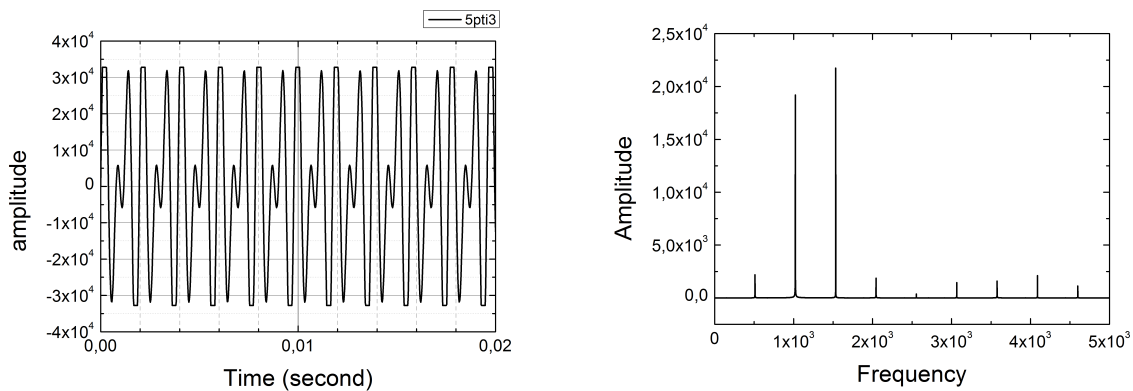
**Εικόνα 2.5** Διφωνία δύο απλών τόνων με συχνότητες  $f_1 = 500 \text{ Hz}$  και  $f_2 = 600 \text{ Hz}$ , δηλαδή με λόγο συχνοτήτων  $6/5$ . Στο χρόνο μιας περιόδου η κυματομορφή του πρώτου τόνου κάνει 5 πλήρεις κινήσεις, ενώ του δεύτερου 6 πλήρεις κινήσεις. Η διφωνία αυτή αντιστοιχεί στο μουσικό διάστημα 3ης μικρής. Αριστερά με διαφορά φάσεως 0 και δεξιά με διαφορά φάσεως  $\pi$ .



**Εικόνα 2.6** Αριστερά: Η κυματομορφή της υπέρθεσης δύο τόνων με συχνότητες  $f_1 = 500 \text{ Hz}$  και  $f_2 = 600 \text{ Hz}$  της Εικόνας 2.5, αντιστοιχούσα σε μουσικό διάστημα 3ης μικρής. Δεξιά: Το αντίστοιχο φάσμα Fourier.

Παρόμοια διαγράμματα ακολουθούν για δύο ακόμα διφωνίες του πειράματος, μια πέμπτη (την 5ti3) και μία οκτάβα (την 8va1). Δείτε το Παράρτημα Α'.

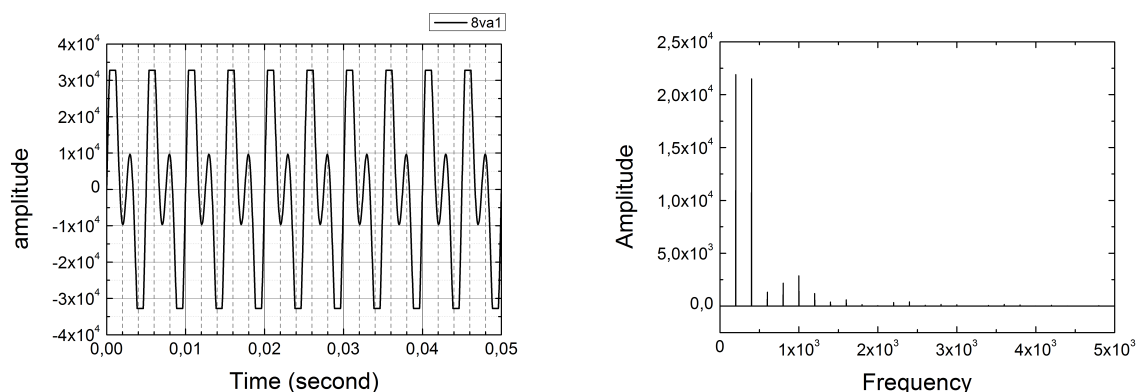
Οι συχνότητες των τόνων που απαρτίζουν τη διφωνία 5ti3 είναι  $f_1 = 1022 \text{ Hz}$  και  $f_2 = 1533 \text{ Hz}$  και ο λόγος των δύο συχνοτήτων είναι  $3/2$ . Επομένως, στο χρόνο μιας περιόδου η κυματομορφή του πρώτου τόνου της διφωνίας κάνει 2 πλήρεις κινήσεις, ενώ του δεύτερου 3 πλήρεις κινήσεις. Στο φάσμα που προκύπτει από την ανάλυση Fourier βλέπουμε δύο μεγάλες κορυφές στις συχνότητες των δύο τόνων της διφωνίας, αλλά και κάποιες σε άλλες συχνότητες με πολύ μικρότερο πλάτος. Αυτές οι τελευταίες οφείλονται στην πεπερασμένη διάρκεια του σήματος.



**Εικόνα 2.7** Κυματομορφή της διφωνίας 5ti3 του πειράματος (αριστερά) και του φάσματός Fourier της (δεξιά). Οι συχνότητες των τόνων της διφωνίας είναι  $f_1 = 1022 \text{ Hz}$  και  $f_2 = 1533 \text{ Hz}$  και ο λόγος τους  $3/2$ . Επομένως, στο χρόνο μιας περιόδου η κυματομορφή του πρώτου τόνου κάνει 2 πλήρεις κινήσεις, ενώ του δεύτερου 3 πλήρεις κινήσεις. Και εδώ στο φάσμα δεξιά λόγω της μικρής διάρκειας των ήχων (2 s) έχουμε και άλλες κορυφές που εμφανίζονται και οι οποίες οφείλονται στο πεπερασμένο σήμα της διφωνίας.

Η διφωνία 8va1 περιέχει τους τόνους  $f_1 = 200 \text{ Hz}$  και  $f_2 = 400 \text{ Hz}$ . Δηλαδή, ο ένας έχει διπλάσια συχνότητα από τον άλλον για αυτό και ο λόγος συχνοτήτων τους είναι  $2/1$ . Έτσι ο τόνος με τη διπλάσια συχνότητα στο χρόνο μιας περιόδου κάνει δύο πλήρεις κινήσεις, ενώ ο άλλος κάνει μία πλήρη κίνηση. Στο φάσμα Fourier οι κορυφές που αντιστοιχούν σε αυτές τις συχνότητες έχουν μεγάλο πλάτος, ενώ πάλι προκύπτουν κάποιες κορυφές πολύ μικρότερου πλάτους από αυτές των συχνοτήτων της διφωνίας, το οποίο σημαίνει και ότι γίνονται πολύ λιγότερο αντιληπτές από τον ακροατή.





**Εικόνα 2.8** Κυματομορφή της διφωνίας *8va1* του πειράματος (αριστερά) και το φάσμα *Fourier* της (δεξιά). Οι επιμέρους τόνοι της διφωνίας έχουν συχνότητες  $f_1 = 200 \text{ Hz}$  και  $f_2 = 400 \text{ Hz}$  και λόγο συχνοτήτων  $2/1$ . Επομένως, στο χρόνο που ο ένας τόνος έχει κάνει μια πλήρη κίνηση, ο άλλος (με τη μεγαλύτερη συχνότητα), θα έχει κάνει 2 πλήρεις κινήσεις.

Στο Παράρτημα **B'** παρατίθενται μία διφωνία από κάθε μία από τις 15 κατηγορίες των διφωνιών, που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμά μας, με την κυματομορφή της και το αντίστοιχο φάσμα από την ανάλυση *Fourier*, που προκύπτει από αυτήν.

### 2.2.3 Περίπτωση υπέρθεσης 2 απλών τόνων με πολύ κοντινές συχνότητες

Υποθέτουμε τώρα ότι οι γωνιακές συχνότητες  $\omega_1$  και  $\omega_2$  των συνδυαζόμενων κυμάτων είναι σχεδόν ίσες, το οποίο σημαίνει ότι  $\omega \gg \omega'$ . Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν, που οι συχνότητες των συνημιτονειδών ήχων είναι σχεδόν ίδιες, έχουμε τη δημιουργία αυτού, που ονομάζεται στη φυσική και την ακουστική διακρότημα.

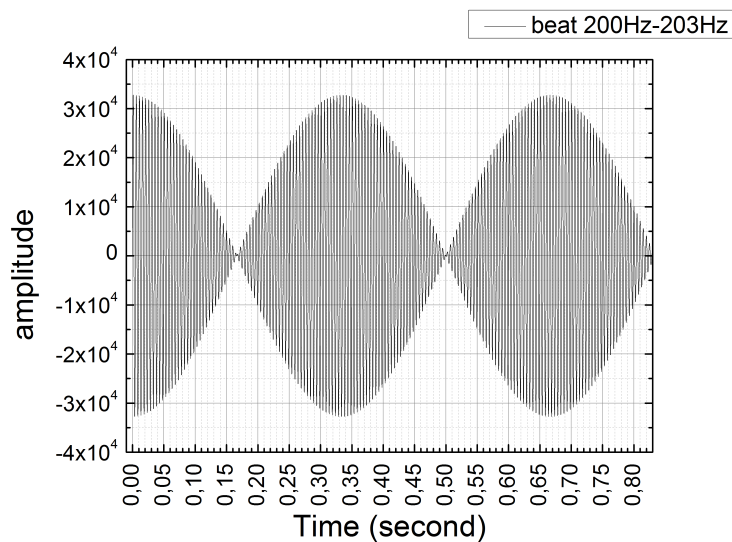
Μπορούμε τότε να θεωρήσουμε την εξίσωση 2.13 σαν συνάρτηση συνημιτόνου της οποίας η γωνιακή συχνότητα είναι  $\omega$  και της οποίας το πλάτος (το οποίο δεν είναι σταθερό, αλλά μεταβάλλεται με γωνιακή συχνότητα  $\omega'$ ) είναι η απόλυτη τιμή της ποσότητας στις αγκύλες. Μέγιστο πλάτος θα έχουμε οποτεδήποτε το  $\omega't$  θα έχει την τιμή  $+1$  ή  $-1$  στην εξίσωση 2.13. Αυτό συμβαίνει δύο φορές σε κάθε επανάληψη της συνάρτησης συνημιτόνου. Επειδή το  $\cos(\omega't)$  έχει γωνιακή συχνότητα  $\omega'$ , η γωνιακή συχνότητα  $\omega_{\text{beat}}$  με την οποία εμφανίζονται τα διακροτήματα είναι  $\omega_{\text{beat}} = 2\omega'$ . Τότε με τη βοήθεια των σχέσεων, όπου ορίσαμε τα  $\omega$  και  $\omega'$  παραπάνω, μπορούμε να γράψουμε

$$\omega_{\text{beat}} = 2\omega' = (2)\left(\frac{1}{2}\right)(\omega_1 - \omega_2)$$

Επειδή  $\omega = 2\pi f$ , η παραπάνω σχέση αναδιαμορφώνεται ως

$$f_{\text{beat}} = f_1 - f_2, \quad (2.17)$$

η οποία μας δίνει τη συχνότητα του διακροτήματος. Η κυματομορφή που προκύπτει φαίνεται στην Εικόνα 2.9 στην περίπτωση που έχουμε συμβαλλόμενα κύματα με συχνότητες  $f_1 = 200$  Hz και  $f_2 = 203$  Hz.

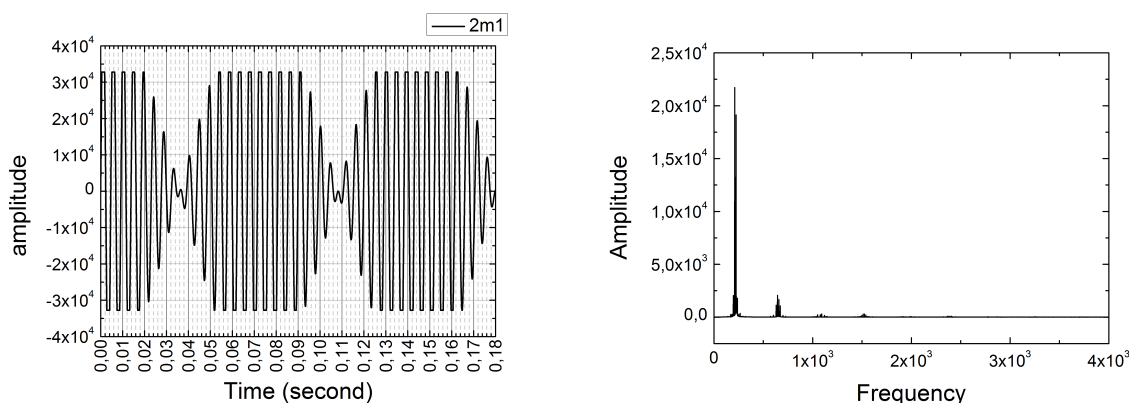


**Εικόνα 2.9** Κυματοσυνάρτηση ενός διακροτήματος με συχνότητες επιμέρους τόνων  $f_1 = 200$  Hz και  $f_2 = 203$  Hz. Ο ακροατής παρατηρεί μια περιοδική εναλλαγή μεταξύ αύξησης και μείωσης της έντασης του ήχου. Στην αύξηση τα μέγιστα των δύο κυματομορφών συμπίπτουν, ενώ στην απουσία ήχου συμπίπτει το μέγιστο πλάτος της κυματομορφής του ενός ήχου με το ελάχιστο πλάτος του άλλου. Ο ρυθμός με τον οποίον γίνεται αυτή η εναλλαγή από το μέγιστο στο ελάχιστο ονομάζεται συχνότητα διακροτήματος και είναι ίση με τη διαφορά των συχνοτήτων των δύο κυμάτων. Για παράδειγμα όταν έχουμε συχνότητες 200 Hz και 203 Hz, τότε η συχνότητα του διακροτήματος θα είναι 3 Hz. Επομένως μικρή συχνότητα η οποία επιτρέπει στο αυτί να αντιληφθεί τις αυξομειώσεις του πλάτους του ήχου.

Σαν αποτέλεσμα της υπέρθεσης αυτών των κυμάτων ο ακροατής παρατηρεί μια περιοδική εναλλαγή μεταξύ αύξησης και μείωσης της έντασης του ήχου. Στην αύξηση τα μέγιστα των δύο κυματομορφών συμπίπτουν, ενώ στην απουσία ήχου συμπίπτει το μέγιστο πλάτος της κυματομορφής του ενός ήχου με το ελάχιστο πλάτος του άλλου. Ο ρυθμός με τον οποίον γίνεται αυτή η εναλλαγή από το μέγιστο στο ελάχιστο ονομάζεται συχνότητα διακροτήματος και είναι ίση με τη διαφορά των συχνοτήτων των δύο κυμάτων. Για παράδειγμα όταν έχουμε συχνότητες 200Hz και 203Hz, τότε η συχνότητα του διακροτήματος θα είναι  $203-200=3$ Hz.

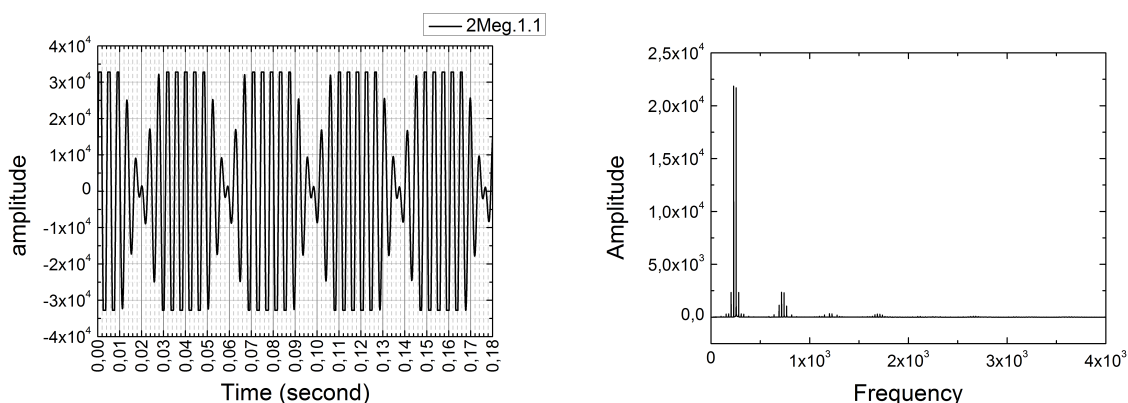
Όταν έχουμε αργά διακροτήματα, δηλαδή όταν οι συχνότητες των συμβαλλόμενων κυμάτων είναι πολύ κοντινές, το φαινόμενο της αυξομείωσης του ήχου είναι έντονο αρκετά. Αντίθετα, όταν αυξάνεται η διαφορά μεταξύ των συχνοτήτων των δύο ημιτονοειδών σημάτων, τότε το φαινόμενο εξασθενεί και δεν παρατηρούμε τόση έντονη διαφορά στην ακουστότητα του ήχου. Για συχνότητες που διαφέρουν από 5 έως 15 Hz οι επιμέρους μεταβολές της ακουστότητας είναι πολύ γρήγορες για να ακουστούν και να γίνουν αντιληπτές από το αυτί και έτσι εξομαλύνονται [11].

Επομένως εκτός από τη διαφορά συχνοτήτων που έχουν τα δύο επιμέρους κύματα του διακροτήματος, σημαντικό ρόλο στην ηχητική του αίσθηση από τον ακροατή παίζουν και τα πλάτη τους. Στην περίπτωση που τα συμβαλλόμενα σήματα έχουν μεγάλο πλάτος, το διακρότημα που δημιουργείται έχει πιο έντονη αίσθηση, παρά όταν έχουν μικρό σχετικά πλάτος. Αυτό συμβαίνει επειδή η διαφορά του μέγιστου πλάτους του σύνθετου ήχου από το ελάχιστο είναι πολύ μεγαλύτερη. Αυτό όμως δεν ισχύει τόσο στην περιοχή του κατωφλίου, καθώς εκεί το αυτί παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία [11]. Η ίδια διαφοροποίηση στην ηχητική αίσθηση από τον ακροατή υπάρχει στην περίπτωση που έχουμε δύο κύματα με ίδιο πλάτος, οπότε και το μέγιστο πλάτος του σύνθετου κύματος θα είναι διπλάσιο και στην περίπτωση που το πλάτος του ενός κύματος είναι μεγαλύτερο από του άλλου, οπότε και το μέγιστο πλάτος θα είναι μικρότερο από το διπλάσιο.



**Εικόνα 2.10** Διαγράμματα της διφωνίας 2m1 του πειράματος, η οποία είναι και αυτή με τη μικρότερη διαφορά στις συχνότητες των τόνων που την αποτελούν. Οι συχνότητες των τόνων της είναι  $f_1 = 210$  Hz και  $f_2 = 223.86$  Hz, δηλαδή η διαφορά μεταξύ τους είναι:  $\Delta f = 13.86$  Hz. Αυτή είναι και η συχνότητα του διακροτήματος με την οποία το μέγιστο και το ελάχιστο πλάτος εναλλάσσονται και έχουμε την αντίστοιχη αυξομείωση του ήχου.

Στο σχήμα 2.10 έχουμε δημιουργήσει την κυματομορφή της διφωνίας 2m1 του πειράματος, η οποία είναι και αυτή με τη μικρότερη διαφορά στις συχνότητες των τόνων που την αποτελούν. Οι συχνότητες των τόνων της είναι  $f_1 = 210$  Hz και  $f_2 = 223.86$  Hz, δηλαδή η διαφορά μεταξύ τους είναι:  $\Delta f = 13.86$  Hz. Αυτή είναι και η συχνότητα του διακροτήματος, που δημιουργεί η υπέρθεσή τους, με την οποία εναλλάσσεται το μέγιστο και το ελάχιστο πλάτος του και έτσι έχουμε την αντίστοιχη αυξομείωση του ήχου. Η διφωνία που έχει την αμέσως μεγαλύτερη διαφορά στις συχνότητες, που την αποτελούν είναι η 2Meg.1.1 με συχνότητες τόνων  $f_1 = 230$  Hz και  $f_2 = 255.53$  Hz, της οποίας η κυματομορφή και το φάσμα φαίνονται στο σχήμα 2.11.



**Εικόνα 2.11** Κυματοσυνάρτηση και φάσμα της διφωνίας του πειράματος 2Meg.1.1 με συχνότητες τόνων  $f_1 = 230 \text{ Hz}$  και  $f_2 = 255.53 \text{ Hz}$ . Η διαφορά των συχνοτήτων των τόνων της είναι  $\Delta f = 25.53 \text{ Hz}$ . Επομένως το σύνθετο κύμα, που δημιουργείται έχει πιο γρήγορη εναλλαγή μέγιστου και ελάχιστου πλάτους και δεν δημιουργεί τόσο έντονη ηχητική αίσθηση, όπως το διακρότημα της διφωνίας 2m1.

Γενικά το αυτί μπορεί εύκολα να ακολουθήσει και να αντιληφθεί πλήρως τις διακυμάνσεις του πλάτους ενός αργού διακροτήματος το οποίο έχει 4 με 6 πλήρεις κύκλους/δευτερόλεπτο. Ο ακροατής έχει το χρόνο να συλλάβει όλες τις διαφορετικές φάσεις του κύματος και να έχει επίγνωση αυτών, ενώ μπορεί ακόμα και να τα μετρήσει χωρίς δυσκολία. Όταν όμως το διάστημα της διφωνίας μεγαλώσει και γίνει περίπου ίσο με ένα ημίτονο, ο αριθμός των διακροτημάτων θα αυξηθεί και θα είναι 20-30 το δευτερόλεπτο και έτσι δεν είναι τόσο εύκολο για το αυτί να τα ακολουθήσει, ώστε να μπορεί έτσι κάποιος να τα μετρήσει. Η αίσθηση που δημιουργείται είναι πολύ διαφορετική, από αυτήν προηγουμένως. Τώρα αντιλαμβανόμαστε τη διφωνία σαν μια σειρά από τονικούς παλμούς, παρ' όλα αυτά δεν μπορούμε να διακρίνουμε τον καθένα από αυτούς ξεχωριστά και να τους μετρήσουμε. Εκτός από αυτό ένας τέτοιος ήχος με πολύ γρήγορα διακροτήματα είναι αρκετά ενοχλητικός, καθώς είναι πολύ τραχύς στο άκουσμά του και σκληρός [12]. Η χαρακτηριστική τραχύτητα αυτών των ήχων, τους κάνει να ξεχωρίζουν αμέσως. Ένα κοντινό παράδειγμα ενός τέτοιου ήχου είναι το γράμμα ρ, το οποίο όταν το προφέρουμε για κάποια ώρα, δημιουργεί αυτήν ακριβώς την αίσθηση της τραχύτητας και των ήχων, που βγαίνουν από το στόμα σαν παλμοί με κάποιο σταθερό ρυθμό.

Ο αριθμός των διακροτημάτων ανά δευτερόλεπτο, μπορεί να αυξηθεί χωρίς να μεγαλώσει απαραίτητα το διάστημα της διφωνίας. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε με το να ανεβάσουμε τη συχνότητα των δύο επιμέρους τόνων κατά μία οκτάβα, αυξάνοντας έτσι κάθε μία συχνότητα ξεχωριστά και κατ' επέκταση τις πλήρεις ταλαντώσεις, ανά δευτερόλεπτο, που εκτελεί κάθε τόνος [12]. Όταν η εναλλαγή μεταξύ τραχύτητας και παύσης είναι γρήγορη, τότε εξασθενεί το αίσθημα της αυξομείωσης και αρχίζουμε να αντιλαμβανόμαστε τον ήχο σαν έναν συνεχή ήχο χωρίς διακυμάνσεις στην έντασή του.

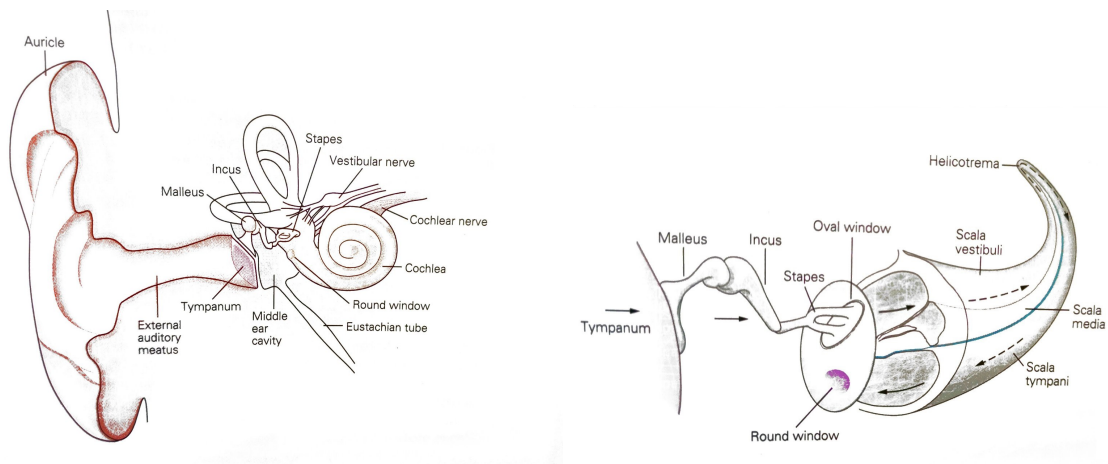
---

## Κεφάλαιο 3

# Το αυτί και η αντίληψη του ήχου

### 3.1 Δομή του αυτιού

Το ανθρώπινο αυτί αποτελείται από τρία μέρη. Το εξωτερικό αυτί το μεσαίο αυτί και το εσωτερικό αυτί. Καθένα από αυτά τα μέρη συμβάλλει με διαφορετικό τρόπο στην ενίσχυση και την επεξεργασία ενός ήχου που έρχεται από το περιβάλλον.



**Εικόνα 3.1** Αριστερά εικόνα του αυτιού, όπου φαίνονται όλα τα μέρη του και δεξιά εικόνα του μεσαίου και του εσωτερικού αυτιού, όπου απεικονίζεται ο κοχλίας τεντωμένος (Πηγή: Kandel-Schwartz-Jessel, *Principles of neural science, fourth edition*, σελ. 591 και 595).

### 3.1.1 Εξωτερικό αυτί

Το εξωτερικό μέρος του αυτιού αποτελείται από το **περύγιο**, το οποίο είναι αυτό που συλλέγει τους ήχους και το **ακουστικό κανάλι** το οποίο ξεκινάει από το περύγιο και καταλήγει στην τυμπανική μεμβράνη. Το περύγιο οδηγεί τους ήχους μέσω του ακουστικού καναλιού στο τύμπανο. Ο ακουστικός πόρος έχει μήκος περίπου 3 εκατοστά και ουσιαστικά μοιάζει με έναν σωλήνα με το ένα άκρο του κλειστό και το άλλο ανοιχτό. Ένας σωλήνας με αυτά τα χαρακτηριστικά έχει θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού, που δίνεται από τη σχέση:  $f = \frac{u}{4L}$  όπου  $f$  η συχνότητα του στάσιμου κύματος που δημιουργείται στο εσωτερικό του ακουστικού πόρου,  $u$  η ταχύτητα του ήχου στον αέρα και  $L$  το μήκος του σωλήνα (εδώ μήκος του ακουστικού πόρου). Αν αντικαταστήσουμε  $u = 330$  m/s και  $L = 2.5 * 10^{-2}$  μ, τότε θα πάρουμε για τη συχνότητα την τιμή  $f = 3300$  Hz. Αυτή είναι και η συχνότητα στην οποία το αυτί παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία [2]. Επειδή οι κλειστοί-ανοιχτοί σωλήνες δίνουν αρμονικούς μόνο περιττής τάξης, ο αμέσως υψηλότερος αρμονικός στον οποίον το αυτί συντονίζεται, είναι ο τρίτος που αντιστοιχεί σε συχνότητα τριπλάσια της θεμελιώδους, δηλαδή περίπου στα 9900 Hz.

### 3.1.2 Μεσαίο αυτί

Είναι μια μικρή κοιλότητα των οστών του κρανίου, η οποία ξεκινάει μετά την τυμπανική μεμβράνη και αποτελείται από τρία οστά: τη **σφύρα**, τον **άκμωνα** και τον **αναβολέα**. Η κοιλότητα αυτή είναι γεμάτη αέρα, όπως και το εξωτερικό αυτί, και στο μέσα της άκρο έχει δύο μεμβράνες, που φράσσουν την ωοειδή και την στρογγυλή θυρίδα αντίστοιχα.

Τα οστά σχηματίζουν ένα σύστημα μοχλού, το οποίο συνδέει την τυμπανική μεμβράνη με την ωοειδή θυρίδα. Το σύστημα αυτό περιορίζει το πλάτος της δόνησης του τυμπάνου, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει τη δύναμη της πίεσης στην ωοειδή θυρίδα, με αποτέλεσμα να ενισχύεται η δόνηση μέχρι να φτάσει στη μέσα άκρο του αυτιού. Έτσι μια μικρή δύναμη που δρα από μεγάλη απόσταση στη μία άκρη του συστήματος, δημιουργεί μια μεγάλη δύναμη που δρα από μικρή απόσταση στην άλλη άκρη του συστήματος. Αυτό είναι σημαντικό, διότι στην περίπτωση που έχουμε ήχους πολύ μεγάλης έντασης, η κίνηση της ωοειδούς θυρίδας μειώνεται αισθητά σε σχέση με αυτή του τυμπάνου, με αποτέλεσμα να προστατεύεται το αυτί από βλάβες που μπορεί να πάθει, λόγω της μεταφερόμενης υψηλής ενέργειας [7].

Όπως αναφέραμε το μεσαίο αυτί είναι γεμάτο αέρα, ενώ στο εσωτερικό της ωοειδούς θυρίδας υπάρχει υγρό. Έτσι το σύστημα των οστών διευκολύνει τη μεταφορά ισχύος από τον αέρα που είναι ελαφρύς και συμπιεστός, στο υγρό μέσο που είναι βαρύ και ασυμπιεστό. Αυτό συμβαίνει, επειδή η επιφάνεια του τυμπάνου είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή της ωοειδούς μεμβράνης και έτσι, όταν εφαρμόσουμε την ίδια δύναμη επάνω σε αυτές να έχουμε αύξηση της πίεσης του κύματος.

Η αύξηση της πίεσης του διαδιδόμενου κύματος εκτιμάται με τον παρακάτω τρόπο, αν αγνο-

ήσουμε τις τριβές [2]. Το εμβαδόν της τυμπανικής μεμβράνης είναι περίπου  $56 \text{ mm}^2$ , από τα οποία τα  $50 \text{ mm}^2$  ακουμπούν με τη σφύρα. Επομένως, η πίεση που δέχεται η τυμπανική μεμβράνη,  $P_{\text{τυμπ}}$ , και η δύναμη επάνω στη σφύρα,  $F_{\text{σφ}}$ , συνδέονται με τη σχέση

$$F_{\text{σφ}} = 50 \text{ mm}^2 P_{\text{τυμπ}}. \quad (3.1)$$

Η μηχανική απολαβή του μοχλού, σύμφωνα με μελέτες, έχει εκτιμηθεί ότι είναι περίπου 1.3 που σημαίνει ότι η δύναμη,  $F_{\text{αν}}$ , επάνω στον αναβολέα είναι 1.3 φορές μεγαλύτερη της  $F_{\text{σφ}}$ . Επομένως,

$$P_{\text{τυμπ}} = \frac{F_{\text{σφ}}}{50 \text{ mm}^2} = \frac{F_{\text{αν}}}{1.3 \times 50 \text{ mm}^2} = \frac{F_{\text{αν}}}{65 \text{ mm}^2}. \quad (3.2)$$

Το εμβαδόν επαφής του αναβολέα επάνω στην ωσειδή θυρίδα είναι περίπου  $3 \text{ mm}^2$ . Έτσι η πίεση επάνω στην ωσειδή θυρίδα είναι

$$P_{\omega\sigma} = \frac{F_{\text{αν}}}{3}. \quad (3.3)$$

Επομένως, η ενίσχυση της πίεσης του ηχητικού σήματος από την τυμπανική μεμβράνη μέχρι την ωσειδή θυρίδα, δηλαδή από το ένα άκρο του μεσαίου αυτιού μέχρι το άλλο, είναι

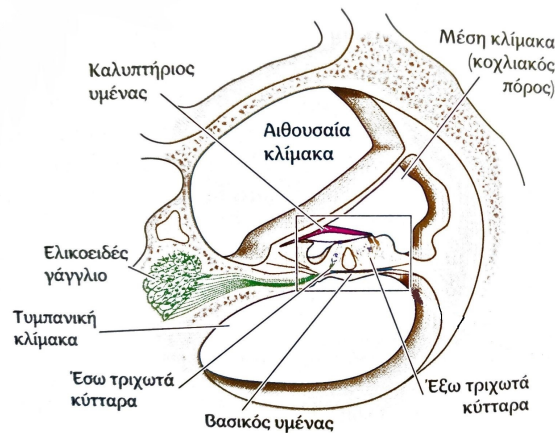
$$\frac{P_{\omega\sigma}}{P_{\text{τυμπ}}} = \frac{\frac{F_{\text{αν}}}{3}}{\frac{F_{\text{αν}}}{65}} = 21.7 \quad (3.4)$$

Από ότι αναφέρεται στο [2] οι πειραματικές τιμές της ενίσχυσης της πίεσης έχουν τιμή 17, οπότε είναι κοντά μεταξύ τους.

### 3.1.3 Εσωτερικό αυτί

Το μέρος του εσωτερικού αυτιού που σχετίζεται με την ακοή είναι ο κοχλίας. Ο κοχλίας έχει τη μορφή του σαλιγκαριού εξωτερικά, ενώ εσωτερικά είναι χωρισμένος στη μέση σε δύο μέρη, μέσω μιας μεμβράνης που λέγεται **βασικός υμένας** ή βασική μεμβράνη. Στο άνω μέρος έχει δύο κοιλότητες: την αιθουσαία κλίμακα και τον κοχλιακό πόρο, ενώ κάτω από τον υμένα βρίσκεται η τυμπανική μεμβράνη. Η αιθουσαία κλίμακα χωρίζεται από τον κοχλιακό πόρο μέσω μίας μεμβράνης, η οποία λέγεται υμένας Reissner. Δείτε την Εικόνα 3.2.





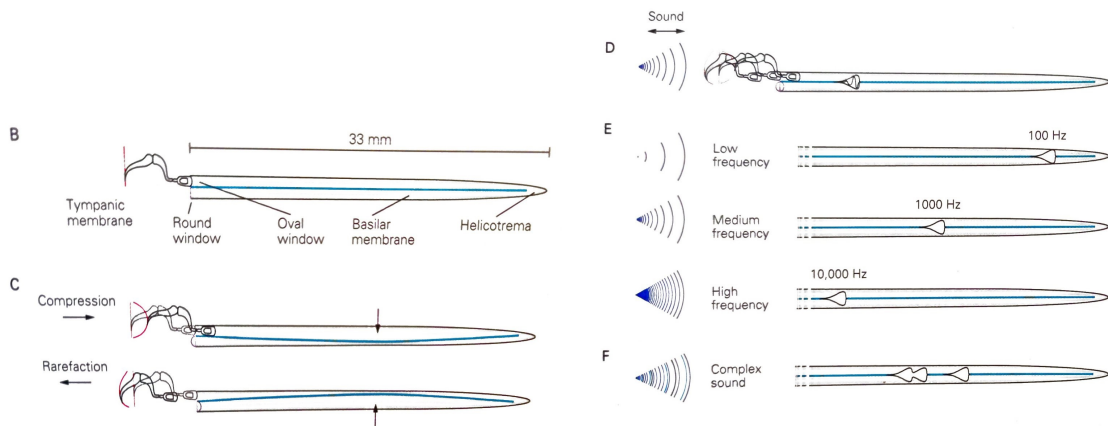
**Εικόνα 3.2** Διατομή του κοχλίου (Πηγή: Dale Purves, *Η μουσική ως βιολογία - Οι ήχοι που μας αρέσουν και γιατί* (2017), σελ.18).

Ολόκληρος ο κοχλίας είναι γεμάτος με υγρό κινούμενο ανάλογα με την ενέργεια που έχει το ηχητικό κύμα. Αρχικά μετακινείται ο αναβολέας και λόγω αυτού η ωσειδής μεμβράνη προς τα μέσα, με αποτέλεσμα να μετατοπίζεται το υγρό της αιθουσαίας κλίμακας και να δημιουργείται ένα κύμα με κατεύθυνση την κορυφή του κοχλίου. Αυτό αναγκάζει μια μεμβράνη που βρίσκεται στην αρχή της τυμπανικής κλίμακας, τη στρογγυλή θυρίδα, να μετακινηθεί προς τα έξω, καθώς τα υγρά του κοχλίου είναι ασυμπίεστα. Στη συνέχεια οι ηχητικές δονήσεις μεταβιβάζονται μέσω του υμένα Reissner στον κοχλιακό πόρο και από εκεί προχωράνε στο βασικό υμένα, όπου και προκαλούν την μετακίνησή του, ανάλογα με τη συχνότητα του κύματος [2]. Επάνω στο βασικό υμένα βρίσκεται το όργανο του Corti, το οποίο μετασχηματίζει τη μηχανική ενέργεια των υγρών του κοχλίου σε ηλεκτρικά σήματα.

### 3.1.3.1 Η ανταπόκριση του βασικού υμένα στις διαφορετικές συχνότητες

Ο βασικός υμένας είναι το πιο ευαίσθητο όργανο στις δονήσεις των λαβυρινθιακών υγρών. Αν θεωρήσουμε ότι έχει το ίδιο πάχος σε όλη την έκτασή του, τότε μία μεταβαλλόμενη πίεση αέρα θα προκαλούσε την ίδια απομάκρυνση όλων των σημείων του από τη θέση ισορροπίας τους. Αυτό συμβαίνει στον υμένα κάποιων ερπετών και των πουλιών. Στον υμένα των θηλαστικών, και κατ'επέκταση των ανθρώπων, οι ιδιότητές του αλλάζουν κατά μήκος του. Βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι δεν είναι ομοιόμορφος, αλλά το άνω του άκρο είναι 5 φορές πιο πλατύ από τη βάση του και είναι σχετικά λεπτός και εύκαμπτος στην κορυφή του κοχλίου και παχύς και δύσκαμπτος στη βάση του [7]. Επειδή ακριβώς οι ιδιότητές του διαφέρουν κατά μήκος του, ο βασικός υμένας δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σαν μια χορδή, όπως αυτή ενός οργάνου, αλλά περισσότερο μοιάζει με δέσμη χορδών με πολλά και διαφορετικά πάχη μεταξύ τους.





**Εικόνα 3.3** Ο βασικός υμένας του κοχλίας και η απόκρισή του σε διαφορετικές περιπτώσεις όταν διαδίδεται κατά μήκος του κάποιο ηχητικό κύμα. (B) Ο κοχλίας ξεδιπλωμένος, όπου φαίνονται όλα του τα μέρη. (C) Η κίνηση που προκαλείται στον βασικό υμένα ανάλογα με την κίνηση του αναβολέα επάνω στην ωσειδή θυρίδα. (D) Η διάδοση ενός αρμονικού κύματος κατά μήκος του βασικού υμένα, όπου φαίνεται και η μεταβολή του πλάτους του. (E) Το μέγιστο ενός οδεύοντος κύματος στο βασικό υμένα είναι σε διαφορετικό σημείο του κάθε φορά, ανάλογα με τη συχνότητα της διέγερσης. Για υψηλές συχνότητες το μέγιστο του κύματος βρίσκεται στη βάση του κοχλίας, ενώ αντίθετα για πολύ χαμηλές συχνότητες το μέγιστο του οδεύοντος κύματος βρίσκεται στην κορυφή του κοχλίας. Έτσι οι ενδιάμεσες συχνότητες απλώνονται λογαριθμικά κατά μήκος του βασικού υμένα δημιουργώντας έναν τοπογραφικό χάρτη των συχνοτήτων. (F) Η λειτουργία του βασικού υμένα είναι κατά τον Helmholtz αντίθετη αυτής του πιάνου. Ενώ το πιάνο συνθέτει έναν πολύπλοκο ήχο με το να συνδυάζει τους απλούς τόνους που παράγονται από πολλές διαφορετικές ταλαντώσεις των χορδών του, ο κοχλίας κάνει ακριβώς το αντίθετο. Αναλύει κάθε απλό τόνο που υπάρχει σε έναν σύνθετο ήχο και περιορίζει τη δράση του σε ένα συγκεκριμένο σημείο του βασικού υμένα. (Πηγή: Kandel-Schwartz-Jessel, *Principles of neural science*, fourth edition, σελ. 595).

Όπως περιγράφεται στον [13] κάθε διέγερση με έναν απλό ήχο, προκαλεί μια σύνθετη και ήπια κίνηση του υμένα. Σε κάθε χρονική στιγμή μετά από μία πλήρη κίνηση του ήχου, κάθε σημείο του υμένα έχει ολοκληρώσει κι αυτό μια πλήρη κίνηση. Τα διάφορα σημεία του όμως, δεν κινούνται συμφασικά, αλλά με διαφορετικές φάσεις μεταξύ τους. Κατά συνέπεια κάποια μέρη του κινούνται προς τα πάνω, ενώ ταυτόχρονα κάποια άλλα κινούνται προς τα κάτω. Η κίνηση του βασικού υμένα μοιάζει με ένα οδεύον κύμα, του οποίου το μέγιστο είναι σε διαφορετικό σημείο κάθε φορά, ανάλογα με τη συχνότητα της διέγερσης [7]. Ένα κύμα που διατρέχει τον υμένα φτάνει στη μέγιστη απομάκρυνση σε κάποιο σημείο ανάλογα με τη συχνότητα και μετά φθίνει πολύ γρήγορα σε ύψος όσο ανεβαίνει στον κοχλίας προς τα πάνω. Για υψηλές συχνότητες το μέγιστο του κύματος βρίσκεται πολύ κοντά στην ωσειδή θυρίδα, δηλαδή στη βάση του κοχλίας, ενώ αντίθετα για πολύ χαμηλές συχνότητες το μέγιστο του οδεύοντος κύματος βρίσκεται στην κορυφή του κοχλίας κοντά στο ελικότρημα. Η απόσταση μεταξύ του μεγίστου του κύματος και του ελικοτρήματος είναι περίπου ανάλογη με το λογάριθμο της συχνότητας.

Το μεγαλύτερο πλάτος και η ακαμψία του υμένα στην ωσειδή θυρίδα του επιτρέπει να αποκρίνεται σε υψηλότερες συχνότητες, ενώ η πιο εύκαμπτη περιοχή προς την κορυφή του κοχλίου αποκρίνεται σε χαμηλότερες συχνότητες. Η αντίληψη της ακουστότητας ενεργοποιείται από το πλάτος της κορυφής (ή των κορυφών) του οδεύοντος κύματος κατά μήκος του υμένα. Η αίσθηση του τονικού ύψους, που σχετίζεται με τη συχνότητα της ταλάντωσης, καθορίζεται λοιπόν από τη θέση του μεγίστου πάνω στο βασικό υμένα. Πρέπει να υπάρχουν κι άλλοι παράγοντες αφού για ήχους πολύ κοντινούς συχνοτικά, ειδικά στις χαμηλές συχνότητες, η διαφορά στην κίνηση του υμένα δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μετρήσει ως διαφορά στο τονικό ύψος για έναν καλό μουσικό [7].

Η πολυπλοκότητα των μηχανικών ιδιοτήτων του υμένα σχετίζεται και με το ότι ο υμένας των θηλαστικών είναι κουρδισμένος κατά αυξανόμενη σειρά συχνοτήτων σε όλο το μήκος του [13]. Όπως είπαμε πριν η κορυφή του κοχλίου έχει την καλύτερη ανταπόκριση στις χαμηλότερες συχνότητες, που μπορούμε να ακούσουμε (περίπου 20 Hz). Αντίθετα η βάση του έχει την καλύτερη ανταπόκριση στις υψηλές συχνότητες του ακουστικού φάσματος (20.000 Hz). Έτσι οι ενδιάμεσες συχνότητες απλώνονται λογαριθμικά κατά μήκος του βασικού υμένα δημιουργώντας έναν τονοτοπικό χάρτη των συχνοτήτων (σχήμα 3.3 (E)). Η θέση του μεγίστου κύμανσης της βασικής μεμβράνης καθορίζει ποιες νευρικές ίνες θα διεγερθούν και έτσι, μέσω του οργάνου του Corti, μεταφέρεται στον εγκέφαλο κωδικοποιημένη η πληροφορία για τη συχνότητα του ήχου. Το πλάτος κύμανσης της βασικής μεμβράνης σχετίζεται με την ένταση του ερεθίσματος.

Ο Helmholtz [12] είχε εκτιμήσει πρώτος, ότι η λειτουργία του βασικού υμένα είναι το αντίθετο από αυτή ενός πιάνου. Ενώ το πιάνο συνθέτει έναν πολύπλοκο ήχο με το να συνδυάζει τους απλούς τόνους που παράγονται από πολλές διαφορετικές ταλαντώσεις των χορδών του, ο κοχλίας κάνει ακριβώς το αντίθετο. Αναλύει κάθε απλό τόνο που υπάρχει σε έναν σύνθετο ήχο και περιορίζει τη δράση του σε ένα συγκεκριμένο σημείο του βασικού υμένα (σχήμα 3.3 (F)).

- **Εξήγηση της αίσθησης που προκαλεί το διακρότημα στον κοχλίο και τα ακουστικά νεύρα του αυτιού.**

Γενικά όταν πολλοί απλοί τόνοι με διαφορετικές συχνότητες διεγείρουν ταυτόχρονα την ακοή, τότε η αίσθηση του ήχου που προκαλεί ο καθένας από αυτούς, παραμένει μη ενοχλητικός, επειδή είναι πιθανόν να επηρεάζονται διαφορετικές ομάδες ακουστικών νεύρων και κατ' επέκταση και στερεοοχρυσών του κοχλίου. Αντίθετα όταν έχουμε δύο ήχους με ίδιες ή πολύ κοντινές συχνότητες, οπότε και επηρεάζονται οι ίδιες νευρικές ίνες, τότε η αίσθηση που προκαλούν στο αυτί δεν είναι σαν αυτή, που θα προέκυπτε από το άθροισμα των ερεθισμάτων που θα προκαλούσε ο καθένας χωριστά, όπως θα περιμέναμε από το νόμο του Ohm αλλά καινούργια και αρκετά περίεργη [12].

Για σώματα τα οποία τίθενται σε εξαναγκασμένη ταλάντωση δύσκολα, όπως για παράδειγμα το διαπασών, οι δύο συχνότητες θα πρέπει να διαφέρουν πολύ λίγο μεταξύ τους, ενώ στην περίπτωση που ένα σώμα τίθεται εύκολα σε εξαναγκασμένη ταλάντωση, η διαφορά των συχνοτήτων μπορεί

να είναι αρκετά μεγαλύτερη και ως εκ τούτου τα διακροτήματα να διαδέχεται το ένα το άλλο με μεγαλύτερο ρυθμό.

Αυτό ισχύει και για τις απολήξεις των τριχωτών κυττάρων των ακουστικών νευρών. Κατά τον Helmholtz οι σήραγγες (arches) του οργάνου του Corti, ίσως είναι έτσι φτιαγμένες, ώστε όταν αλληλεπιδρά με ένα διακρότημα, το οποίο αποτελείται από συχνότητες πολύ κοντινές μεταξύ τους, τότε διεγείρονται περιοχές του υμένα, που επικαλύπτουν η μία την άλλη και τίθενται σε εξαναγκασμένη ταλάντωση την ίδια στιγμή [12]. Αν ισχύει αυτό, τότε η ένταση του ήχου, αυξάνεται και μειώνεται, ανάλογα με το αν τα κύματα συμβάλλουν ή όχι και επομένως αυτή η διακύμανση μεταφέρεται στους στερεοοκροσσούς των ακουστικών νευρών. Σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα της κίνησης των αφίδων του Corti θα πρέπει να θεωρηθεί σαν σύνθεση της κίνησης που θα προκαλούσε ο κάθε ήχος σε αυτές, εάν διαδιδόταν χωριστά. Έτσι, αν η διάδοσή τους γινόταν προς την ίδια ή σε διαφορετική κατεύθυνση, αντίστοιχα τα πλάτη των κυμάτων τους θα συμβάλλονταν, ή θα αναιρούσαν το ένα το άλλο, σύμφωνα με την αλγεβρική πρόσθεση των κυμάτων.

Τα διακροτήματα προκαλούν διακοπτόμενη διέγερση των ίδιων κάθε φορά ιών των ακουστικών νευρών. Ο λόγος, που μία τέτοια διακεκομμένη διέγερση είναι πιο ενοχλητική από μία συνεχή, ή και μία ακόμα πιο έντονη, έχει να κάνει με το πώς αντιδρούν και άλλες κατηγορίες νευρών σε ανάλογες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα τα οπτικά νεύρα [12]. Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα έχει αναλύσει ο Helmholtz [12] στο βιβλίο του *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music*·:

Οποιαδήποτε έντονη διέγερση των νευρών, “νεκρώνει” την ετοιμότητά τους και τα καθιστά λιγότερο ευαίσθητα σε καινούργια ερεθίσματα. Μετά το πρώτο σοκ όμως επανέρχεται η ανταπόκρισή τους και μπορούν ξανά να αντιληφθούν ένα νέο ερέθισμα. Για παράδειγμα τα οπτικά νεύρα του ματιού έχουν μία αρκετά κοντινή συμπεριφορά με αυτή των ακουστικών νευρών. Όταν κοιτάξουμε στον ήλιο απότομα παρατηρούμε, ότι χρειάζεται κάποια δευτερόλεπτα για να επανέλθει η όρασή μας, λόγω του σοκ που παθαίνει το οπτικό νεύρο από τη μεγάλη ποσότητα φωτός, που δέχεται σε μία στιγμή. Λόγω αυτού, αν στραφούμε μακριά από τον ήλιο σε μία ομοιόμορφα φωτισμένη επιφάνεια, όπως ένα άλλο σημείο του ουρανού, τότε σχηματίζεται μία μαύρη κηλίδα στο σημείο του ματιού, που βλέπαμε τον ήλιο. Στη συνέχεια μετά από λίγη ώρα εξαφανίζεται η κηλίδα και επανέρχεται η όραση, οπότε και το φως δεν μας προκαλεί ενόχληση. Η αίσθηση είναι τελείως διαφορετική, όταν το ερέθισμα είναι διακοπτόμενο και όχι συνεχές, όπως για παράδειγμα ένα φως που τρεμοπαίζει από έναν φακό. Επειδή γίνεται με διακοπές, τα οπτικά νεύρα, εν τω μεταξύ, προλαβαίνουν κατά κάποιο τρόπο να ανακτήσουν την ευαισθησία τους και τότε έρχεται το νέο ερέθισμα, του οποίου η αίσθηση γίνεται πιο ενοχλητική, από ότι αν ήταν συνεχές, επειδή τα νεύρα έχουν ανακτήσει την ευαισθησία τους.

Το ίδιο συμβαίνει λοιπόν με τα ακουστικά νεύρα, όταν έχουμε έναν διακοπτόμενο ήχο και όχι έναν συνεχή. Η διέγερση, που προκαλούν, είναι πολύ πιο έντονη και ενοχλητική και αυτό παρατηρείται ακόμα και για ήχους χαμηλής έντασης. Έτσι στην περίπτωση, που η ακουστότητα αυξηθεί η αίσθηση γίνεται πιο τραχιά και ‘βίαιη’ για τα αυτιά.

---

## Κεφάλαιο 4

# Πείραμα και επεξεργασία πειραματικών δεδομένων

### 4.1 Περιγραφή πειράματος και παραμέτρων

Σκοπός του πειράματος είναι μία πρώτη προσέγγιση στις αιτίες για τις οποίες μία διφωνία μπορεί να χαρακτηριστεί ως ευχάριστη ή δυσάρεστη, ή όπως λέμε στη μουσική ως σύμφωνη ή διάφωνη. Με τον όρο διφωνία εννοούμε δύο μονοσυχνοτικούς ή αλλιώς απλούς τόνους, οι οποίοι συνηχούν, δηλαδή ακούγονται ταυτοχρόνως. Δημιουργήσαμε ένα σύνολο διφωνιών, συγκεκριμένα από 6 διφωνίες διαφορετικής μέσης συχνότητας ή αλλιώς τονικού ύψους για κάθε μουσικό διάστημα της δυτικής μουσικής (πράγμα που αντιστοιχεί σε διαφορετικό λόγο συχνοτήτων, από μικρές δευτέρες έως οκτάβες). Ζητήσαμε από ένα σύνολο ανθρώπων να απαντήσει, εάν τους αρέσει το άκουσμά τους ή όχι και με αυτόν τον τρόπο να κατηγοριοποιήσουμε τις διφωνίες σε σύμφωνες ή διάφωνες. Δημιουργήσαμε διφωνίες με μία μόνο συχνότητα και όχι και με αρμονικές συχνότητες, διότι θέλουμε να μελετήσουμε την πιο απλή περίπτωση συνήχησης δύο συχνοτήτων και την ανταπόκριση του αυτιού σε αυτές και να μην συμπεριλάβουμε και αρμονικές συχνότητες, οι οποίες θα επηρέαζαν πιθανόν το αποτέλεσμα και θα καθιστούσαν τη μελέτη πιο πολυπαραμετρική.

#### 4.1.1 Διφωνίες πειραματικού μέρους

Οι διφωνίες που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα, δημιουργήθηκαν με το πρόγραμμα ψηφιακής επεξεργασίας ήχου και ηχογράφησης Audacity και αποθηκεύονταν σε μορφή wav. Καλύπτουν συχνοτικό εύρος από 200 Hz μέχρι 5000 Hz. Επιλέχθηκε αυτή η περιοχή συχνοτήτων, διότι περίπου σε αυτή την περιοχή του ακουστού φάσματος, το ανθρώπινο αυτί παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία και έτσι έχει καλύτερη απόκριση στο εκάστοτε ερέθισμα.

Το υλικό των διφωνιών είναι χωρισμένο σε 15 κατηγορίες, κάθε μία από τις οποίες έχει διαφορετικό λόγο συχνοτήτων μεταξύ των δύο τόνων των αποτελούντων τη διφωνία. Για κάθε τέτοιο λόγο συχνοτήτων, έχουμε δημιουργήσει έξι διφωνίες, οι οποίες καλύπτουν όλο περίπου το επιλεγμένο εύρος συχνοτήτων. Οι διφωνίες έχουν ονομαστεί με βάση το διάστημα που περιέχουν και το αντίστοιχο συχνοτικό ύψος στο οποίο βρίσκονται. Έτσι με τον αριθμό (1) ξεκινάμε από τις πιο χαμηλές συχνότητες και διαδοχικά ανεβαίνουμε όλο και πιο ψηλά σε τονικό ύψος μέχρι τις διφωνίες με τον αριθμό (6) που αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο τονικό ύψος. Φυσικά, για την ακρίβεια, εννοούμε το μέσο τονικό τους ύψος ή αλλιώς τη μέση τους συχνότητα, μια και πρόκειται για διφωνίες. Για παράδειγμα η διφωνία 3m1 αντιστοιχεί σε διάστημα 3ης μικρής, στη χαμηλότερη περιοχή συχνοτήτων της κατηγορίας αυτής, ενώ το διάστημα 8va, αντιστοιχεί σε διάστημα ογδότης στην υψηλότερη περιοχή συχνοτήτων που καλύπτουν οι διφωνίες της οκτάβας. Ο λόγος για τον οποίο είναι έτσι κατανομημένες, είναι διότι θέλουμε αφενός μεν να δούμε εάν υπάρχει εξάρτηση από το λόγο των συχνοτήτων που έχουν οι δύο ημιτονοειδείς ήχοι της διφωνίας και αφετέρου αν το (μέσο) τονικό ύψος της διφωνίας παίζει και αυτό επιπλέον ρόλο στο χαρακτηρισμό της ως σύμφωνη ή διάφωνη.

Διάστημα	Λόγος	Λόγος	Ημιτόνια	Συμβολισμός
2α μικρή	1.066	16/15	1	2m1
2α μεγάλη 1	1.111	10/9	2	2Meg1
2α μεγάλη 2	1.125	9/8	2	2Meg2
2α μεγάλη 3	1.143	8/7	2	2Meg3
3η μικρή	1.200	6/5	3	3m
3η μεγάλη	1.250	5/4	4	3Meg
4η καθαρή	1.333	4/3	5	4ti
τριτονία	1.400	7/5	6	
5η καθαρή	1.500	3/2	7	5pti
6η μικρή	1.600	8/5	8	6m
6η μεγάλη	1.666	5/3	9	6Meg
7η μικρή 1	1.750	7/4	10	7m1
7η μικρή 2	1.777	16/9	10	7m2
7η μικρή 3	1.800	9/5	10	7m3
7η μεγάλη	1.875	15/8	11	7 Meg
8η καθαρή	2.000	2/1	12	8va

**Πίνακας 4.1** Αναλυτικός πίνακας με τα διαστήματα των διφωνιών, που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα, το λόγο των συχνοτήτων τους σε δεκαδική και ρητή μορφή, τον αριθμό των ημιτονίων κάθε κατηγορίας και το συμβολισμό που δώσαμε σε κάθε μία από αυτές.

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται αναλυτικά οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι ήχοι, ο λόγος των συχνοτήτων των συνιστώντων τόνων σε δεκαδική μορφή (ώστε να πάρουμε μια εύληπτη αίσθηση της μεταβολής του λόγου), ο λόγος τους σε ρητή μορφή (ως φόρος τιμής στον Πυθαγόρα), ο αριθμός των ημιτόνων που περιέχει κάθε κατηγορία διφωνίας και ο συμβολισμός τους στο πείραμα

και τα διαγράμματα, τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Δυστυχώς, παραλείψαμε την τριτονία ή 4η αυξημένη ή 5η ελαττωμένη, διάστημα το οποίο αντιστοιχεί σε 3 τόνους = 6 ημιτόνια και λόγο συχνοτήτων  $7/5 = 1.4$ . Στην περίπτωση των διαστημάτων της 2ας μεγάλης και της 7ης μικρής, έχουμε τρεις διαφορετικούς λόγους. Έτσι για τα διαστήματα της μεγάλης δευτέρας έχουμε το λόγο  $10/9$  που λέγεται μικρός τόνος και το λόγο  $9/8$  που λέγεται μεγάλος τόνος. Παραδείγματα τέτοιων διαστημάτων στη μουσική είναι: από το ΦΑ στο ΣΟΛ ( $9/8$ ) και από το ΣΟΛ στο ΛΑ ( $10/9$ ). Αντίστοιχα για τα διαστήματα της μικρής εβδόμης, ο λόγος  $7/4$  λέγεται διάστημα εβδόμης αρμονικό μικρό, ο λόγος  $16/9$  εβδόμης αρμονικό μεγάλο και ο  $9/5$  εβδόμης μικρό.

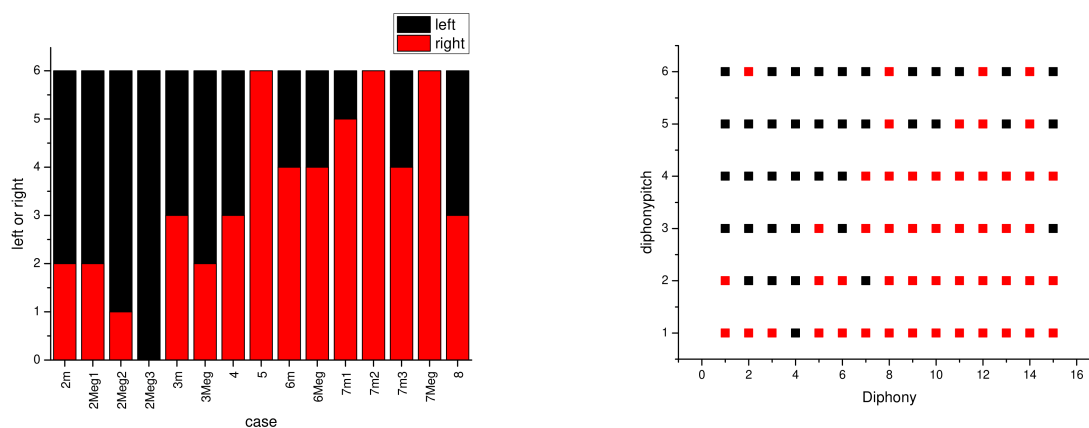
### 4.1.2 Λογισμικό και διαδικασία πειράματος

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος είναι το PsychoPy3, το οποίο είναι ένα πρόγραμμα ανοιχτής πρόσβασης, γραμμένο σε κώδικα Python αρχικά και κατάλληλο για χρήση στην έρευνα των νευροεπιστημών και της πειραματικής ψυχολογίας. Χρησιμοποιήσαμε ακουστικά, ώστε να καλύπτονται και να περιορίζονται πιθανοί εξωτερικοί θόρυβοι όσο είναι δυνατόν, οι οποίοι θα ακούγονταν και θα αλλοίωναν το άκουσμα των διφωνιών. Για τον ίδιο λόγο σαν χώρος διεξαγωγής των πειραμάτων, επιλέχθηκε για τους μεν μη μουσικούς, αίθουσα στο Τμήμα Φυσικής σε όροφο με καθόλου ή ελάχιστο κόσμος, όταν αυτό ήταν δυνατόν, ενώ για τους φοιτητές του Τμήματος Μουσικών Σπουδών ένα απομονωμένο σημείο της σχολής. Βεβαίως κάποιες φορές δεν ήταν ιδανικές οι συνθήκες και μπορεί να υπήρχαν εξωτερικοί θόρυβοι, οι οποίοι να δημιουργούσαν παρεμβολές και να μην υπήρχε τόση ησυχία.

Το πείραμα έχει διάρκεια περίπου 10 λεπτών από τη στιγμή που θα πατήσει ο ακροατής το κουμπί για να αρχίσει η διαδικασία μέχρι που θα ακουστεί και ο τελευταίος ήχος. Κάθε άτομο ακούει συνολικά 90 διφωνίες και καλείται να απαντήσει, εάν του είναι ευχάριστες στο άκουσμα ή όχι με το πάτημα δύο κουμπιών, τα οποία εμείς έχουμε ορίσει ως ναι και όχι. Στο πείραμά μας επιλέξαμε στο ναι να αντιστοιχεί το δεξί βέλος ( $\rightarrow$ ) και στο όχι το αριστερό βέλος ( $\leftarrow$ ). Οι παράμετροι του ψυχοακουστικού πειράματος όπως για παράδειγμα, η διάρκεια κάθε ήχου, το πότε το πείραμα θα συνεχίζει στον επόμενο ήχο, τα μηνύματα με τις οδηγίες και τη λήξη του πειράματος ορίστηκαν από εμάς. Το πρόγραμμα ανακατεύει τους ήχους και τους αναπαραγάγει με τυχαία σειρά, έτσι ώστε η αλληλουχία τους να είναι διαφορετική σε κάθε πείραμα.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, ο ακροατής ακούει έναν ήχο και στη συνέχεια έχει όσο χρόνο θέλει για να αποφασίσει και να απαντήσει, εάν του αρέσει ή όχι και να πατήσει το αντίστοιχο κουμπί. Με το πάτημα του κουμπιού το πρόγραμμα προχωράει στην αναπαραγωγή του επόμενου ήχου, τον οποίο και πάλι ο ακροατής έχει χρόνο να αξιολογήσει ως ευχάριστο ή δυσάρεστο. Με αυτόν τον τρόπο συνεχίζεται το πείραμα μέχρι να αναπαραχθούν όλες οι διφωνίες και με την τελευταία απάντηση ολοκληρώνεται το πείραμα. Οι απαντήσεις που δίνει κάθε άτομο καταγράφονται σε ένα φύλλο εργασίας αυτόματα, μαζί με άλλες πληροφορίες, όπως ο χρόνος απάντησης για κάθε ήχο, ή ο χρόνος που πατήθηκε το πρώτο ναι ή όχι και αυτό το αρχείο αποθηκεύεται σε ένα φάκελο.

Μία πρώτη εικόνα των απαντήσεων ενός οποιουδήποτε ατόμου, αποτελούν τα ακόλουθα διαγράμματα, τα οποία δημιουργήθηκαν για όλο τον πληθυσμό που έλαβε μέρος στο πείραμα. Επειδή στο πείραμα πήραν μέρος 70 άτομα δεν γινόταν να συμπεριληφθούν όλα τα τέτοιου είδους διαγράμματα στην εργασία. Αλλά, χρησιμοποιήθηκαν σαν μια πρώτη ανάγνωση των απαντήσεων.



**Εικόνα 4.1** Διαγράμματα απαντήσεων, τα οποία δημιουργήθηκαν για κάθε ένα άτομο ξεχωριστά, και απεικονίζουν: α) (αριστερά) το σύνολο των θετικών και αρνητικών απαντήσεων για κάθε κατηγορία διφωνίας και β) (δεξιά) τις απαντήσεις (θετικές και αρνητικές) για όλες τις διφωνίες με σειρά αυξανόμενης συχνότητας για κάθε κατηγορία διφωνιών.

Από το διάγραμμα αριστερά βλέπουμε με μια ματιά τις απαντήσεις που έχει δώσει το άτομο για κάθε κατηγορία διφωνιών και αμέσως μπορούμε να καταλάβουμε πόσες θετικές και πόσες αρνητικές απαντήσεις έχει δώσει ο συγκεκριμένος ακροατής στην κάθε κατηγορία. Έτσι μπορούμε να κάνουμε μία εκτίμηση για το ποιες κατηγορίες ίσως προτιμά. Από το διάγραμμα δεξιά, βλέπουμε αμέσως πόσες θετικές απαντήσεις έχει δώσει και σε ποιες διφωνίες συγκεκριμένα, αφού κάθε τετράγωνο αντιστοιχεί σε μία διφωνία και στον οριζόντιο άξονα έχουμε και τις 15 κατηγορίες των ήχων, ενώ στον κάθετο άξονα απεικονίζεται το τονικό ύψος κάθε ήχου ξεκινώντας με το 1 από το χαμηλότερες (μέσες) συχνότητες και ανεβαίνοντας μέχρι το 6, που είναι οι πιο υψηλές. Επομένως μπορούμε να δούμε και την προτίμηση για κάθε διφωνία, αλλά και για τις συχνότητες αυτών.

### 4.1.3 Δείγμα ατόμων

Το δείγμα ατόμων ή αλλιώς υποκειμένων αποτελείται από 70 άτομα, η επιλογή των οποίων έγινε τυχαία. Τα άτομα αυτά προέρχονται από διαφορετικά μεταξύ τους περιβάλλοντα. Είναι φοιτητές-τριες, αλλά και καθηγητές-τριες του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΕΚΠΑ), του Τμήματος Μουσικών σπουδών της Φιλοσοφικής Σχολής του ΕΚΠΑ, φίλοι και συγγενείς. Από το σύνολο των ατόμων, τα 37 είναι γυναίκες και τα 33 είναι άνδρες. Η ηλικία των προσώπων κυμαίνεται από τα 15 έτη



μέχρι τα 80 έτη. Από τα 70 άτομα τα 57 δεν έχουν σχέση με τη μουσική, ενώ τα 13, είτε είναι επαγγελματίες μουσικοί, είτε παίζουν κάποιο μουσικό όργανο για πολλά χρόνια (τουλάχιστον 7 χρόνια), έτσι ώστε να υπάρξει μία σύγκριση μεταξύ τους, για να δούμε εάν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις απαντήσεις τους, λόγω της ενασχόλησής τους με τη μουσική.

## 4.2 Παράθεση και σχολιασμός διαγραμμάτων γενικής εικόνας

Τα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζουν τις μέσες τιμές των απαντήσεων για κάθε ομάδα διφωνιών, που έχουν τον ίδιο λόγο μεταξύ τους. Ξεκινώντας από τις δευτέρες μικρές και τις δευτέρες μεγάλες και ανεβαίνοντας τα διαστήματα με τη σειρά, φτάνοντας στις όγδοες. Εκτός από τις μέσες τιμές των απαντήσεων, στα διαγράμματα απεικονίζονται και τα σφάλματά τους, ώστε να έχουμε μία εκτίμηση της ακρίβειας του υπολογισμού των μέσων τιμών.

Για την περίπτωση του γενικού συνόλου (70 άτομα) έχουμε απλώς δημιουργήσει τα αντίστοιχα διαγράμματα. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, που συγκρίνουμε τις μέσες τιμές δύο διαφορετικών ομάδων μεταξύ τους, επειδή δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι μόνο με τα διαγράμματα μέσω των τιμών, έπρεπε να κάνουμε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο ομάδων με χρήση στατιστικών μέσων. Τα δείγματά μας είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, οπότε το κριτήριο, το οποίο θα επιλέξουμε θα πρέπει να μπορεί να εφαρμοστεί σε ανεξάρτητα δείγματα. Ακόμη οι απαντήσεις του δείγματος δεν γνωρίζουμε αν είναι κανονικοποιημένες, δηλαδή αν ακολουθούν την κανονική κατανομή, βασική προϋπόθεση για να χρησιμοποιηθεί μία παραμετρική μέθοδος για στατιστικό έλεγχο σύγκρισης μέσων τιμών, όπως είναι ο έλεγχος t-test [14]. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήσαμε σαν κριτήριο σύγκρισης μέσων τιμών το Whitney-Mann, το οποίο είναι ένα μη παραμετρικό κριτήριο σύγκρισης των μέσων τιμών δύο ανεξάρτητων δειγμάτων. Ο έλεγχος για το αν τα δείγματά μας ακολουθούν την κανονική κατανομή ή όχι, έγινε με την εφαρμογή του Shapiro-Wilk test στις απαντήσεις των γκρουπ μας στο Origin, το οποίο χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις, που δεν είναι βέβαιο ότι το δείγμα προέρχεται από κανονική κατανομή.

Επιπλέον επειδή το κριτήριο του Whitney-Mann για να είναι αξιόπιστο, πρέπει να εφαρμόζεται σε δείγματα μεγέθους  $n = 6$  και πάνω, χρειάστηκε να φτιάξουμε ομάδες από διφωνίες ανάλογα με το λόγο των συχνοτήτων που περιέχουν, ώστε να αυξήσουμε το πλήθος των επιμέρους δειγμάτων και έτσι να εξασφαλίσουμε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Ο διαχωρισμός έγινε με βάση το πόσο απλούς λόγους περιέχει κάθε κατηγορία διφωνίας και έτσι στις ίδιες ομάδες μπήκαν οι κατηγορίες που είναι πιο κοντά σε απλότητα κλασμάτων. Ο χωρισμός των διφωνιών σε ομάδες φαίνεται συνοπτικά στον Πίνακα 4.2.

Έτσι η πρώτη ομάδα περιέχει όλες τις διφωνίες των διαστημάτων της 2ας (2ας μικρής και 2ας μεγάλης) με λόγους κατά αυξανόμενη σειρά 16/15, 10/9, 9/8, και 8/7. Η δεύτερη τις διφωνίες



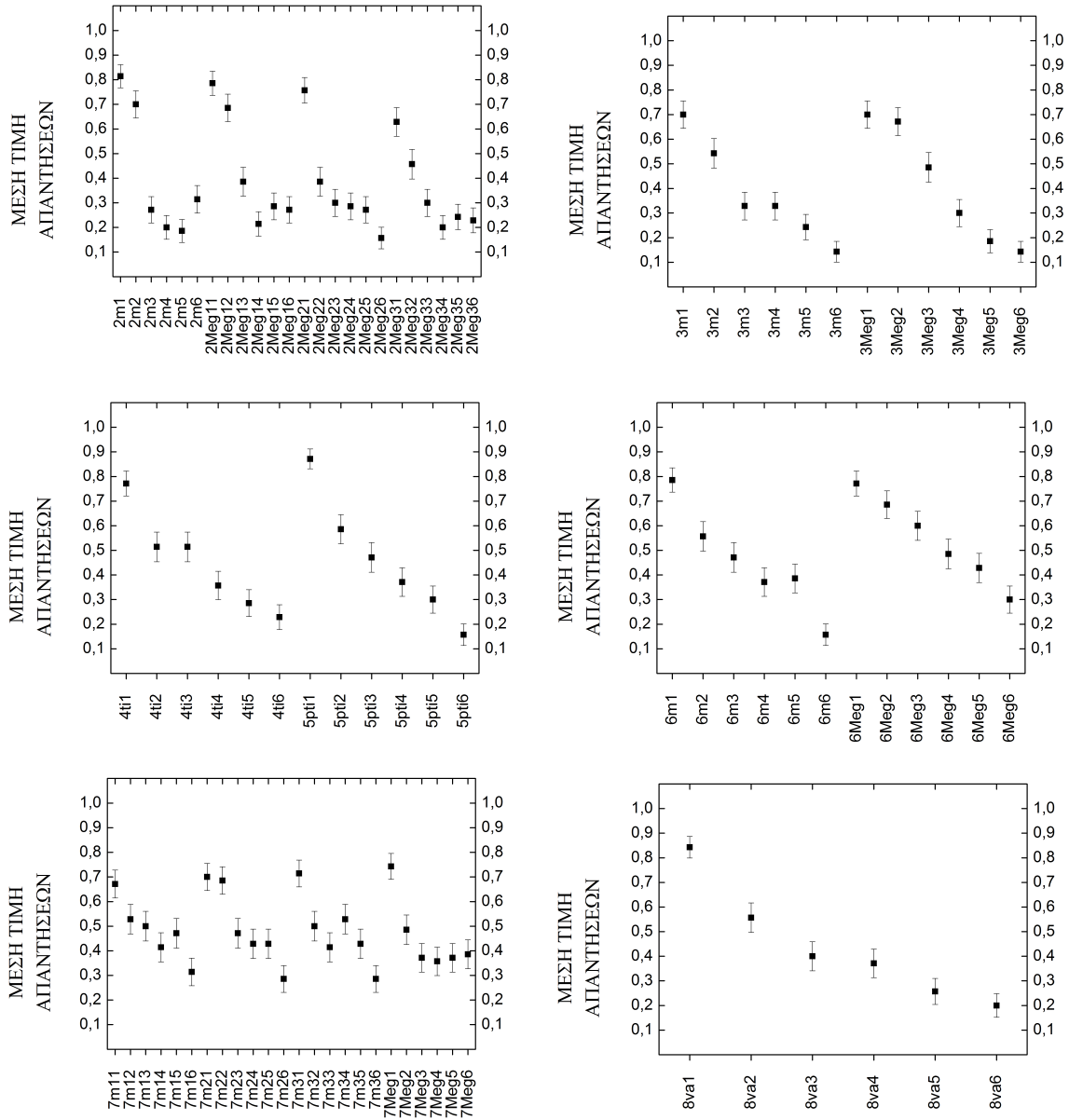
Ομάδα	Κατηγορίες διφωνιών	Λόγοι συχνοτήτων
1η	2α μικρή, 2α μεγάλη <sub>1</sub> , 2α μεγάλη <sub>2</sub> , 2α μεγάλη <sub>3</sub>	16/15, 10/9, 9/8, 8/7
2η	3η μικρή, 3η μεγάλη, 6η μικρή, 6η μεγάλη	6/5, 5/4, 8/5, 5/3
3η	4η, 5η, 8η	4/3, 3/2, 2/1
4η	7η μικρή <sub>1</sub> , 7η μικρή <sub>2</sub> , 7η μικρή <sub>3</sub> , 7η μεγάλη	7/4, 16/9, 9/5, 15/8

**Πίνακας 4.2** Ομάδες κατηγοριών διφωνιών για τη διεξαγωγή του *Whitney-Mann test*.

των διαστημάτων της 3ης και της 6ης με λόγους: 6/5, 5/4 για τις τρίτες και 8/5 και 5/3 για τις 6ες. Η τρίτη ομάδα έχουμε τις διφωνίες των διαστημάτων της 4ης, της 5ης και της 8ης με λόγους: 4/3, 3/2 και 2/1, αντιστοίχως, ενώ η τελευταία ομάδα όλες τις διφωνίες της 7ης με λόγους 7/4, 16/9, 9/5 και 15/8. Στην περίπτωση που προκύπτει ένα αποτέλεσμα το οποίο δείχνει, ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά ανάμεσα στις μέσες τιμές των δύο ομάδων, ο έλεγχος έχει επαναληφθεί και για τιμές του  $p$  μικρότερες από την τιμή 0.05, ώστε να φτάσουμε σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελέσματος μπορούμε, με το να κάνουμε το κριτήριο του τεστ ακόμα πιο οξύ. Τα αποτελέσματα για κάθε ζεύγος ομάδων θα παρατίθενται μετά τα διαγράμματα με τις αντίστοιχες τιμές του  $p$  για τις οποίες έχει πραγματοποιηθεί το τεστ.

#### 4.2.1 Διαγράμματα μέσω τιμών για το γενικό σύνολο

Στην Εικόνα 4.2 απεικονίζονται οι μέσες τιμές των απαντήσεων του συνόλου των 70 ατόμων για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες των διφωνιών του πειράματος. Σαν πρώτη εντύπωση, φαίνεται ότι στις περισσότερες κατηγορίες, οι διφωνίες που συγκεντρώνουν τις περισσότερες θετικές απαντήσεις είναι κυρίως η 1, δηλαδή αυτή που αντιστοιχεί στη χαμηλότερη συχνότητα και ακολουθεί η 2. Η 1 μάλιστα σε όλα τα διαστήματα των διφωνιών έχει την υψηλότερη μέση τιμή, ενώ στις περιπτώσεις του διαστήματος της 5ης και της 8ης φτάνει μάλιστα πολύ κοντά στο 1, δηλαδή όλοι οι ακροατές σχεδόν, έχουν απαντήσει θετικά στο χαρακτηρισμό της ως αποδεκτή στο άκουσμά της. Στη συνέχεια, ακολουθούν οι διφωνίες των διαστημάτων της 6ης και της 4ης, των οποίων οι δύο πρώτες (μέσες) συχνότητες έχουν μέση τιμή μεταξύ 0.7 και 0.8. Παρατηρούμε στο διάστημα της 2ας μικρής, ότι παρ' όλο που θα περιμέναμε όλες οι διφωνίες της να έχουν χαμηλές μέσες τιμές, η 2m1, έχει αρκετές θετικές απαντήσεις. Πιθανόν να παίζει ρόλο το ότι αυτή αντιστοιχεί στις χαμηλότερες (μέσες) συχνότητες και παρ' όλο που αποτελεί τη διφωνία με τη μικρότερη συχνοτική διαφορά μεταξύ των δύο τόνων που την αποτελούν (210 Hz και 223.86 Hz, άρα  $\Delta f = 13.86$  Hz) και επομένως θα περιμέναμε να έχει τα πιο ευκρινή διακροτήματα, άρα και να θεωρείται ενοχλητικός και τραχύς ήχος. Όμως, επειδή οι συχνότητες των ήχων που την αποτελούν είναι χαμηλές, οι όποιες αυξομειώσεις της έντασης του ήχου, οι οποίες προκύπτουν, λόγω δημιουργίας διακροτήματος δεν καθιστούν από ότι φαίνεται τη διφωνία τόσο ενοχλητική σε σχέση με άλλες, που βρίσκονται σε υψηλότερες συχνότητες.



**Εικόνα 4.2** Μέσες τιμές απαντήσεων, στο σύνολο των υποκειμένων (70 άτομα), ανά κατηγορία διφωνίας. Από πάνω αριστερά προς κάτω δεξιά: (α) δευτέρες, (β) τρίτες, (γ) τετάρτες και πέμπτες, (δ) έκτες, (ε) εβδομες, και (ς) όγδοες.

Κάτι άλλο που παρατηρείται από τα διαγράμματα είναι ότι στα διαστήματα της 3ης, της 4ης, της 5ης, της 6ης και της 8ης, τα αποτελέσματα των μέσων τιμών σε σχέση με τις συχνότητες παρουσιάζουν μία φθίνουσα γραμμική σχέση. Δηλαδή, όσο αυξάνεται η (μέση) συχνότητα των διφωνιών και ανεβαίνουμε σε τονικό ύψος, τόσο η μέση τιμή των απαντήσεων μειώνεται και πλησιάζει το 0.2 ή το 0.1. Αντίθετα, όσον αφορά τις απαντήσεις για τα διαστήματα της 2ας και της 7ης, βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα είναι πιο άναρχα και δεν ακολουθούν μία τέτοια αναλογική σχέση. Ειδικά για τις διφωνίες της 2ας το μεγαλύτερο πλήθος των μέσων τιμών των απαντήσεων βρίσκεται κάτω από την τιμή 0.4 και συγκεντρωμένα μεταξύ 0.15 με 0.3, δηλαδή στη χαμηλή περιοχή τιμών, κάτι που δείχνει ότι γενικά σαν κατηγορία έχει συγκεντρώσει τις περισσότερες αρνητικές απαντήσεις και έτσι συνολικά μπορούμε να συμπεράνουμε, ότι δεν θεωρείται σύμφωνο το διάστημα της 2ας.

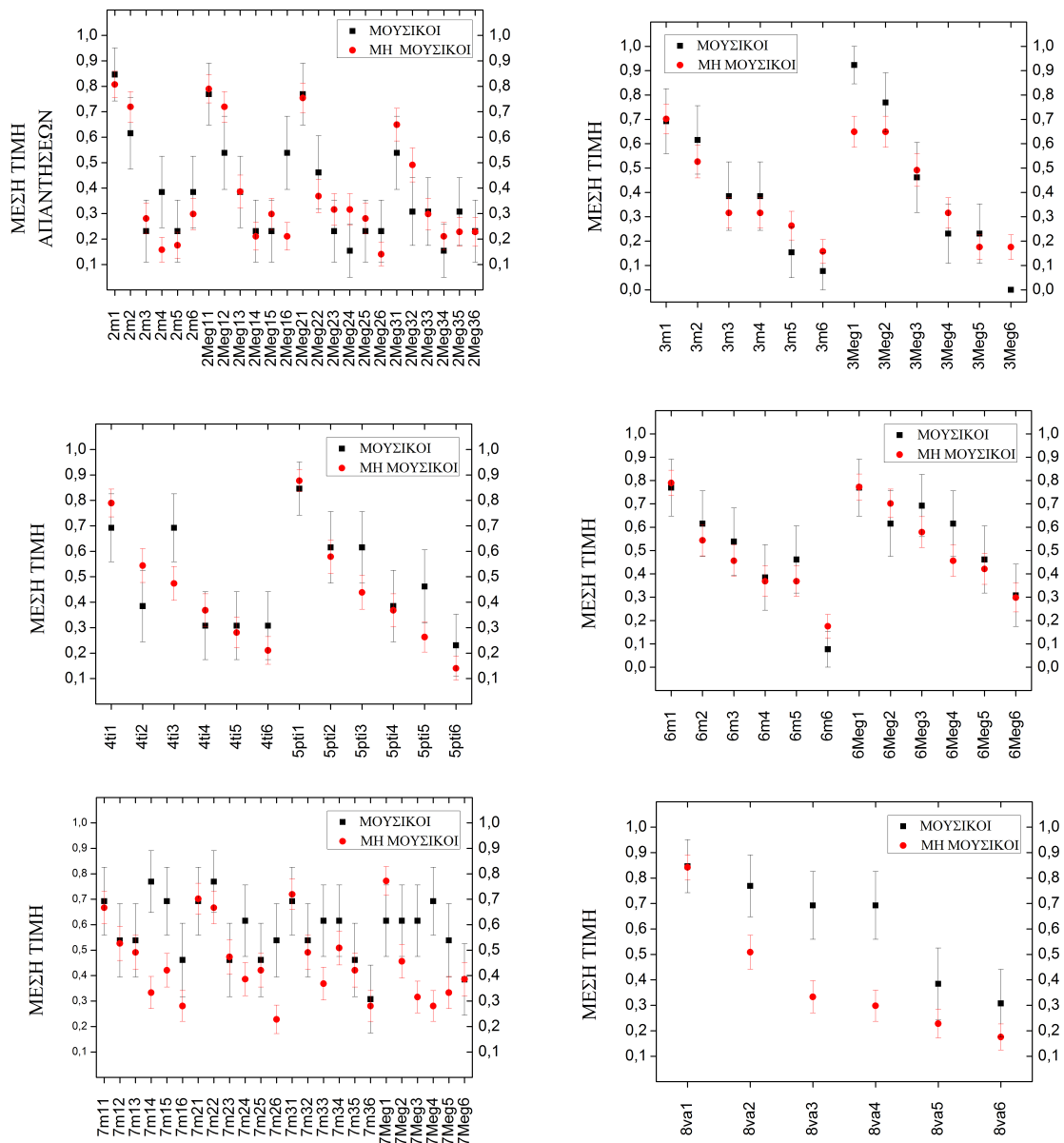
#### 4.2.2 Διαγράμματα μέσων τιμών μουσικών και μη μουσικών

Οι μέσες τιμές των μουσικών, Εικόνα 4.3, παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερα σφάλματα σε σχέση με αυτά των μέσων τιμών των μη μουσικών, λόγω του ότι ο αριθμός των ατόμων που απάντησαν και ήταν μουσικοί, είναι πολύ μικρότερος από αυτόν των μη μουσικών (13 μουσικοί - 57 μη μουσικοί). Για να είχαμε μικρότερα σφάλματα, θα έπρεπε να είχαμε αν όχι ίδιο αριθμό μουσικών σε σχέση με τους μη μουσικούς, τουλάχιστον τον μισό.

Από όλα τα διαστήματα αυτό που παρουσιάζει την πιο ξεκάθαρη εικόνα είναι της ογδόης (8va). Σε αυτή την κατηγορία διφωνιών έχουμε μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ των απαντήσεων των μουσικών και των μη μουσικών. Βλέπουμε πως στις περισσότερες συχνότητες οι τιμές των μουσικών είναι πιο υψηλές και άνω από την τιμή 0.5. Και εδώ για τις δύο υψηλότερες (μέσες) συχνότητες διφωνιών (5 και 6) οι τιμές και των δύο ομάδων είναι οι χαμηλότερες, ενώ η διφωνία με την πιο χαμηλή (μέση) συχνότητα (8va1) έχει την πιο μεγάλη τιμή και μάλιστα οι απαντήσεις των δύο ομάδων ταυτίζονται σχεδόν. Αυτό μας δείχνει ότι ακόμα και στην περίπτωση των μουσικών που έχουν μία άλλη αντίληψη του ήχου λόγω της ενασχόλησής τους με τη μουσική και της εξάσκησης τους, οι υψηλές συχνότητες δεν είναι ευχάριστες και παρόλο που το διάστημα της οκτάβας θεωρείται ότι είναι από τα πιο σύμφωνα στη μουσική, οι διφωνίες 8va5 και 8va6 έχουν τις περισσότερες αρνητικές απαντήσεις και στα δύο γκρουπ.

Στα διαστήματα της 3ης, της 4ης, της 5ης και της 6ης βλέπουμε ότι οι απαντήσεις των μη μουσικών ακολουθούν μία πιο φθίνουσα γραμμική σχέση με το τονικό ύψος και όσο αυξάνεται η (μέση) συχνότητα, τόσο αυξάνονται και οι αρνητικές απαντήσεις και αντίστοιχα μικραίνουν οι τιμές στα διαγράμματα.

Στα διαστήματα της 2ας και της 7ης, επειδή οι απαντήσεις μεταξύ των δύο γκρουπ παρουσιάζουν μία πιο διασκορπισμένη εικόνα, δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο ξεκάθαρο συμπέρασμα, οπότε η σύγκριση των μέσων τιμών μεταξύ των ομάδων με τη μέθοδο Whitney-Mann είναι το μόνο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να δούμε τι συμβαίνει με αυτά τα διαστήματα.



**Εικόνα 4.3** Διαγράμματα αντίστοιχα με εκείνα της εικόνας 4.2, με το διαχωρισμό όμως σε μουσικούς και μη μουσικούς. Από πάνω αριστερά προς κάτω δεξιά: (α) δευτέρες, (β) τρίτες, (γ) τετάρτες και πέμπτες, (δ) έκτες, (ε) εβδόμες, και (ς) όγδοες. Βλέπουμε και εδώ ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα, τόσο αυξάνονται και οι αρνητικές απαντήσεις και αντίστοιχα μικραίνουν οι τιμές στα διαγράμματα.

Από τα αποτελέσματα στον Πίνακα 4.3 βλέπουμε ότι για το διαστήματα της 2ας και της ομάδας των διαστημάτων της 3ης και της 6ης οι απαντήσεις δεν διαφέρουν, ενώ για το διαστήματα της 7ης και την ομάδα των διαστημάτων της 4ης, της 5ης και της 8ης, οι απαντήσεις παρουσιάζουν διαφορά και μάλιστα με πολύ μικρό ποσοστό αβεβαιότητας. Αυτό το συμπεραίνουμε, διότι κάναμε δοκιμές και για μικρότερες τιμές του  $p$  και φτάσαμε μέχρι την τιμή  $p = 0.005$  για τα διαστήματα της

ομάδας 4ης-5ης-8ης και  $p = 0.004$  για τα διαστήματα της 7ης, οι οποίες αντιστοιχούν σε ποσοστό αβεβαιότητας 0.005% και 0.004% τα οποία είναι πάρα πολύ μικρά.

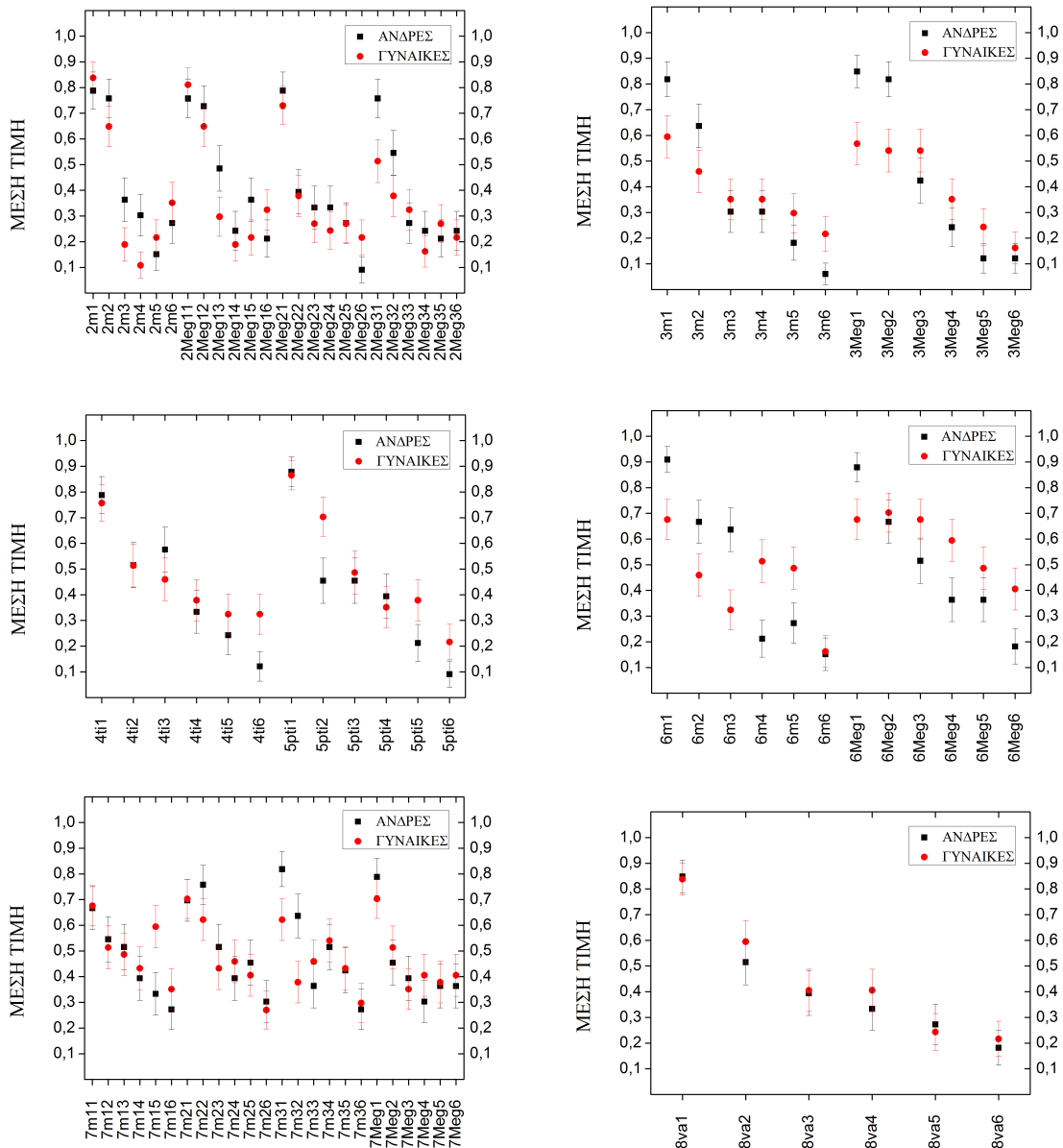
Επομένως οι μουσικοί αντιλαμβάνονται διαφορετικά τις τετάρτες, τις πέμπτες και τις όγδοες, πράγμα το οποίο είναι κάπως αναμενόμενο, καθώς αποτελούν τα διαστήματα τα οποία είναι τα πιο σύμφωνα στη μουσική και επίσης είναι και τα πιο αναγνωρίσιμα στο άκουσμά τους.

Ομάδα διαστημάτων	Λόγοι	$p$	$U$	$Z$	Ασυμπτωτική τιμή $p$	Αποτέλεσμα κριτηρίου
2α μικρή 2α μεγάλη1 2α μεγάλη2 2α μεγάλη3	16/15 10/9 9/8 8/7	0.05	310	0.44465	0.65657	Όχι διαφορετικά
3η μικρή 3η μεγάλη 6η μικρή 6η μεγάλη	6/5 5/4 8/5 5/3	0.05	307	0.38185	0.70257	Όχι διαφορετικά
4η 5η 8η	4/3 3/2 2/1	0.05, 0.01 0.005	1921	2.84597	0.00443	Σημαντικά διαφορετικά
7η μικρή1 7η μικρή2 7η μικρή3 7η μεγάλη	7/4 16/9 9/5 15/8	0.05 0.01 0.005 0.004	428	2.88412	0.00393	Σημαντικά διαφορετικά

**Πίνακας 4.3** Πίνακας αποτελεσμάτων *Whitney-Mann test* για τη σύγκριση των μέσων τιμών των απαντήσεων, μεταξύ των μουσικών και των μη μουσικών. Οι διαφορές εντοπίζονται στην ομάδα των διαστημάτων της 4ης, 5ης και 8ης και στην ομάδα των διαστημάτων της 7ης. Τα  $p$ ,  $U$ ,  $Z$  είναι παράμετροι του *Whitney-Mann test*.

### 4.2.3 Διαγράμματα μέσων τιμών ανδρών και γυναικών

Στα επόμενα διαγράμματα, Εικόνα 4.4, απεικονίζονται οι μέσες τιμές των απαντήσεων για κάθε κατηγορία διφωνίας για τους άνδρες (μαύρα σημεία) και για τις γυναίκες (κόκκινα σημεία) στο ίδιο διάγραμμα κάθε φορά.



**Εικόνα 4.4** Διαγράμματα μέσων τιμών για τις ομάδες του δείγματος των αντρών και των γυναικών. Από άνω αριστερά προς κάτω δεξιά: (α) δευτέρες, (β) τρίτες, (γ) τετάρτες και πέμπτες, (δ) έκτες, (ε) εβδόμες, και (ς) όγδοες. Παρατηρούμε γενικά μείωση των μέσων τιμών με την αύξηση του τονικού ύψους των διφωνιών και στους άντρες και στις γυναίκες. Οι άντρες δεν φαίνεται να έχουν προτίμηση στις υψηλές συχνότητες και τους είναι πιο δυσάρεστες, από ότι είναι στις γυναίκες.

Τα αποτελέσματα των απαντήσεων των ανδρών και των γυναικών, δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές στις μέσες τιμές των απαντήσεών τους κάτι το οποίο φαίνεται και από τα διαγράμματα των απαντήσεων, αλλά και από τα αποτελέσματα του Whitney-Mann test, που ακολουθούν. Πιο συγκεκριμένα:

Παρατηρείται γενικά μείωση των μέσων τιμών με την αύξηση του τονικού ύψους των διφωνιών και στους άντρες και στις γυναίκες. Οι μέσες τιμές και των δύο ομάδων ξεκινάνε περίπου από τις τιμές 0.8 και 0.9 για τις χαμηλές (μέσες) συχνότητες και πέφτουν περίπου μεταξύ των τιμών 0.2 και 0.1.

Στις διφωνίες της 2ας και της 3ης, αυτές που συγκεντρώνουν τις περισσότερες θετικές απαντήσεις, είναι η (1) και η (2) σε κάθε κατηγορία διφωνιών, δηλαδή αυτές, που βρίσκονται πιο χαμηλά συχνοτικά. Οι επόμενες έχουν μέσες τιμές, που κυμαίνονται μεταξύ 0.1-0.6 περίπου.

Συγκριτικά οι μέσες τιμές των διαστημάτων της 7ης είναι πιο υψηλές γενικά σε σχέση με τις μέσες τιμές των υπολοίπων διαστημάτων και για τους άντρες και για τις γυναίκες. Επίσης οι τιμές των ανδρών δεν παρουσιάζουν τόσο μεγάλη μείωση και δεν μειώνονται τόσο γρήγορα, όπως συμβαίνει με τις υπόλοιπες κατηγορίες διφωνιών.

Στις όγδοες οι απαντήσεις μεταξύ ανδρών και γυναικών σχεδόν ταυτίζονται και έχουν ίσες μέσες τιμές για κάθε τονικό ύψος. Όσο ανεβαίνουμε σε συχνότητα, τόσο βλέπουμε ότι οι αρνητικές απαντήσεις αυξάνονται με αποτέλεσμα να έχουμε αντίστοιχα και μείωση των μέσων τιμών.

Στις υπόλοιπες ομάδες διφωνιών, παρατηρούμε πως για τις περισσότερες διφωνίες με τον αριθμό 1 και 2 οι τιμές των ανδρών είναι υψηλές σχετικά, ενώ για τις επόμενες (3, 4, 5, και 6) πέφτουν συνήθως κάτω από την τιμή 0.5, παρουσιάζοντας μεγάλο εύρος. Αντίθετα οι μέσες τιμές των γυναικών είναι πιο κοντά μεταξύ τους και δεν παρουσιάζει τόσο μεγάλη διαφορά η μέγιστη από την ελάχιστη τιμή. Μάλιστα στις περισσότερες περιπτώσεις, οι τιμές των γυναικών στις διφωνίες με τον αριθμό 6 βρίσκονται πιο επάνω από εκείνες των ανδρών καθώς και σε αρκετές διφωνίες που έχουν τον αριθμό 5. Γενικά δηλαδή οι μέσες τιμές των ανδρών πέφτουν πιο απότομα, όσο αυξάνεται το τονικό ύψος, από εκείνες των γυναικών. Έτσι συμπεραίνουμε, ότι οι άντρες δεν φαίνεται να έχουν προτίμηση στις υψηλές συχνότητες και τους είναι πιο δυσάρεστες από ότι είναι στις γυναίκες.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του Whitney-Mann test για τη σύγκριση των μέσων τιμών των απαντήσεων των ανδρών και των γυναικών, δεν προκύπτουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Επομένως θα μπορούσαμε να πούμε, ότι οι προτιμήσεις των ανδρών και των γυναικών δεν διαφέρουν και πολύ μεταξύ τους ή ότι έχουν μικροδιαφορές, οι οποίες δεν θα μπορούσαν στατιστικά να ληφθούν υπόψη και να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης.

Βλέπουμε ότι η τιμή του  $Z$  είναι στη 2η, την 3η και την 4η ομάδα διαστημάτων αρνητική, πράγμα που δείχνει, ότι οι τιμές του δεύτερου γκρουπ, δηλαδή των γυναικών, είναι μεγαλύτερες από αυτές του πρώτου γκρουπ, δηλαδή των ανδρών, το οποίο αναφέρθηκε και στα διαγράμματα των μέσων τιμών. Ακόμη παρατηρούμε ότι στην ομάδα της 7ης η τιμή του  $Z$  είναι και μεν αρνητική, αλλά επίσης είναι κοντά στο 0, πράγμα το οποίο δείχνει ότι η διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών των ανδρών και των γυναικών για τις 7ες είναι η μικρότερη σε σχέση με αυτές στις υπόλοιπες ομάδες.

Ομάδα διαστημάτων	Λόγοι	$p$	$U$	$Z$	Ασυμπτωτική τιμή $p$	Αποτέλεσμα κριτηρίου
2α μικρή 2α μεγάλη1 2α μεγάλη2 2α μεγάλη3	16/15 10/9 9/8 8/7	0.05	330	0.85651	0.39172	Όχι διαφορετικά
3η μικρή 3η μεγάλη 6η μικρή 6η μεγάλη	6/5 5/4 8/5 5/3	0.05	266	-0.44356	0.65736	Όχι διαφορετικά
4η 5η 8η	4/3 3/2 2/1	0.05	141	-0.64893	0.51639	Όχι διαφορετικά
7η μικρή1 7η μικρή2 7η μικρή3 7η μεγάλη	7/4 16/9 9/5 15/8	0.05	276	-0.23731	0.81241	Όχι διαφορετικά

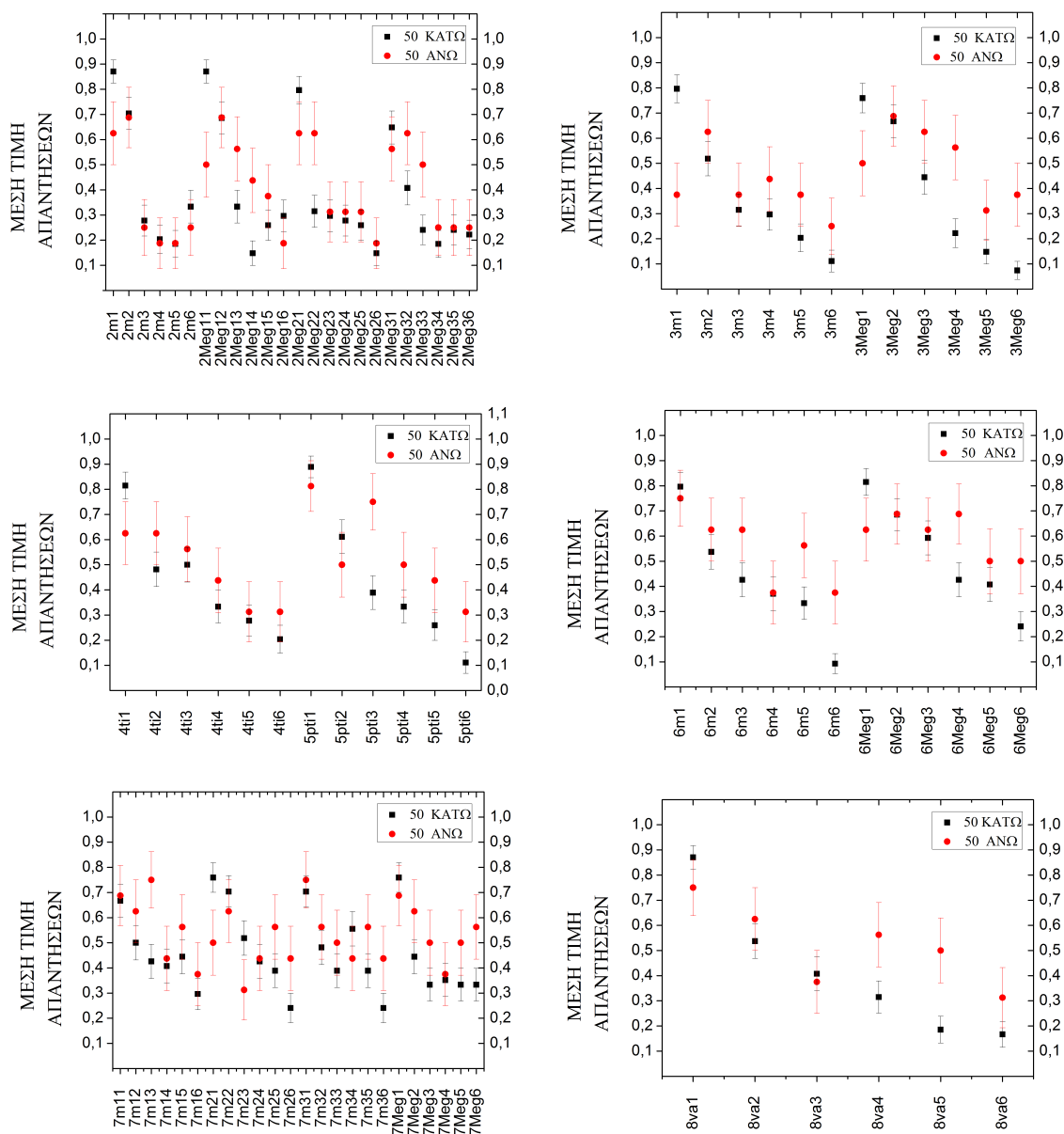
**Πίνακας 4.4** Πίνακας αποτελεσμάτων *Whitney-Mann test* για τη σύγκριση των απαντήσεων των ανδρών και των γυναικών. Δεν φαίνεται κάποια διαφοροποίηση στις απαντήσεις των δύο ομάδων.

#### 4.2.4 Διαγράμματα μέσω των τιμών για τις ομάδες άνω των 50 ετών και κάτω των 50 ετών

Στην εικόνα 4.5 απεικονίζονται οι μέσες τιμές των απαντήσεων για τις ηλικιακές ομάδες του δείγματος άνω των 50 με κόκκινο χρώμα και κάτω των 50 με μαύρο χρώμα για όλες τις κατηγορίες των διφωνιών. Στο δείγμα των ατόμων, τα 16 άτομα είναι ηλικίας άνω των 50 ετών, ενώ τα υπόλοιπα 54 είναι κάτω των 50 ετών. Για αυτό το λόγο, παρατηρούμε, ότι στα διαγράμματα, οι τιμές των ατόμων που είναι άνω των 50 έχουν μεγαλύτερα σφάλματα, λόγω του μικρότερου πλήθους τους. Οπότε αν το λάβουμε υπόψη αυτό, ίσως υπάρχει μία μικρή αβεβαιότητα στις τιμές των άνω των 50, ενώ για τις μέσες τιμές των κάτω των 50 μπορούμε να είμαστε πιο σίγουροι.

Στις περισσότερες κατηγορίες διφωνιών οι απαντήσεις των ατόμων, που είναι άνω των 50, είναι πιο πάνω από αυτές των κάτω των 50 και μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις ακόμα και στις υψηλές συχνότητες. Στα διαστήματα της 3ης, της 5ης, της 6ης και της 8ης στις διφωνίες με τον αριθμό 5 και 6 οι μέσες τιμές των δύο ομάδων διαφέρουν και οι κάτω των 50 έχουν περισσότερες αρνητικές απαντήσεις για αυτές τις διφωνίες, με αποτέλεσμα να έχουν και αντίστοιχα χαμηλότερες μέσες τιμές από τους άνω των 50.





**Εικόνα 4.5** Απεικόνιση των μέσων τιμών των απαντήσεων για τις ηλικιακές ομάδες του δείγματος άνω των 50 με κόκκινο χρώμα και κάτω των 50 με μαύρο χρώμα για όλες τις κατηγορίες των διφωνιών. Από πάνω αριστερά προς κάτω δεξιά: (α) δευτέρες, (β) τρίτες, (γ) τετάρτες και πέμπτες, (δ) έκτες, (ε) εβδόμες, και (ζ) όγδοες.

Οι απαντήσεις των ατόμων ηλικίας 50 και κάτω έχουν πιο απότομη μεταβολή με την αύξηση της συχνότητας των διφωνιών, ενώ τα άτομα που είναι άνω των 50, παρουσιάζουν μία πιο ομαλή μεταβολή στις μέσες τιμές τους, σε σχέση με την αύξηση του τονικού ύψους. Πιο συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές των ατόμων άνω των 50 κυμαίνονται από 0.8 μέχρι 0.9 και οι ελάχιστες από 0.1 μέχρι 0.2. Αντίστοιχα οι μέγιστες τιμές για τα άτομα κάτω των 50 είναι από 0.6 μέχρι 0.8, ενώ

οι ελάχιστες είναι από 0.2 μέχρι 0.4. Έτσι βλέπουμε ότι οι άνω των 50 έχουν ένα εύρος τιμών περίπου στις 0.8 μονάδες, ενώ οι κάτω των 50 περίπου στις 0.4 μονάδες.

Στα διαστήματα της 7ης οι μέσες τιμές και των δύο ομάδων είναι συγκεντρωμένες στην περιοχή του διαγράμματος με τιμές 0.25 - 0.75 και δεν είναι απλωμένες γενικά σε όλο το χώρο του διαγράμματος, όπως συμβαίνει στα υπόλοιπα διαστήματα, πράγμα που δείχνει ότι έχουν περίπου ίσο αριθμό θετικών και αρνητικών απαντήσεων.

Τέλος στο διάγραμμα της 2ας παρατηρούμε ότι σε αυτό εντοπίζονται οι περισσότερες αρνητικές απαντήσεις, καθώς εκεί έχουμε τις περισσότερες χαμηλές τιμές και από τις δύο ομάδες. Το μεγαλύτερο πλήθος των απαντήσεων κυμαίνεται από 0.15 μέχρι 0.4. Βέβαια περισσότερες αρνητικές απαντήσεις έχουν δώσει τα άτομα κάτω των 50 ετών, παρά τα άτομα άνω των 50, πράγμα που δείχνει ότι γενικά σαν κατηγορία δεν είναι και πολύ αρεστή σε αυτή την ηλικιακή ομάδα.

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του κριτηρίου Whitney-Mann test στις μέσες τιμές των απαντήσεων και των δύο ομάδων:

Ομάδα διαστημάτων	Λόγοι	$p$	$U$	$Z$	Ασυμπτωτική τιμή $p$	Αποτέλεσμα κριτηρίου
2α μικρή 2α μεγάλη1 2α μεγάλη2 2α μεγάλη3	16/15 10/9 9/8 8/7	0.05	259	-0.58854	0.55617	Όχι διαφορετικά
3η μικρή 3η μεγάλη 6η μικρή 6η μεγάλη	6/5 5/4 8/5 5/3	0.05	214	-1.51889	0.12879	Όχι διαφορετικά
4η 5η 8η	4/3 3/2 2/1	0.05	113.5	-1.5214	0.12816	Όχι διαφορετικά
7η μικρή1 7η μικρή2 7η μικρή3 7η μεγάλη	7/4 16/9 9/5 15/8	0.05	192	-1.97347	0.04844	Σημαντικά διαφορετικά

**Πίνακας 4.5** Αποτελέσματα *Whitney-Mann test* για τη σύγκριση των απαντήσεων μεταξύ των ατόμων άνω των 50 και κάτω των 50 ετών.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του κριτηρίου σύγκρισης των μέσων τιμών, δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές για τις περισσότερες ομάδες διφωνιών εκτός από την ομάδα των διφωνιών της 7ης. Βέβαια η ασυμπτωτική τιμή του  $p$  δεν είναι και πολύ μικρότερη από αυτήν

που χρησιμοποιήθηκε στο κριτήριο ( $p = 0.05$ ), οπότε η αβεβαιότητα είναι περίπου στο 5% και επομένως το ποσοστό ακρίβειας είναι 95%.

Οι τιμές του  $Z$  είναι σε όλες τις ομάδες διφωνιών αρνητικές, πράγμα το οποίο σημαίνει, ότι οι όποιες διαφορές υπάρχουν στις μέσες τιμές των δύο ομάδων οφείλονται στις απαντήσεις των ατόμων άνω των 50, οι οποίες συγκεντρώνουν περισσότερες θετικές απαντήσεις από αυτές των ατόμων κάτω των 50, το οποίο αναφέρθηκε και στα διαγράμματα που σχολιάσαμε παραπάνω. Τέλος η μικρότερη διαφορά μεταξύ των απαντήσεων των δύο ομάδων εντοπίζεται στην ομάδα που περιέχει τα διαστήματα της 2ας, το οποίο το καταλαβαίνουμε από την τιμή του  $Z$ , η οποία πλησιάζει πιο πολύ το 0 σε σχέση με τις τιμές των  $Z$  για τις υπόλοιπες ομάδες διφωνιών, ενώ η μεγαλύτερη διαφορά εντοπίζεται στα διαστήματα της 7ης, η οποία θεωρείται και στατιστικά σημαντική, όπως προαναφέραμε.

#### 4.2.5 Διαγράμματα μέσων τιμών για τις ομάδες 35 ετών και άνω και 35 ετών και κάτω

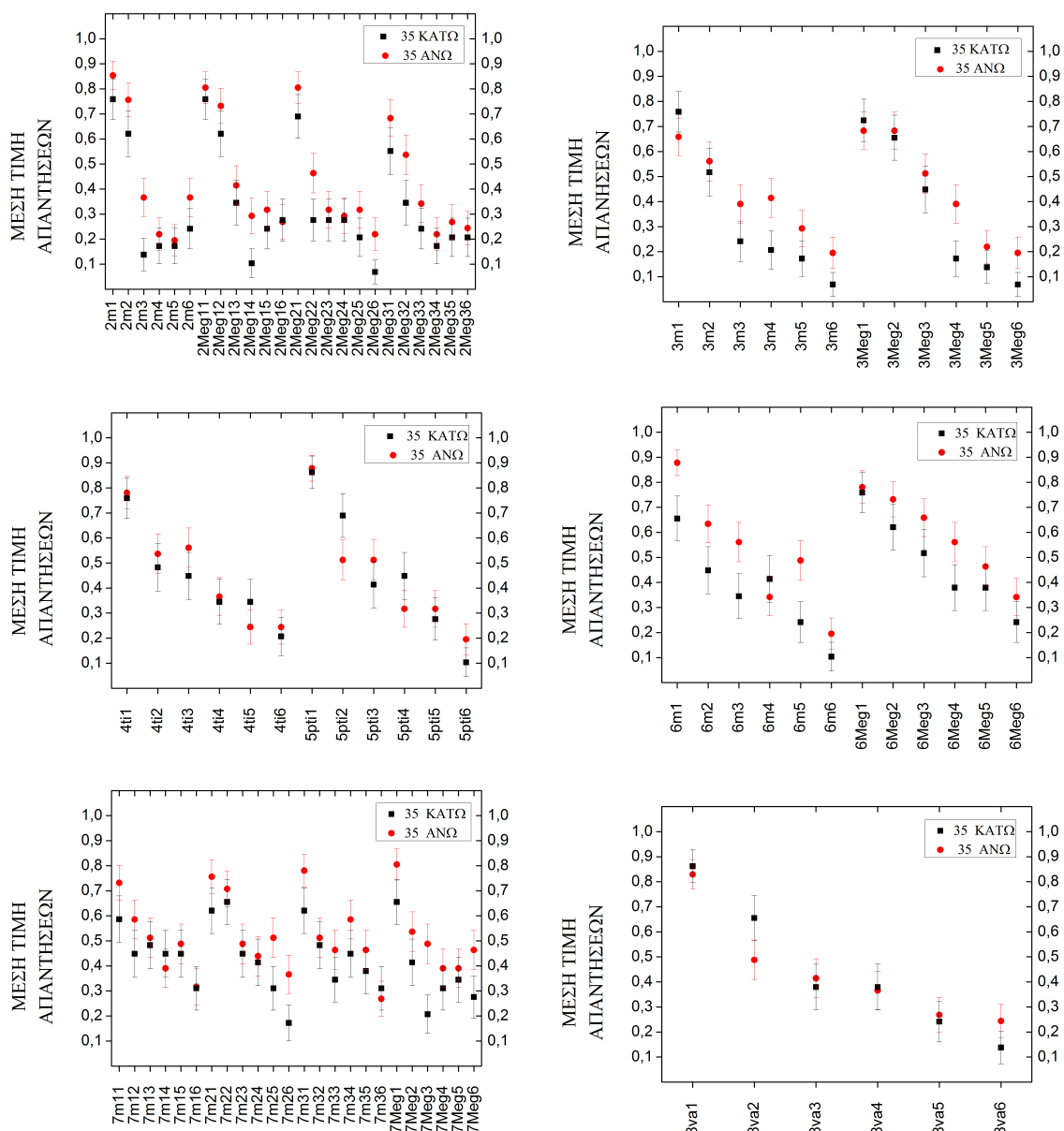
Από τα 70 άτομα, που πήραν μέρος στο πείραμα, τα 29 είναι κάτω των 35 ετών και τα υπόλοιπα 41 είναι πάνω από 35 ετών. Ο λόγος, που επιλέχτηκε αυτός ο ηλικιακός διαχωρισμός είναι, ότι οι μικρότερες ηλικίες ίσως είναι πιο ανοιχτές σε καινούργια ακούσματα και επομένως να υπάρχει διαφορετική προτίμηση στους ήχους, λόγω του ότι οι αυτές οι ηλικίες εκτίθενται σε πολλά και διαφορετικά είδη μουσικής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 4.6.

Ως προς τα παραπάνω διαγράμματα για τις μέσες τιμές των απαντήσεων των ατόμων κάτω των 35 ετών και άνω των 35 ετών, οι γενικές παρατηρήσεις, που μπορούμε να κάνουμε, είναι οι εξής:

Στην κατηγορία της 2ας, βλέπουμε ότι οι περισσότερες τιμές των ατόμων κάτω των 35 ετών είναι κάτω από την τιμή 0.3, κάτι το οποίο δείχνει ότι υπάρχουν πολλές αρνητικές απαντήσεις. Οι τιμές των ατόμων άνω των 35 ετών βρίσκονται λίγο πιο ψηλά, αλλά όχι πολύ πιο πάνω από τις αντίστοιχες τιμές της άλλης ομάδας. Επομένως και στις δύο ομάδες το διάστημα της 2ας δεν φαίνεται να είναι ιδιαίτερα αρεστό, άσχετα από το ύψος της συχνότητας των διφωνιών.

Στις διφωνίες της 3ης και της 6ης, παρατηρούμε ότι οι μέσες τιμές των άνω των 35 βρίσκονται σε γενικές γραμμές πιο πάνω από τις μέσες τιμές των ατόμων κάτω των 35, χωρίς όμως να υπάρχουν και ουσιαστικές διαφορές μεταξύ τους, πέρα από κάποιες διφωνίες (6m1, 6m3, 6m5, 3m4 και 3Meg4), όπου βλέπουμε ότι οι τιμές διαφέρουν ξεκάθαρα μεταξύ τους.

Για την κατηγορία των διφωνιών της 7ης, οι περισσότερες μέσες τιμές και των δύο ομάδων κυμαίνονται από 0.3 μέχρι 0.6, για τις περισσότερες περιπτώσεις, το οποίο σημαίνει ότι σαν κατηγορία τα διαστήματα της 7ης έχουν περίπου ίσο αριθμό θετικών και αρνητικών απαντήσεων, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζουν ούτε πολύ υψηλές μέσες τιμές, ούτε πολύ χαμηλές γενικά.



**Εικόνα 4.6** Διαγράμματα μέσων τιμών για τις ηλικιακές ομάδες του δείγματος των ατόμων άνω των 35 ετών (κόκκινα σημεία) και κάτω των 35 ετών (μαύρα σημεία) για όλες τις κατηγορίες διφωνιών. Από πάνω αριστερά προς κάτω δεξιά: (α) δευτέρες, (β) τρίτες, (γ) τετάρτες και πέμπτες, (δ) έκτες, (ε) εβδόμες, και (ς) όγδοες. Η μεταβολή των μέσων τιμών με την αύξηση του τονικού ύψους είναι ίδια και για τις δύο ομάδες. Όσο αυξάνεται η συχνότητα, υπάρχει μία προοδευτική μείωση των τιμών και των δύο υποομάδων του δείγματος. Αυτό δε φαίνεται να ισχύει για τα διαστήματα της 2ας, αφού δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη πτωτική μεταβολή των μέσων τιμών και των δύο γκρουπ, αλλά γενικά σε όλες τις διφωνίες της κατηγορίας αυτής βρίσκονται κοντά στην τιμή 0.3.

Στις διφωνίες της 8ης οι απαντήσεις των δύο ομάδων δεν διαφέρουν σημαντικά, καθώς οι τιμές

τους βρίσκονται πολύ κοντά για τις περισσότερες διφωνίες, εκτός από τη δεύτερη και την έκτη που υπάρχει μία διαφοροποίηση.

Μία γενική παρατήρηση που θα μπορούσαμε να κάνουμε για όλα τα διαστήματα διφωνιών, εκτός από αυτά της 2ας, είναι ότι η μεταβολή της μέσης τιμής με την αύξηση του τονικού ύψους είναι ανάλογη και για τις δύο ομάδες. Δηλαδή, όσο αυξάνεται η (μέση) συχνότητα, υπάρχει μία προσδευτική μείωση των τιμών και των δύο υποομάδων του δείγματος. Όπως είπαμε και πιο πάνω, αυτό δε φαίνεται να ισχύει για τα διαστήματα της 2ας, αφού στο αντίστοιχο διάγραμμα δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη πτωτική μεταβολή των μέσων τιμών και των δύο γκρουπ, αλλά γενικά σε όλες τις διφωνίες της κατηγορίας αυτής βρίσκονται κοντά στην τιμή 0.3.

Για την αξιολόγηση των όποιων διαφορών βλέπουμε στις τιμές των δύο υποομάδων, χρησιμοποιήσαμε και σε αυτήν την περίπτωση το κριτήριο σύγκρισης μέσων τιμών της Στατιστικής Whitney-Mann test, τα αποτελέσματα του οποίου παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Ομάδα διαστημάτων	Λόγοι	$p$	$U$	$Z$	Ασυμπτωτική τιμή $p$	Αποτέλεσμα κριτηρίου
2α μικρή	16/15					
2α μεγάλη1	10/9	0.05	392	2.13628	0.03266	Σημαντικά διαφορετικά
2α μεγάλη2	9/8	0.04				
2α μεγάλη3	8/7					
3η μικρή	6/5	0.05	370	1.68155	0.09266	Όχι διαφορετικά
3η μεγάλη	5/4					
6η μικρή	8/5					
6η μεγάλη	5/3					
4η	4/3	0.05	167	0.14247	0.88671	Όχι διαφορετικά
5η	3/2					
8η	2/1					
7η μικρή1	7/4	0.05	402	2.34364	0.0191	Σημαντικά διαφορετικά
7η μικρή2	16/9	0.02				
7η μικρή3	9/5					
7η μεγάλη	15/8					

**Πίνακας 4.6** Αποτελέσματα Whitney-Mann test για τη σύγκριση των μέσων τιμών των ηλικιακών ομάδων άνω των 35 ετών και κάτω των 35 ετών.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του κριτηρίου Whitney-Mann test, οι ομάδες διφωνιών στις οποίες παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικές διαφορές οι μέσες τιμές μεταξύ των ατόμων άνω των 35 ετών και των ατόμων κάτω των 35 ετών, είναι δύο: αυτές των διαστημάτων της 7ης και των διαστημάτων της 2ας. Στην περίπτωση των διφωνιών της 7ης μάλιστα, η διαφορά είναι λίγο μεγαλύτερη, όπως προκύπτει όχι μόνο από την ασυμπτωτική τιμή του  $p$ , η οποία στη μεν ομάδα των διαστημάτων της 2ας είναι 0.03266, στη δε ομάδα της 7ης 0.0191, αλλά και από την τιμή της

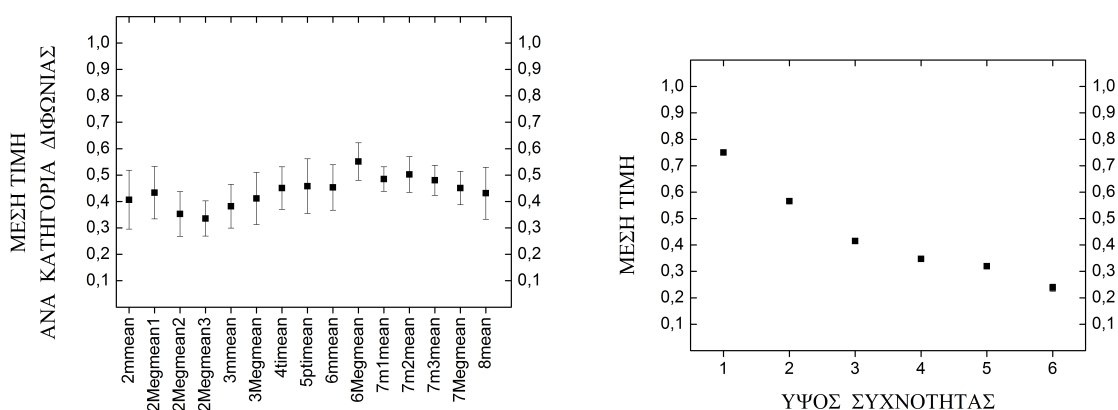
παραμέτρου  $Z$ , η οποία είναι πιο μεγάλη στην ομάδα της 7ης. Η μεγαλύτερη τιμή του  $Z$  δείχνει ότι οι μέσες τιμές του πρώτου γκρουπ, δηλαδή των ατόμων άνω των 35 ετών είναι μεγαλύτερες από αυτές του δεύτερου, δηλαδή των ατόμων κάτω των 35 ετών.

Επίσης βλέπουμε, ότι σε όλες τις ομάδες διφωνιών οι τιμές της παραμέτρου  $Z$  είναι όλες θετικές, πράγμα το οποίο δείχνει ότι οι οποιοσδήποτε διαφορές προκύπτουν από τη σύγκριση των μέσων τιμών των δύο υποομάδων, οφείλονται σε μεγαλύτερες μέσες τιμές της πρώτης υποομάδας (άτομα άνω των 35 ετών). Τέλος το ποσοστό αβεβαιότητας για τα αποτελέσματα του τεστ Whitney-Mann, είναι 4% για την περίπτωση των διαστημάτων της 2ας και 2% για τα διαστήματα της 7ης, το οποία και είναι αρκετά μικρά, επομένως μπορούμε να είμαστε σίγουροι για τα αποτελέσματα αυτά, ότι στατιστικά υπάρχει διαφορά στις μέσες τιμές των δύο γκρουπ.

### 4.3 Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών

Ακολουθούν τα προκύψαντα διαγράμματα από τις μέσες τιμές του συνόλου των 70 ατόμων που συμμετείχαν στο πείραμα. Μας δείχνουν μία γενική εικόνα για τις προτιμήσεις (A) σε σχέση με το λόγο των συχνοτήτων των διφωνιών (15 διαφορετικές κατηγορίες), αλλά και (B) σε σχέση με το τονικό ύψος στο οποίο αυτές βρίσκονται (6 διαφορετικές κατηγορίες). Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις ομάδες μουσικών και μη μουσικών, άνδρες και γυναίκες, άτομα άνω και κάτω των 35 ετών και τέλος άτομα άνω και κάτω των 50 ετών.

#### 4.3.1 Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών γενικού συνόλου

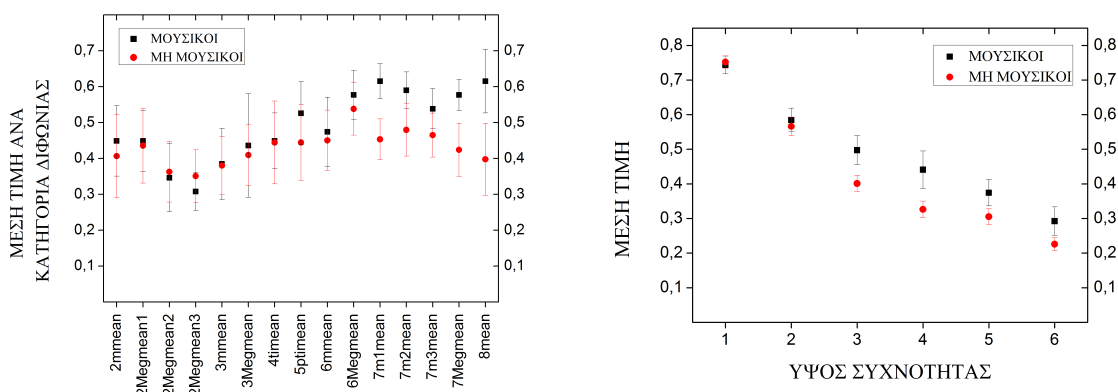


**Εικόνα 4.7** Διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τις μέσες τιμές των απαντήσεων όλου του συνόλου (70 άτομα): (A) αριστερά για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών με βάση το λόγο των συχνοτήτων και (B) δεξιά για κάθε μία από τις 6 κατηγορίες τονικού ύψους.

Ας κοιτάξουμε την Εικόνα 4.7. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα αριστερά, η κατηγορία που συγκεντρώνει τις περισσότερες θετικές απαντήσεις είναι αυτή των διφωνιών της 6ης μεγάλης με μέση τιμή του συνόλου στο 0.55 περίπου, ενώ ακολουθούν οι διφωνίες της 7m2 και της 7m1. Αντίστοιχα, αυτή που συγκεντρώνει τις περισσότερες αρνητικές απαντήσεις είναι η κατηγορία της 2αςMeg3 με μέση τιμή του συνόλου των απαντήσεων στο 0.35. Βλέπουμε ακόμα, ότι οι περισσότερες μέσες τιμές, έχουν μεγάλα σφάλματα, παρόλο που το δείγμα μας δεν είναι μικρό. Αυτό εξηγείται από τη μεγάλη διασπορά, την οποία έχουν οι απαντήσεις των ατόμων, δηλαδή υπάρχει μεγάλη ποικιλία απαντήσεων και οι περισσότερες τιμές δεν βρίσκονται πολύ κοντά στη μέση τιμή αλλά είναι διασκορπισμένες άνω και κάτω από αυτήν.

Από το διάγραμμα δεξιά βλέπουμε ξεκάθαρα, ότι όσο ανεβαίνει η συχνότητα των διφωνιών, τόσο μειώνεται και η προτίμηση σε αυτές με αποτέλεσμα να μειώνεται η μέση τιμή τους. Αυτό ενισχύεται και από το γεγονός ότι τα σφάλματα των μέσων τιμών είναι σχεδόν 0.01 για όλες τις τιμές (το μεγαλύτερο από αυτά έχει τιμή 0.013 και το μικρότερο 0.0041), ενώ οι μέσες τιμές είναι της τάξεως του 0.5 και επομένως δεν επηρεάζουν και πολύ τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή που μπορούν να πάρουν αν συμπεριλάβουμε και το σφάλμα μαζί. Τέλος παρατηρούμε ότι οι διφωνίες των πιο χαμηλών συχνοτήτων, δηλαδή αυτές με τον αριθμό 1, έχουν αρκετά υψηλότερη μέση τιμή σε σχέση με τις υπόλοιπες συχνοτήτες η οποία είναι κοντά στο 0.80. Οι διφωνίες με τον αριθμό 3, 4, 5 και 6 έχουν μέσες τιμές από 0.4 και κάτω. Επομένως οι περισσότερες διφωνίες με υψηλές συχνοτήτες βρίσκονται κάτω από τη μέση των τιμών πράγμα που σημαίνει ότι από την κατηγορία 4 και μετά αρχίζουν να αυξάνονται αρκετά οι αρνητικές απαντήσεις των ατόμων.

### 4.3.2 Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών μουσικών και μη μουσικών



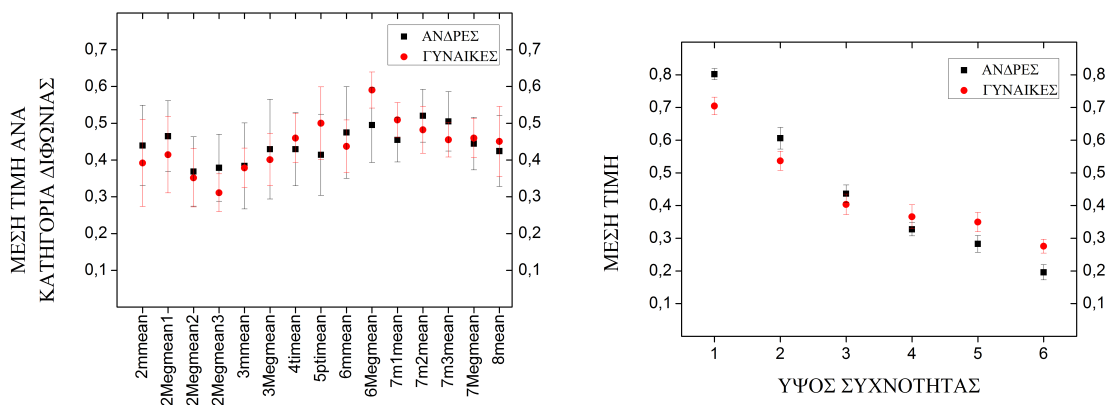
**Εικόνα 4.8** Διαγράμματα που απεικονίζουν τις μέσες τιμές των απαντήσεων μουσικών (13 άτομα) και των μη μουσικών (57 άτομα) του δείγματος: (A) αριστερά για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών με βάση το λόγο των συχνοτήτων και (B) δεξιά για κάθε μία από τις 6 κατηγορίες τονικού ύψους.



Ας κοιτάξουμε την Εικόνα 4.8. Από ότι φαίνεται από το διάγραμμα των μέσων τιμών για όλες τις κατηγορίες των διφωνιών, στα διαστήματα της 7ης και της 8ης, οι τιμές των μουσικών είναι πιο ψηλά από τις τιμές των μη μουσικών, ενώ στις υπόλοιπες κατηγορίες διφωνιών (2ας, 3ης, 4ης, 5ης και 6ης) οι μέσες τιμές και των δύο ομάδων είναι πολύ κοντά μεταξύ τους ή ταυτίζονται σχεδόν. Βέβαια τα σφάλματα των μέσων τιμών και των δύο ομάδων είναι μεγάλα και επομένως δεν μπορούμε να έχουμε ξεκάθαρη εικόνα για το κατά πόσο αυτές οι διαφορές μεταξύ των μουσικών και των μη μουσικών του δείγματός μας είναι σημαντικές. Επίσης κάτι άλλο που παρατηρούμε είναι πως οι μέσες τιμές των μουσικών παρουσιάζουν μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ τους από αυτές των μη μουσικών, δηλαδή έχουν μεγαλύτερη διασπορά και παίρνουν τιμές από 0.3 μέχρι 0.6. Αντίθετα οι τιμές των μη μουσικών, είναι πιο κοντά μεταξύ τους και σε γενικές γραμμές κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0.35 και 0.55.

Ως προς το διάγραμμα των κατηγοριών τονικού ύψους, παρατηρούμε και εδώ όπως και στο διάγραμμα 4.7, ότι με την αύξηση της συχνότητας των διφωνιών έχουμε αντίστοιχα και μείωση των μέσων τιμών. Επομένως όσο αυξάνεται το τονικό ύψος, τόσο αυξάνονται και οι αρνητικές απαντήσεις και των μουσικών και των μη μουσικών, πράγμα το οποίο δείχνει ότι και σε αυτή την περίπτωση οι υψηλές συχνότητες δεν είναι ευχάριστες στους ακροατές άσχετα με το αν έχουν σχέση με τη μουσική ή όχι. Τέλος τα σφάλματα των μέσων τιμών στα άτομα που δεν είναι μουσικοί είναι μικρότερα από αυτά των μέσων τιμών των μουσικών, το οποίο δικαιολογείται από το αρκετά μεγαλύτερο πλήθος των μη μουσικών. Τέλος βλέπουμε ότι οι μουσικοί στις κατηγορίες 3, 4, 5 και 6 έχουν μεγαλύτερες τιμές από τους μη μουσικούς, ενώ στις 2 πρώτες κατηγορίες οι τιμές και των δύο ομάδων ταυτίζονται σχεδόν, το οποίο δείχνει ότι οι μουσικοί επηρεάζονται κάπως λιγότερο από τη συχνότητα των ήχων.

### 4.3.3 Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών ανδρών και γυναικών του δείγματος



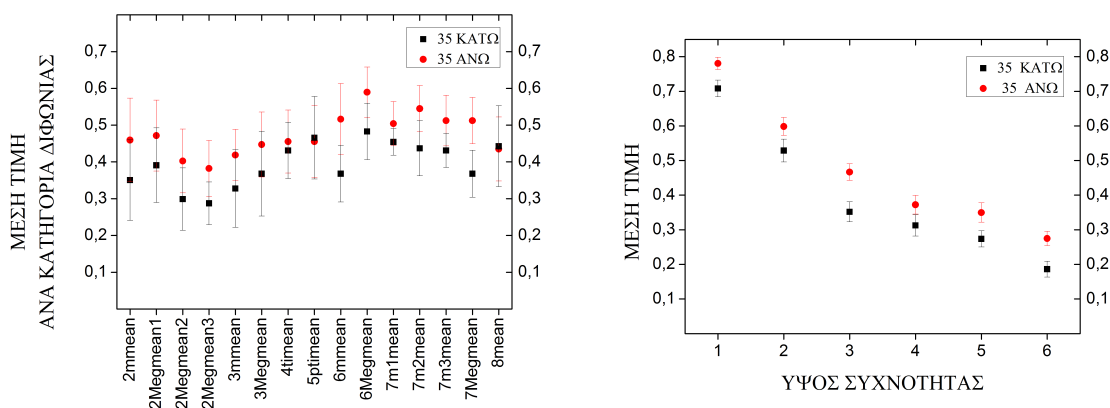
**Εικόνα 4.9** Διαγράμματα που απεικονίζουν τις μέσες τιμές των απαντήσεων των ανδρών (33 άτομα) και των γυναικών (37 άτομα) του δείγματος: (Α) αριστερά για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών με βάση το λόγο των συχνοτήτων και (Β) δεξιά για κάθε μία από τις 6 κατηγορίες τονικού ύψους.



Ας κοιτάξουμε την Εικόνα 4.9. Στο γράφημα αριστερά για τις μέσες τιμές σε κάθε κατηγορία διφωνιών, τα σφάλματα των μέσων τιμών και των ανδρών και των γυναικών είναι μεγάλα και αυτό δείχνει ότι έχουν μεγάλη διασπορά στις μέσες τιμές τους και δεν είναι συγκεντρωμένες γύρω από μία τιμή αλλά είναι διασκορπισμένες και παίρνουν πολλές διαφορετικές τιμές. Τα σφάλματα των γυναικών, φαίνονται λίγο μικρότερα, που σημαίνει ότι παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά. Γενικά οι μέσες τιμές και των δύο ομάδων δεν παρουσιάζουν διαφορές και φαίνεται να έχουν την ίδια αντίληψη των διφωνιών γενικά άσχετα από τον λόγο των συχνοτήτων που έχει η καθεμία.

Στο διάγραμμα των συχνοτήτων παρατηρούμε και εδώ ότι οι διφωνίες με τις υψηλές συχνότητες έχουν χαμηλότερες μέσες τιμές από τις διφωνίες με τις χαμηλές συχνότητες και βλέπουμε ότι και στους άντρες και στις γυναίκες, οι μέσες τιμές τους μειώνονται όσο αυξάνεται το τονικό ύψος. Ακόμα υπάρχει μία μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των μέσων τιμών των δύο υποομάδων, με τους μεν άνδρες να έχουν υψηλότερες τιμές στις χαμηλές συχνότητες και όσο αυξάνεται το τονικό ύψος των ήχων, οι τιμές τους πέφτουν πιο κάτω από αυτές των γυναικών. Δηλαδή σε χαμηλό τονικό ύψος, οι άνδρες είναι κάπως πιο δεκτικοί από τις γυναίκες σε τέτοιους ήχους, ενώ σε υψηλό τονικό ύψος αυτό αλλάζει και αντιστρέφεται και βλέπουμε ότι οι γυναίκες είναι πιο δεκτικές στο άκουσμα τέτοιων συχνοτήτων.

#### 4.3.4 Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών για τις ομάδες άνω των 35 κάτω των 35



**Εικόνα 4.10** Διαγράμματα που απεικονίζουν τις μέσες τιμές των απαντήσεων των ατόμων άνω των 35 ετών (41 άτομα) και κάτω των 35 ετών (29 άτομα) του δείγματος: (A) αριστερά για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών με βάση το λόγο των συχνοτήτων και (B) δεξιά για κάθε μία από τις 6 κατηγορίες τονικού ύψους.

Ας κοιτάξουμε την Εικόνα 4.10. Όπως στα διαγράμματα των εικόνων 4.8 και 4.9 έτσι και εδώ, τα σφάλματα στις μέσες τιμές και των δύο γκρουπ, είναι κάπως μεγάλα, που σημαίνει ότι και σε αυτήν την περίπτωση οι απαντήσεις των δύο ομάδων παρουσιάζουν αρκετή διασπορά και δεν

συγκλίνουν σε μία τιμή γύρω από την οποία παίζουν. Επίσης βλέπουμε ότι γενικά συμφωνούν στο πώς μεταβάλλονται και βλέπουμε, ότι εκεί που ανεβαίνει η μέση τιμή των ατόμων άνω των 35 αντίστοιχα ανεβαίνει και η μέση τιμή των ατόμων κάτω των 35 και βρίσκονται κοντά μεταξύ τους. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει μία συμφωνία στο πόσο αρεστοί είναι οι ήχοι κάθε κατηγορίας. Βεβαίως υπάρχουν και κάποιες κατηγορίες διφωνιών, στις οποίες βλέπουμε ότι διαφοροποιούνται κάπως οι απαντήσεις των δύο ομάδων. Από το Whitney-Mann test, που κάναμε για να συγκρίνουμε τις μέσες τιμές των υποομάδων μεταξύ τους προέκυψαν οι παρακάτω τιμές:

$Z$	Ασυμπτωτική τιμή $p$	Ακριβής τιμή $p$
3.11293	0.00185	0.00113

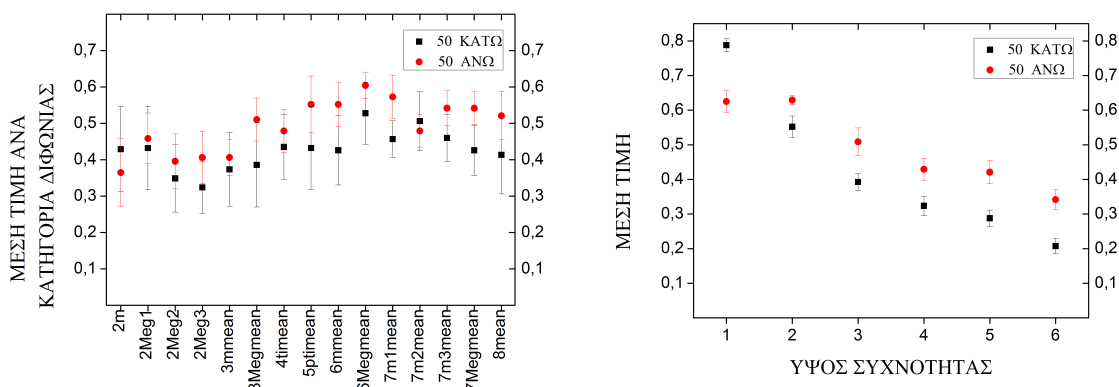
Βλέπουμε ότι οι μέσες τιμές των δύο ομάδων, θεωρούνται στατιστικά σημαντικές με ποσοστό αβεβαιότητας 0.001%, ποσοστό πολύ μικρό βέβαια. Επίσης η τιμή του  $Z$  είναι θετική και μεγάλη, πράγμα που επιβεβαιώνει το γεγονός ότι οι τιμές της ομάδας των ατόμων άνω των 35 βρίσκονται πιο πάνω από τις αντίστοιχες τιμές της άλλης ομάδας. Έτσι προκύπτει από τα παραπάνω ότι σε αυτές τις δύο ομάδες του πληθυσμού υπάρχει μία διαφοροποίηση ως προς τις απαντήσεις τους και κατ' επέκταση τις προτιμήσεις τους.

Από το διάγραμμα συχνοτήτων βλέπουμε ότι οι τιμές της ομάδας άνω των 35 ετών είναι υψηλότερες από αυτές της ομάδας κάτω των 35 σε όλα τα τονικά ύψη και επίσης τα σφάλματα των μέσων τιμών και των δύο γκρουπ είναι μικρά σε σχέση με τις τιμές τους, πράγμα το οποίο δείχνει ότι το μεγαλύτερο μέρος και των δύο πληθυσμών συγκλίνει στην αντίστοιχη μέση τιμή για κάθε συχνότητα. Και σε αυτή την περίπτωση, όπως και τις προηγούμενες, οι τιμές και των δύο ομάδων μειώνονται με την αύξηση του ύψους της συχνότητας των διφωνιών.

#### 4.3.5 Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών για τις ομάδες άνω των 50 και κάτω των 50

Ας κοιτάξουμε την Εικόνα 4.11. Αυτό που παρατηρούμε στο διάγραμμα των κατηγοριών των διφωνιών είναι ότι και οι δύο ομάδες έχουν χαμηλότερες τιμές στα διαστήματα της 2ας και της 3ης σε σχέση με τα υπόλοιπα, ενώ στα διαστήματα της 6ης και της 7ης έχουν αντίστοιχα τις υψηλότερες μέσες τιμές, δηλαδή τις περισσότερες θετικές απαντήσεις. Οι τιμές των 50 και άνω, φαίνονται γενικά να βρίσκονται πιο πάνω από τους 50 και κάτω, ειδικά στα διαστήματα της 5ης, της 6ης μικρή, της 7ης μικρή και της 7ης μεγάλη. Ακολουθούν τα αποτελέσματα του Whitney-Mann test για τη σύγκριση των μέσων τιμών των δύο ομάδων:

$Z$	Ασυμπτωτική τιμή $p$	Ακριβής τιμή $p$
-2.36583	0.01799	0.01587



**Εικόνα 4.11** Διαγράμματα των συνολικών μέσων τιμών των ατόμων άνω των 50 ετών (16 άτομα) και κάτω των 50 ετών (54 άτομα) του δείγματος: (Α) αριστερά για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών με βάση το λόγο των συχνοτήτων και (Β) δεξιά για κάθε μία από τις 6 κατηγορίες τονικού ύψους.

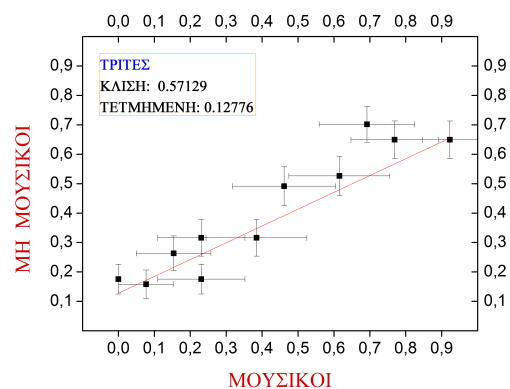
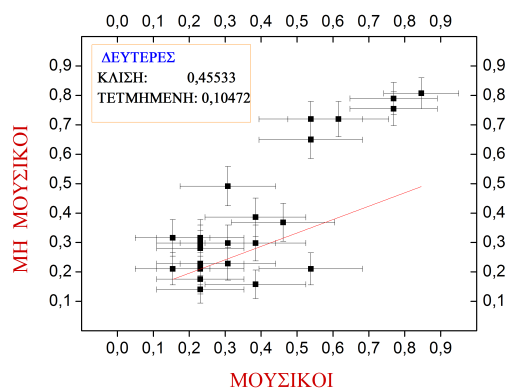
Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του τεστ, οι μέσες τιμές των δύο ομάδων είναι στατιστικά διαφορετικές με ποσοστό αβεβαιότητας 0.016% περίπου, το οποίο είναι μικρό. Επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχουν διαφορές μεταξύ τους και ότι οι δύο ομάδες δεν συμφωνούν γενικά στο πώς θα χαρακτηρίζαν τις διφωνίες ως προς το άκουσμά τους, αν είναι ευχάριστο ή όχι. Ακόμα η τιμή του  $Z$  είναι αρνητική, πράγμα το οποίο δείχνει, ότι οι τιμές της β' ομάδας, που στην περίπτωση μας είναι αυτή των ατόμων άνω των 50 ετών, είναι γενικά πιο υψηλές από τις τιμές της α' ομάδας (άτομα κάτω των 50 ετών). Αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα αριστερά, καθώς παρατηρούμε ότι στις περισσότερες κατηγορίες διφωνιών, τα κόκκινα σημεία, που αναπαριστούν την ομάδα των άνω των 50, βρίσκονται πιο πάνω από τα μαύρα σημεία, που αναπαριστούν τα άτομα κάτω των 50 ετών.

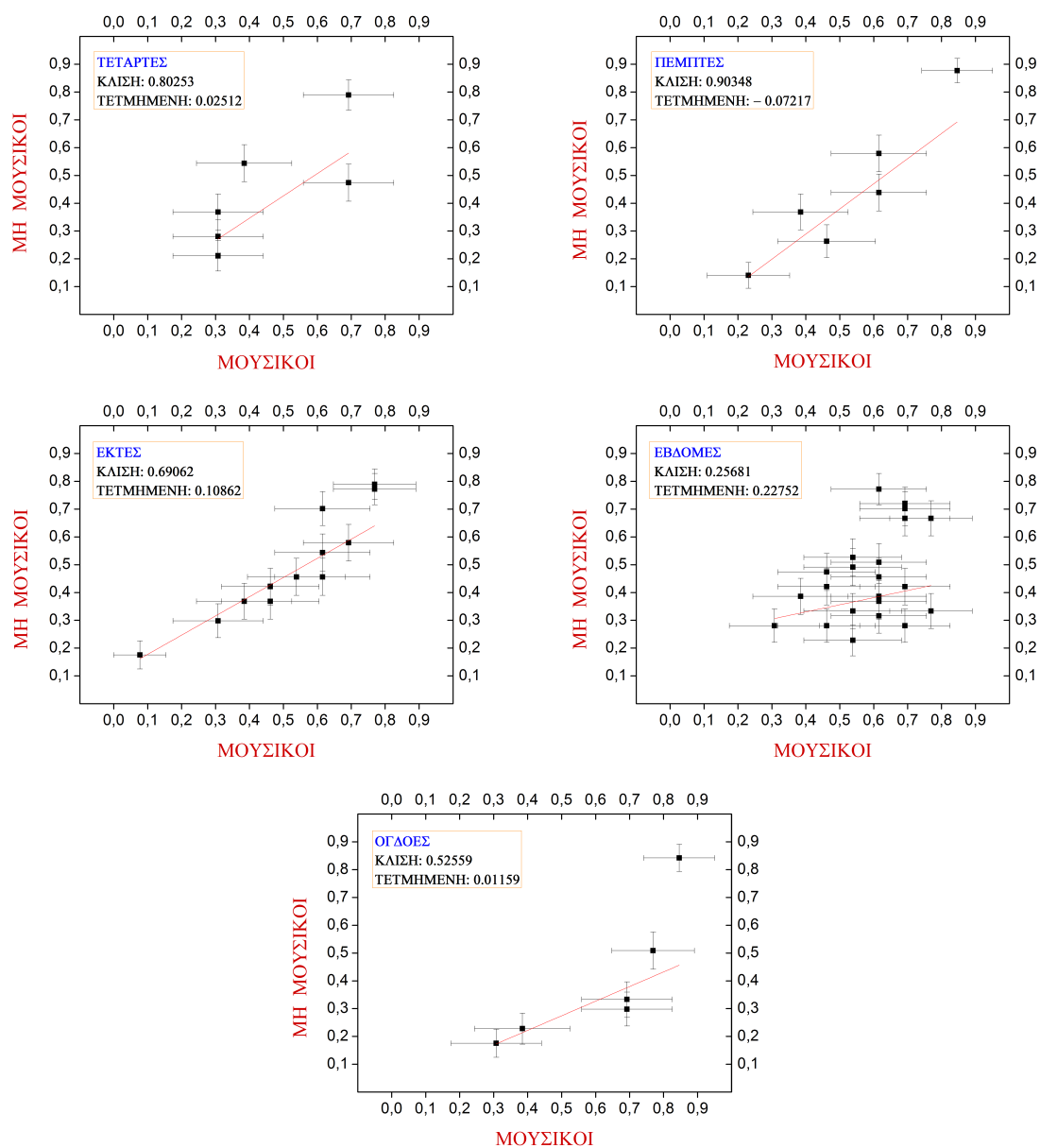
Στο διάγραμμα με τις συχνότητες βλέπουμε ότι οι μέσες τιμές των ατόμων άνω των 50 είναι πιο υψηλές από αυτές των ατόμων κάτω των 50, εκτός από τη χαμηλότερη συχνότητα (1) στην οποία συμβαίνει το αντίθετο. Μάλιστα η μέση τιμή της ομάδας κάτω των 50, είναι αρκετά υψηλή για το χαμηλότερο τονικό ύψος (0.8), που έχουν οι διφωνίες. Στη συνέχεια, οι τιμές τους πέφτουν όσο αυξάνεται η συχνότητα των διφωνιών και φτάνουν στην πιο μεγάλη συχνότητα να έχουν τιμή 0.2. Οι τιμές των ατόμων άνω των 50 ξεκινάνε από την τιμή 0.6 για τη χαμηλότερη τονικό ύψος και φτάνουν μέχρι το 0.3 για το μεγαλύτερο τονικό ύψος. Επομένως εμφανίζουν μια πιο ομαλή μεταβολή από αυτή των ατόμων κάτω των 50, οι οποίες μέσες τιμές τους μειώνονται πιο έντονα με την αύξηση της συχνότητας.

## 4.4 Διαγράμματα X-Y για τη σύγκριση των μέσων τιμών των υποομάδων του συνόλου

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μορφής X-Y, όπου στον οριζόντιο άξονα  $x$  βρίσκονται οι μέσες τιμές της πρώτης υποομάδας του δείγματος, ενώ στον κάθετο άξονα  $y$ , βρίσκονται οι μέσες τιμές της δεύτερης υποομάδας του δείγματος. Έτσι φτιάχνουμε διαγράμματα με τη μορφή της εξίσωσης  $y = Ax + B$ , όπου  $A$  η κλίση της ευθείας και  $B$  η τετμημένη της ευθείας στον άξονα  $y$ . Η ευθεία αυτή κατασκευάζεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και μας δείχνει τη σχέση που έχουν μεταξύ τους οι μέσες τιμές των δύο υποομάδων, με σκοπό να δούμε κατά πόσο αυτές είναι περίπου ίσες μεταξύ τους, ή εάν υπάρχει διαφορά και κάποια από τις 2 υποομάδες έχει αισθητά μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές. Αυτό το καταλαβαίνουμε από την κλίση που έχει η ευθεία σε συνδυασμό με την τετμημένη. Όταν η κλίση της ευθείας έχει τιμή κοντά στο 1 και η τετμημένη είναι πολύ κοντά στο 0, τότε η ευθεία είναι η  $y = x$  και επομένως μέσες τιμές των δύο υποομάδων έχουν αναλογική σχέση μεταξύ τους. Τα διαφορετικά σημεία αντιστοιχούν σε μία διαφορετική διφωνία κάθε φορά, από το σύνολο των διφωνιών που αποτελούν την κάθε κατηγορία π.χ. για την οκτάβα 6 σημεία, που αντιστοιχούν στις διφωνίες: 8va1, 8va2, 8va3, 8va4, 8va5 και 8va6. Στις κατηγορίες των διφωνιών που έχουμε διαστήματα μικρά και μεγάλα τα έχουμε βάλει στο ίδιο διάγραμμα. Έτσι π.χ. στις τρίτες έχουμε 12 σημεία αφού είναι 6 διφωνίες για τις 3ες μικρές και 6 διφωνίες για τις μεγάλες. Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν έναν άλλο τρόπο για να συγκρίνουμε τις προτιμήσεις μεταξύ των εκάστοτε υποομάδων του συνόλου σε κάθε κατηγορία διφωνίας ξεχωριστά.

### 4.4.1 Διαγράμματα X-Y για τις ομάδες μουσικών και μη μουσικών





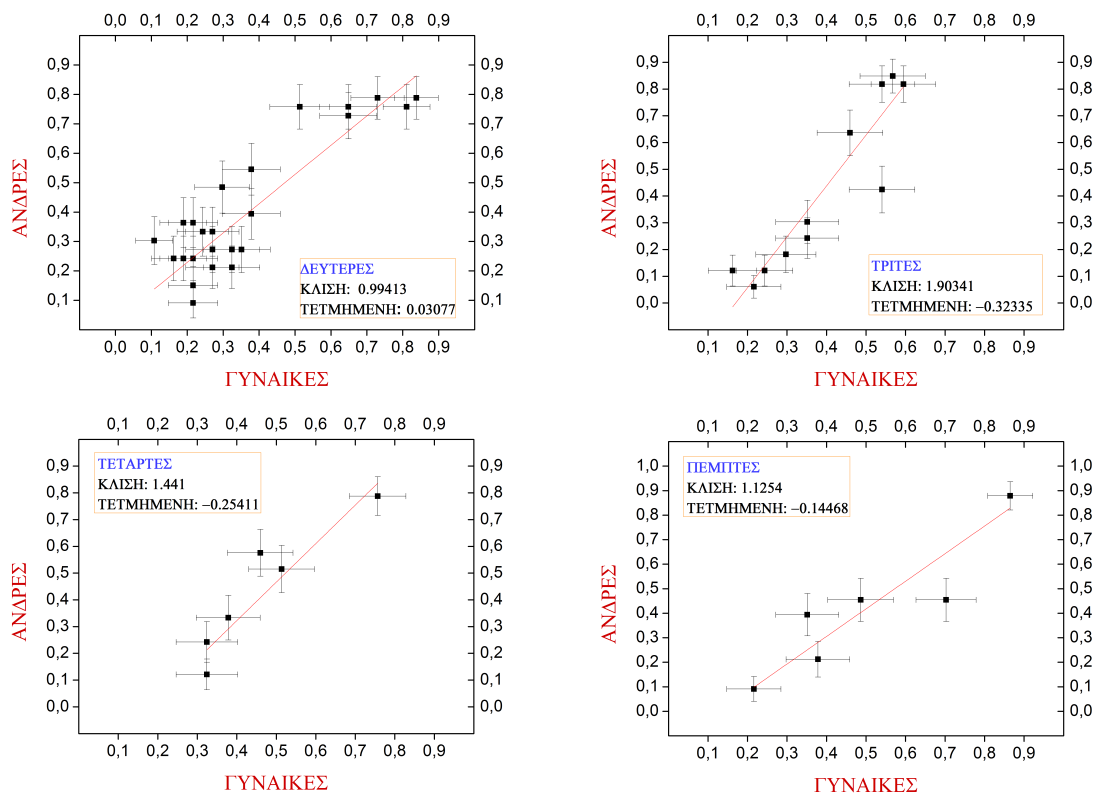
**Εικόνα 4.12** Διαγράμματα X-Y για τη σύγκριση των απαντήσεων των ομάδων των μουσικών και των μη μουσικών. Έχουμε βάλει στον άξονα x τις μέσες τιμές των μουσικών και στον άξονα y τις μέσες τιμές των μη μουσικών του δείγματός μας. Γενικά η κλίση σε όλες τις ευθείες είναι μικρότερη του 1 που σημαίνει ότι η προτίμηση των διφωνιών φαίνεται να είναι μεγαλύτερη στους μουσικούς παρά στους μη μουσικούς. Αυτό το καταλαβαίνουμε και από τη μορφή της ευθείας η οποία προσεγγίζει στα περισσότερα διαγράμματα τον άξονα x, δηλαδή αυτόν με τις μέσες τιμές των μουσικών.

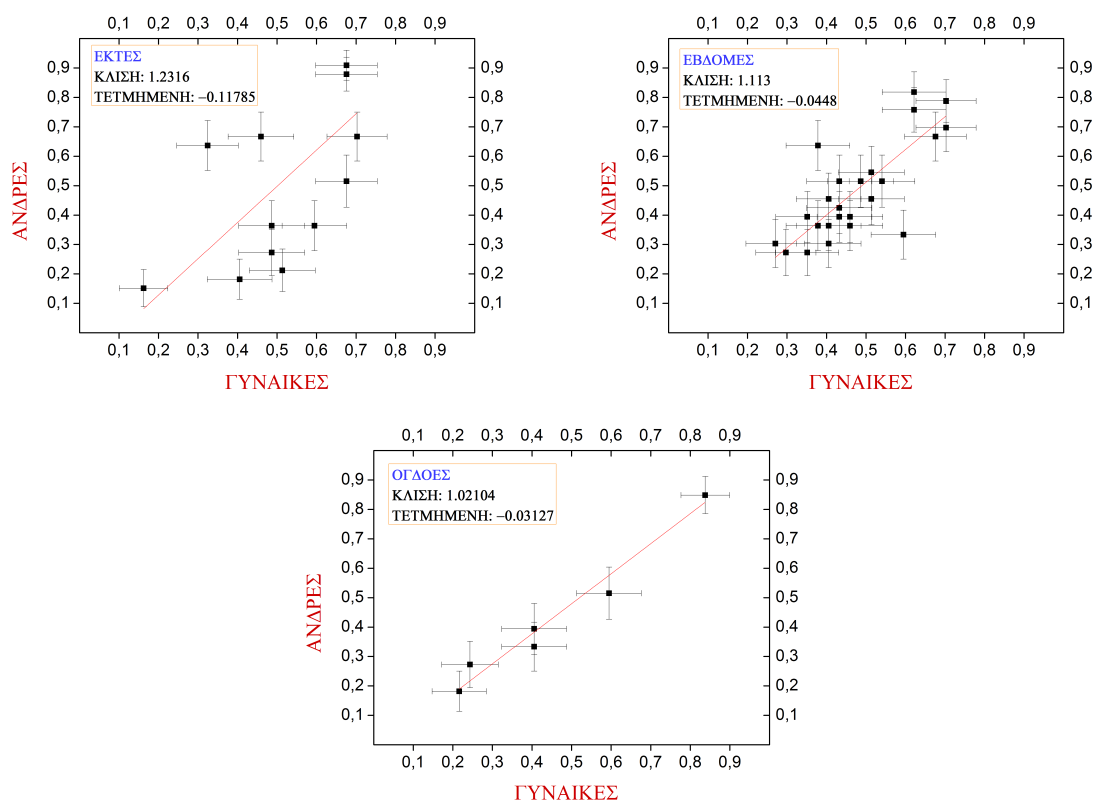
Στην εικόνα 4.12 έχουμε βάλει στον άξονα x τις μέσες τιμές των μουσικών και στον άξονα y τις μέσες τιμές των μη μουσικών του δείγματός μας. Αυτό το έχουμε κάνει για κάθε ένα από τα διαστήματα των διφωνιών συμπεριλαμβάνοντας τις μέσες τιμές των απαντήσεων για τα μικρά

και τα μεγάλα μαζί στις εξής κατηγορίες: 2ας, 3ης, 6ης και 7ης. Γενικά η κλίση σε όλες τις ευθείες είναι μικρότερη του 1, πράγμα που σημαίνει ότι η προτίμηση των διφωνιών φαίνεται να είναι μεγαλύτερη στους μουσικούς παρά στους μη μουσικούς. Αυτό το καταλαβαίνουμε και από τη μορφή της ευθείας η οποία προσεγγίζει στα περισσότερα διαγράμματα τον άξονα  $x$ , δηλαδή αυτόν με τις μέσες τιμές των μουσικών.

Ειδικότερα στα διαστήματα της 2ας, της 3ης, της 7ης και της 8ης βλέπουμε ότι η κλίση της ευθείας παίρνει τιμές κάτω από το 0.6 και επομένως στα διαστήματα αυτά οι μέσες τιμές των μουσικών είναι πιο μεγάλες. Ειδικά στο διάστημα της 2ας η κλίση είναι μόλις 0.27, άρα σαν κατηγορία έχει προτίμηση στους μουσικούς σε σχέση με τους μη μουσικούς. Τέλος στα διαστήματα της 4ης και της 5ης η προτίμηση φαίνεται να είναι η ίδια και στις δύο υποομάδες, καθώς η μεν κλίση των ευθειών είναι κοντά στο 1 (0.8 στις 4ες και 0.9 στις 5ες), η δε τετμημένη στον άξονα  $y$  είναι και αυτή κοντά στο 0 (0.025 για τις 4ες και  $-0.07$  για τις πέμπτες). Επομένως υπάρχει μία ίδια αντίληψη για τα διαστήματα αυτά και από τους μουσικούς και από τους μη μουσικούς.

#### 4.4.2 Διαγράμματα X-Y για τις ομάδες ανδρών και γυναικών



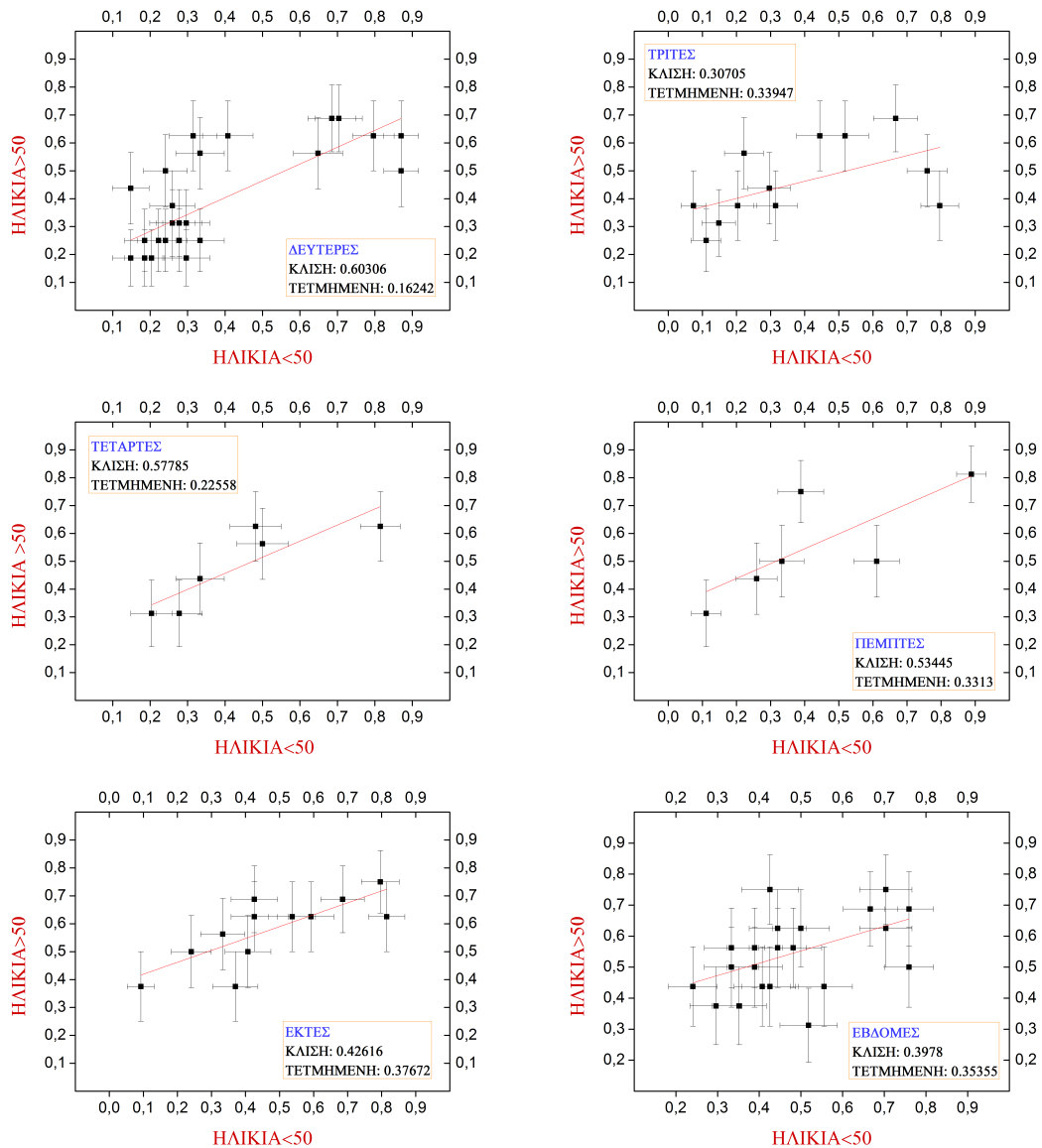


**Εικόνα 4.13** Διαγράμματα X-Y με τις μέσες τιμές των γυναικών στον άξονα  $x$  και τις μέσες τιμές των ανδρών στον άξονα  $y$ . Στα διαστήματα της 2ας η προτίμηση και των δύο ομάδων φαίνεται να είναι η ίδια αφού, τόσο η κλίση της ευθείας έχει τιμή πολύ κοντά στο 1 όσο και η τετμημένη στον άξονα  $y$  έχει τιμή πολύ κοντά στο  $(0,0)$ . Στα υπόλοιπα διαστήματα οι μέσες τιμές των ανδρών φαίνεται να είναι μεγαλύτερες των γυναικών, καθώς σε όλες τις ευθείες οι κλίσεις τους είναι μεγαλύτερες από το 1.

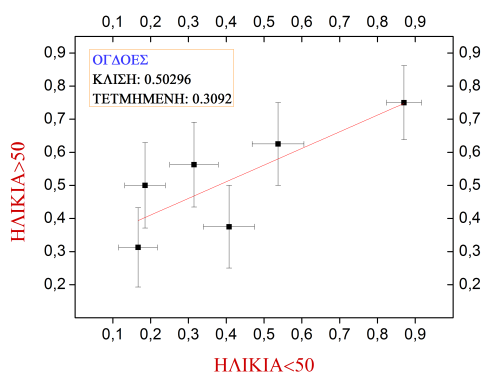
Στα παρακάτω διαγράμματα 4.13, όπως και σε αυτά της εικόνας 4.12, έχουμε βάλει στον άξονα  $x$  τις μέσες τιμές των γυναικών και στον άξονα  $y$  τις μέσες τιμές των ανδρών για να συγκρίνουμε τις προτιμήσεις των δύο ομάδων μεταξύ τους με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Στα διαστήματα της 2ας η προτίμηση και των δύο ομάδων φαίνεται να είναι η ίδια και αυτό το συμπεραίνουμε, τόσο από την κλίση της ευθείας η οποία είναι πολύ κοντά στο 1, όσο και από την τετμημένη στον άξονα  $y$  η οποία είναι πολύ κοντά στο  $(0,0)$ . Επομένως η ευθεία αυτή είναι σχεδόν ίδια με την  $y = x$ . Το ίδιο παρατηρούμε και στα διαστήματα της 8ης, όπου η κλίση της ευθείας είναι 1.02 και η τετμημένη στον άξονα  $y$  είναι  $-0.03$ . Στα υπόλοιπα διαστήματα οι μέσες τιμές των ανδρών φαίνεται να είναι μεγαλύτερες των γυναικών, καθώς σε όλες τις ευθείες έχουμε κλίσεις με τιμές οι οποίες είναι μεγαλύτερες από το 1, πράγμα το οποίο δείχνει ότι οι ευθείες προσεγγίζουν τον άξονα  $y$ . Ειδικά στα διαστήματα της 3ης και της 4ης οι ευθείες έχουν κλίσεις περίπου 1.5, οι οποίες είναι οι μεγαλύτερες από αυτές όλων των ευθειών και επομένως σε αυτά τα διαστήματα οι άνδρες φαίνεται να έχουν τη μεγαλύτερη προτίμηση σε σύγκριση με τις γυναίκες.

### 4.4.3 Διαγράμματα X-Y για τις ομάδες ατόμων με ηλικίες άνω των 50 και ατόμων με ηλικίες κάτω των 50 ετών

Σε αυτά τα διαγράμματα έχουμε δημιουργήσει με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, ευθείες της μορφής  $y = ax + b$ , με τιμές για το  $x$  τις μέσες τιμές των ατόμων κάτω των 50 ετών και με τιμές για το  $y$  τις μέσες τιμές των ατόμων πάνω των 50 ετών.





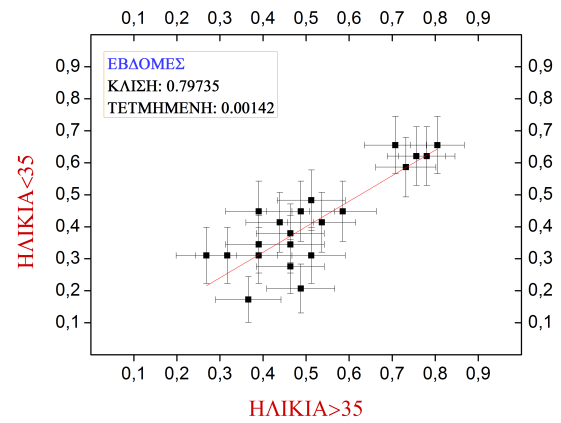
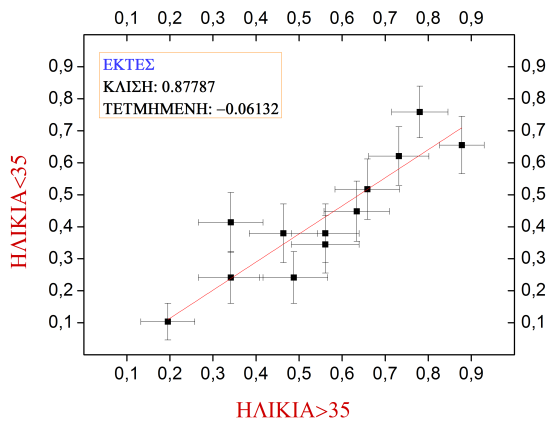
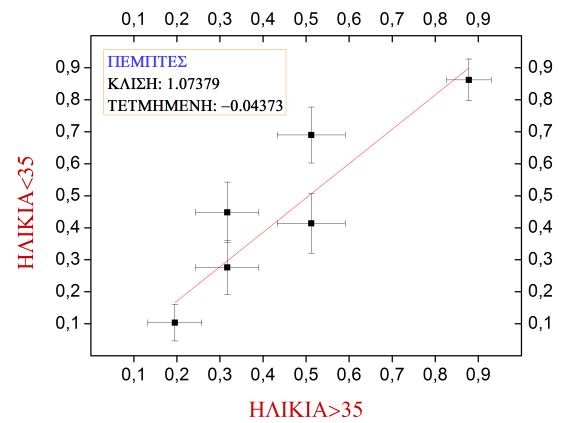
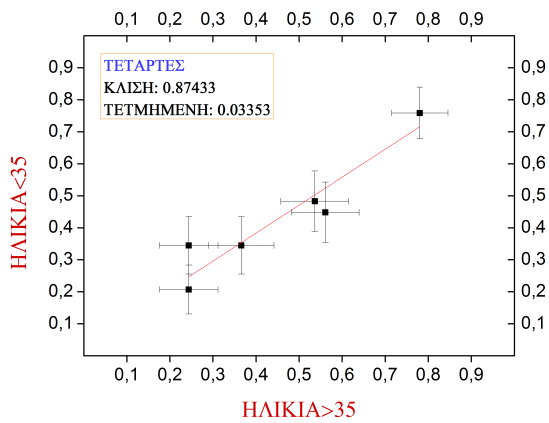
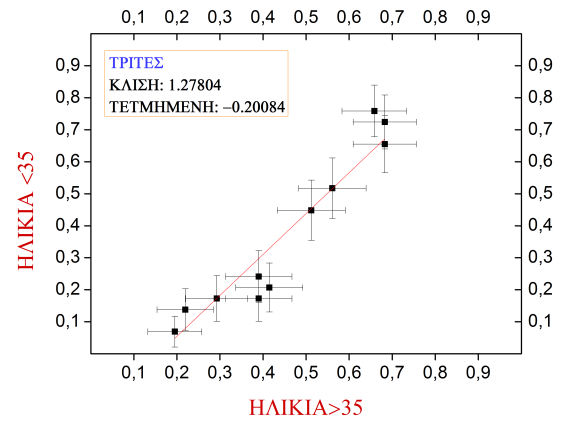
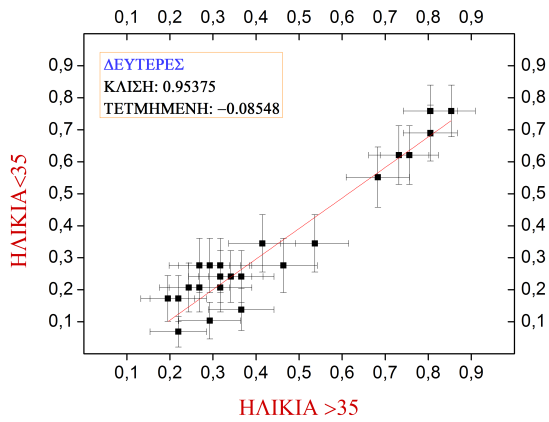


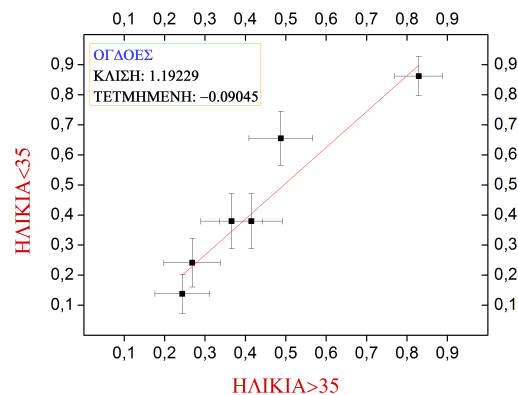
**Εικόνα 4.14** Διαγράμματα X-Y για τις ηλικιακές ομάδες ατόμων άνω των 50 ετών και κάτω των 50 ετών του δείγματος. Στον άξονα  $x$  έχουμε τις μέσες τιμές των κάτω των 50, ενώ στον  $y$  των άνω των 50. Από ότι φαίνεται οι μέσες τιμές των ατόμων άνω των 50 είναι μεγαλύτερες από αυτές των ατόμων κάτω των 50. Αυτό το συμπεραίνουμε από το γεγονός ότι η τεταγμένη στον άξονα  $y$  είναι σχετικά μεγάλη στις περισσότερες ευθείες και είναι περίπου στο 0.34. Οι κλίσεις των ευθειών γενικά είναι μικρότερες του 1, οπότε δεν έχουν αναλογική σχέση οι μέσες τιμές των δύο ομάδων, ενώ οι ευθείες προσεγγίζουν πιο πολύ τον άξονα των  $x$ .

Από ότι φαίνεται οι μέσες τιμές των ατόμων άνω των 50 είναι μεγαλύτερες από αυτές των ατόμων κάτω των 50. Αυτό το συμπεραίνουμε από το γεγονός ότι η τεταγμένη στον άξονα  $y$  είναι σχετικά μεγάλη στις περισσότερες ευθείες και είναι περίπου στο 0.34. Επομένως για  $x=0$  η ελάχιστη τιμή, που παίρνουμε για το  $y$  είναι αυτή και όλες οι άλλες τιμές των ατόμων πάνω των 50 ετών θα βρίσκονται σίγουρα πάνω από αυτήν. Οι κλίσεις των ευθειών γενικά είναι μικρότερες του 1, οπότε δεν έχουν αναλογική σχέση οι μέσες τιμές των δύο ομάδων, ενώ οι ευθείες προσεγγίζουν πιο πολύ τον άξονα των  $x$ .

#### 4.4.4 Διαγράμματα X-Y για τις ομάδες ατόμων με ηλικίες άνω των 35 και ατόμων με ηλικίες κάτω των 35 ετών

Στα διαγράμματα τα οποία ακολουθούν, οι μέσες τιμές των ατόμων του δείγματος άνω των 35 ετών βρίσκονται στον άξονα  $x$ , ενώ των ατόμων κάτω των 35 ετών στον άξονα  $y$ . Έτσι με την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, όπως και για τις υπόλοιπες υποομάδες του δείγματος των οποίων τις μέσες τιμές θέλουμε να συγκρίνουμε μεταξύ τους, παίρνουμε τις ευθείες που φαίνονται με κόκκινο χρώμα στα διαγράμματα.





**Εικόνα 4.15** Διαγράμματα X-Y για τις ομάδες των ατόμων με ηλικίες άνω των 35 ετών και των ατόμων με ηλικίες κάτω των 35 του δείγματος. Στον άξονα x βρίσκονται οι μέσες τιμές των άνω των 35 και στον άξονα y των ατόμων κάτω των 35. Αυτή που φαίνεται να προσεγγίζει την ευθεία  $y = ax$  είναι η ευθεία στα διαστήματα της 5ης. Σε κάποιες κατηγορίες διφωνιών υπάρχει προτίμηση στους άνω των 35, όπως για παράδειγμα στις 6ες και τις 7ες, ενώ στις 8ες, η προτίμηση φαίνεται να είναι μεγαλύτερη για τα άτομα κάτω των 35, αφού εκεί η ευθεία προσεγγίζει τον x.

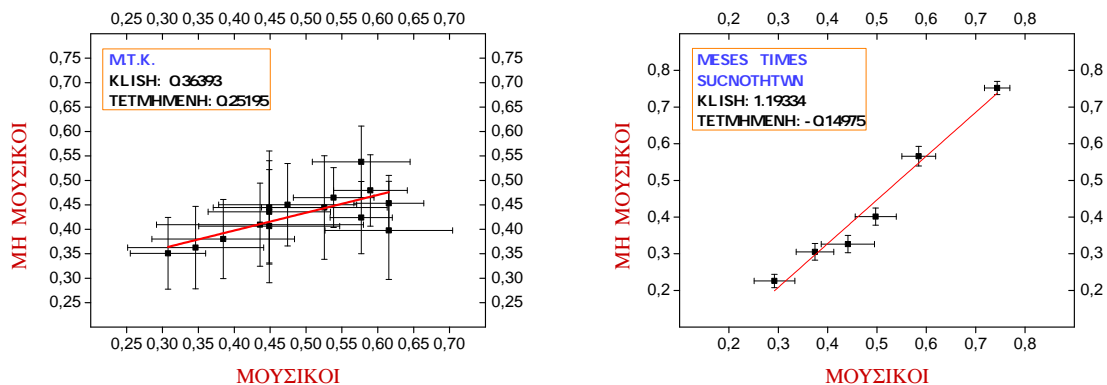
Από τις ευθείες, που απεικονίζονται στα διαγράμματα αυτή που φαίνεται να προσεγγίζει την ευθεία  $y = ax$  είναι η ευθεία στα διαστήματα της 5ης. Επομένως σε αυτή την κατηγορία διφωνιών οι δύο ομάδες φαίνεται να έχουν μία παρόμοια αντίληψη και να συμφωνούν. Στις υπόλοιπες κατηγορίες δεν φαίνεται να έχουν σύγκλιση ως προς τις απαντήσεις τους. Σε άλλες υπάρχει προτίμηση στους άνω των 35, όπως για παράδειγμα στα διαστήματα της 6ης και της 7ης, όπου η κλίσεις των αντίστοιχων ευθειών είναι μικρότερες του 1 και άρα προσεγγίζουν τον άξονα των x. Σε άλλες κατηγορίες διφωνιών όπως στις 8ες η προτίμηση φαίνεται να είναι μεγαλύτερη για τα άτομα κάτω των 35, αφού η κλίση της αντίστοιχης ευθείας είναι μεγαλύτερη του 1 και άρα η ευθεία προσεγγίζει τον άξονα των y.

## 4.5 Διαγράμματα για τις μέσες τιμές κάθε κατηγορίας διφωνίας και διαγράμματα για τις μέσες τιμές κάθε κατηγορίας συχνότητας

Στα επόμενα διαγράμματα έχουμε δημιουργήσει με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ευθείες με τις συνολικές μέσες τιμές της μιας ομάδας του δείγματος στον άξονα x και τις συνολικές μέσες τιμές της άλλης ομάδας στον άξονα y. Αυτή τη φορά έχουμε δημιουργήσει δύο διαφορετικά διαγράμματα για κάθε περίπτωση. Στο πρώτο έχουμε χρησιμοποιήσει τις συνολικές μέσες τιμές των ομάδων, δηλαδή τις μέσες τιμές που προκύπτουν από όλες τις συχνότητες για κάθε κατηγορία διφωνίας. Στο δεύτερο έχουμε χρησιμοποιήσει πάλι τις συνολικές μέσες τιμές των ομάδων αλλά

για κάθε μία συχνότητα διφωνιών από τις 6 ξεχωριστά κατά φθίνον τονικό ύψος, δηλαδή από τις υψηλές συχνότητες προς τις χαμηλές. Έτσι στην πρώτη περίπτωση συγκρίνουμε την προτίμηση των ομάδων σε σχέση με την κατηγορία της διφωνίας, ενώ στη δεύτερη την προτίμησή τους σε σχέση με το τονικό ύψος των διφωνιών. Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν μία γενική εικόνα για τις μέσες τιμές των απαντήσεων των ομάδων και είναι ένας τρόπος να κάνουμε μία επισκόπηση των αποτελεσμάτων ως προς την γενική προτίμηση στις διφωνίες, αλλά και ως προς το τονικό τους ύψος.

#### 4.5.1 Διαγράμματα γενικής εικόνας για τις ομάδες του δείγματος των μουσικών και των μη μουσικών



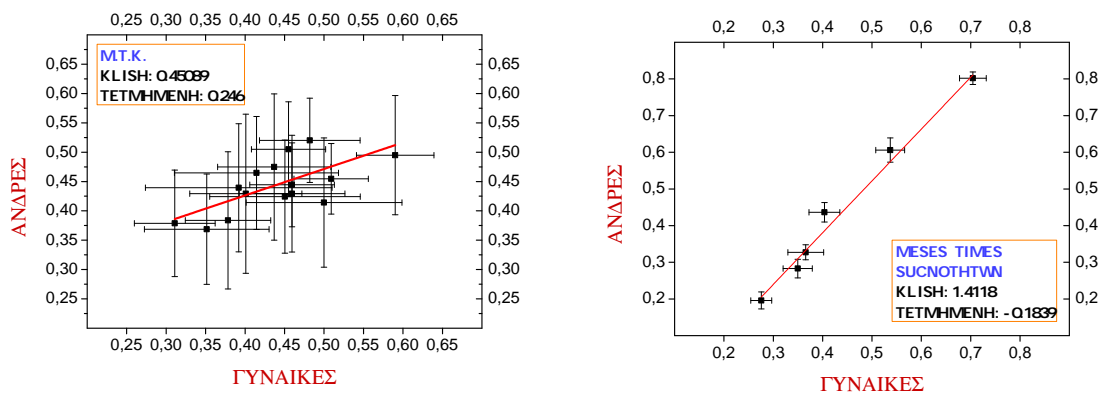
**Εικόνα 4.16** Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών για τις ομάδες των μουσικών και των μη μουσικών. Αριστερά: Τα διαφορετικά σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικές κατηγορίες διφωνιών (δευτέρα μικρή, δευτέρα μεγάλη, δείτε τον Πίνακα 4.1) με τον άξονα  $x$  να αντιπροσωπεύει μέσες τιμές προτιμήσεων για μουσικούς και τον άξονα  $y$  να αντιπροσωπεύει μέσες τιμές προτιμήσεων για μη μουσικούς. Δεξιά: Τα διαφορετικά σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικό τονικό ύψος κατά φθίνουσα σειρά, δηλαδή ξεκινάμε από τις υψηλότερες συχνότητες και συνεχίζουμε προς τις χαμηλότερες. Βλέπουμε ότι και στις δύο ομάδες οι υψηλότερες συχνότητες έχουν χαμηλές τιμές και όσο προχωράμε σε πιο χαμηλά τονικά ύψη οι τιμές και των δύο ομάδων ανεβαίνουν.

Στην Εικόνα 4.16 συγκρίνουμε τις ομάδες των μουσικών και των μη μουσικών με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Αριστερά: Τα διαφορετικά σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικές κατηγορίες διφωνιών (δευτέρα μικρή, δευτέρα μεγάλη, δείτε τον Πίνακα 4.1) με τον άξονα  $x$  να αντιπροσωπεύει μέσες τιμές προτιμήσεων για μουσικούς και τον άξονα  $y$  να αντιπροσωπεύει μέσες τιμές προτιμήσεων για μη μουσικούς. Παρατηρούμε ότι οι τιμές των μουσικών είναι μεγαλύτερες από των μη μουσικών κάτι το οποίο φαίνεται από την κλίση της ευθείας η οποία είναι μικρότερη του 1 αρκετά και επομένως προσεγγίζει τον άξονα  $x$ . Επομένως φαίνεται να υπάρχει μία μεγαλύτερη προτίμηση των ήχων από την ομάδα των μουσικών. Δεξιά: Τα διαφορετικά σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικό τονικό ύψος κατά φθίνουσα σειρά, δηλαδή ξεκινάμε από τις υψηλότερες συχνότητες

και συνεχίζει προς τις χαμηλότερες. Βλέπουμε ότι και στις δύο ομάδες οι υψηλότερες συχνότητες έχουν χαμηλές τιμές και όσο προχωράμε σε πιο χαμηλά τονικά ύψη οι τιμές και των δύο ομάδων ανεβαίνουν. Η ευθεία έχει κλίση μεγαλύτερη του 1 και επομένως προσεγγίζει τον άξονα των μη μουσικών. Φαίνεται δηλαδή να υπάρχει μία παραπάνω προτίμηση στους μη μουσικούς στα μικρότερα τονικά ύψη.

#### 4.5.2 Διαγράμματα γενικής εικόνας για τις ομάδες του δείγματος των ανδρών και των γυναικών

Παρακάτω ακολουθούν διαγράμματα αντίστοιχα με αυτά της εικόνας 4.16 για τους άνδρες και τις γυναίκες του δείγματος.

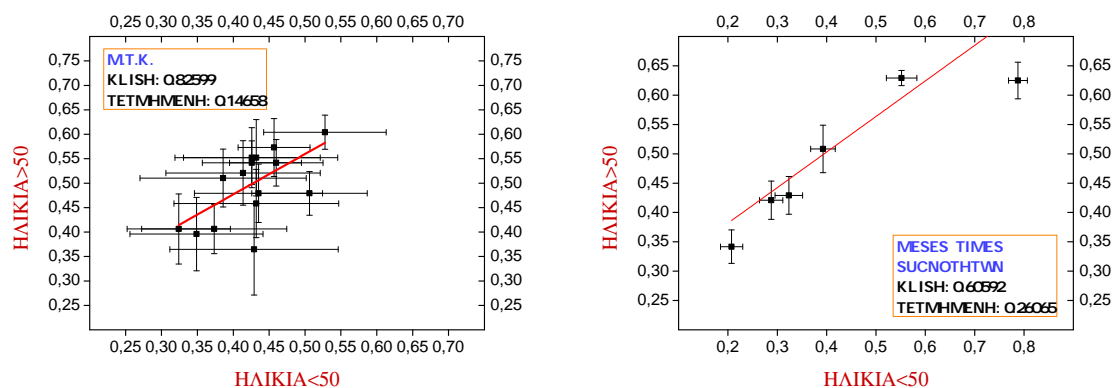


**Εικόνα 4.17** Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών για τις ομάδες των ανδρών και των γυναικών του δείγματος. Αριστερά είναι οι συνολικές μέσες τιμές για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών του πειράματος. Παρατηρούμε ότι γενικά οι συνολικές μέσες τιμές των γυναικών είναι μεγαλύτερες από αυτές των ανδρών, πράγμα το οποίο φαίνεται από την ευθεία η οποία προσεγγίζει τον άξονα των γυναικών (άξονα  $x$ ). Δεξιά: έχουμε τα διαγράμματα με τις συνολικές μέσες τιμές για τις συχνότητες των διφωνιών κατά φθίνουσα σειρά τονικού ύψους. Γενικά η προτίμηση των ανδρών για τα περισσότερα τονικά ύψη φαίνεται να είναι μεγαλύτερη από αυτήν των γυναικών αν συγκρίνουμε τις τιμές .

Στο διάγραμμα αριστερά απεικονίζονται οι συνολικές μέσες τιμές των ανδρών στον άξονα  $y$  και οι συνολικές μέσες τιμές των γυναικών στον άξονα των  $x$  και με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει η ευθεία με κόκκινο χρώμα. Παρατηρούμε ότι γενικά οι τιμές των γυναικών είναι μεγαλύτερες από αυτές των ανδρών, πράγμα το οποίο φαίνεται από την κλίση της ευθείας, η οποία είναι 0.45 και επομένως προσεγγίζει τον άξονα των γυναικών (άξονα  $x$ ). Δεξιά: έχουμε τα διαγράμματα με τις συνολικές μέσες τιμές των ανδρών στον άξονα  $x$  και των γυναικών στον άξονα  $y$  για τις συχνότητες των διφωνιών κατά φθίνουσα σειρά τονικού ύψους. Παρατηρούμε ότι γενικά στα περισσότερα τονικά ύψη η προτίμηση των ανδρών είναι μεγαλύτερη από αυτή των γυναικών

του δείγματος και αυτό φαίνεται από την κλίση της ευθείας που είναι μεγαλύτερη του 1, αλλά και από τις τιμές τους που γενικά είναι μεγαλύτερες από των γυναικών.

#### 4.5.3 Διαγράμματα γενικής εικόνας για τις ομάδες του δείγματος ηλικίας άνω των 50 ετών και κάτω των 50 ετών

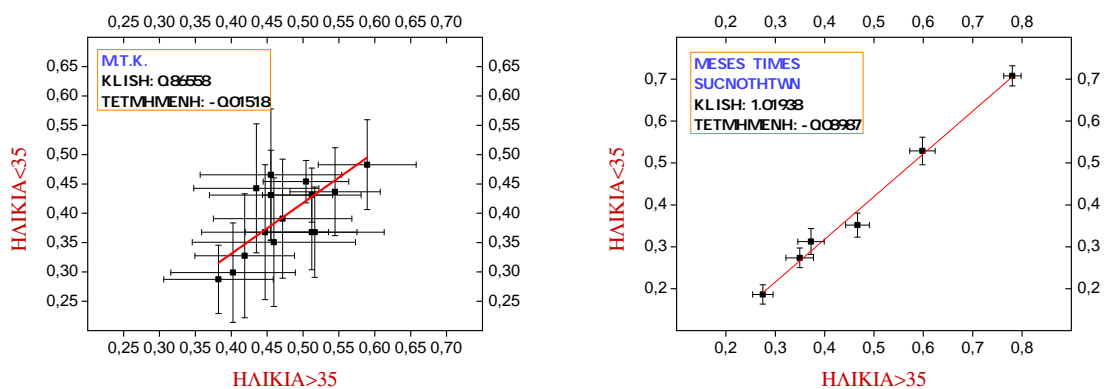


**Εικόνα 4.18** Τα διαγράμματα είναι παρόμοια με αυτά της εικόνας 4.17 με τις συνολικές μέσες τιμές των ατόμων άνω των 50 να βρίσκονται στον άξονα  $y$  και των ατόμων κάτω των 50 ετών να βρίσκονται στον άξονα  $x$ . Αριστερά έχουμε την εικόνα με τις συνολικές μέσες τιμές και των δύο ομάδων για όλες τις κατηγορίες των διφωνιών. Αυτό που βλέπουμε είναι ότι οι τιμές των άνω των 50 είναι γενικά πιο μεγάλες από των κάτω των 50, καθώς η κόκκινη γραμμή εκτείνεται για τιμές του άξονα  $y$  από την τιμή 0.4 μέχρι την 0.6 περίπου. Δεξιά έχουμε τις συνολικές μέσες τιμές των δύο ομάδων για τις διαφορετικές συχνότητες των διφωνιών ξεκινώντας με τις υψηλές συχνότητες και προχωρώντας προς τα δεξιά του άξονα να κατεβαίνουμε τονικό ύψος. Παρατηρούμε ότι η θέση της ευθείας είναι αρκετά προς τα πάνω το οποίο δείχνει ότι γενικά οι τιμές για την ομάδα των ατόμων άνω των 50 είναι υψηλές σε σχέση με τις τιμές των κάτω των 50.

Τα παραπάνω διαγράμματα είναι παρόμοια με αυτά της εικόνας 4.17 με τις συνολικές μέσες τιμές των ατόμων άνω των 50 να βρίσκονται στον άξονα  $y$  και τις συνολικές μέσες τιμές των ατόμων κάτω των 50 ετών να βρίσκονται στον άξονα  $x$ . Αριστερά έχουμε την εικόνα με τις συνολικές μέσες τιμές και των δύο ομάδων για όλες τις κατηγορίες των διφωνιών. Αυτό που βλέπουμε είναι ότι οι τιμές των ατόμων άνω των 50 ετών είναι γενικά πιο μεγάλες από των γυναικών, καθώς η κόκκινη γραμμή εκτείνεται για τιμές του άξονα  $y$  από την τιμή 0.4 μέχρι την 0.6 περίπου. Στον άξονα  $x$  βλέπουμε για τα άτομα κάτω των 50 ετών, ότι οι τιμές που περιλαμβάνει η ευθεία εκτείνονται από την τιμή 0.3 περίπου μέχρι την τιμή 0.53. Η κλίση της ευθείας δείχνει λοιπόν ότι οι τιμές των ατόμων κάτω των 50 ετών έχουν μεγαλύτερο εύρος και για αυτό η ευθεία είναι πιο κοντά προς τον άξονα  $x$ . Δεξιά έχουμε τις συνολικές μέσες τιμές των δύο ομάδων για τις διαφορετικές συχνότητες των διφωνιών με τις υψηλότερες συχνότητες να βρίσκονται στην αρχή των αξόνων και όσο προχωράμε να κατεβαίνουμε τονικό ύψος. Παρατηρούμε ότι η θέση της ευθείας είναι αρκετά

προς τα πάνω το οποίο δείχνει ότι γενικά οι τιμές για την ομάδα των ατόμων άνω των 50 είναι υψηλές σε σχέση με τις τιμές των κάτω των 50. Από την κλίση της ευθείας συμπεραίνουμε ότι αυτή προσεγγίζει πιο πολύ τον άξονα των  $x$  και αυτό δείχνει ότι η ομάδα των κάτω των 50 έχει υψηλότερες τιμές για τις χαμηλότερες συχνότητες από αυτές της ομάδας άνω των 50 ετών.

#### 4.5.4 Διαγράμματα γενικής εικόνας για τις ομάδες του δείγματος ηλικίας άνω των 35 ετών και κάτω των 35 ετών



**Εικόνα 4.19** Διαγράμματα μέσων τιμών συνολικά για τις ηλικιακές ομάδες των ατόμων άνω των 35 και των ατόμων κάτω των 35 του δείγματός μας. Αριστερά βλέπουμε τις συνολικές μέσες των ατόμων άνω των 35 ετών στον άξονα  $x$  και τις συνολικές μέσες τιμές των ατόμων κάτω των 35 ετών στον άξονα  $y$  για το σύνολο των 15 κατηγοριών των ήχων του πειράματος. Παρατηρούμε ότι η ευθεία έχει κλίση 0.85, που σημαίνει ότι βρίσκεται πιο κοντά στον άξονα των  $x$ , δηλαδή στον άξονα που έχουμε τις τιμές για τους άνω των 35. Επομένως αυτή η ηλικιακή ομάδα δείχνει να έχει κάπως μεγαλύτερη προτίμηση στις διφωνίες γενικά. Δεξιά έχουμε το διάγραμμα με τις συνολικές μέσες τιμές των δύο ομάδων για τα διάφορα τονικά ύψη ξεκινώντας με τα υψηλότερα και καταλήγοντας με τα χαμηλότερα. Αυτό που φαίνεται από το διάγραμμα είναι μία κάπως αναλογική σχέση μεταξύ των μέσων τιμών των δύο ομάδων το οποίο φαίνεται και από την κλίση της, που είναι 1 αλλά και την τεταγμένη της ευθείας στον άξονα  $y$  η οποία είναι κοντά στο 0.

Αριστερά βλέπουμε τις συνολικές μέσες των ατόμων άνω των 35 ετών στον άξονα  $x$  και τις συνολικές μέσες τιμές των ατόμων κάτω των 35 ετών στον άξονα  $y$  για το σύνολο των 15 κατηγοριών των ήχων του πειράματος. Παρατηρούμε ότι η ευθεία έχει κλίση 0.85, που σημαίνει ότι βρίσκεται πιο κοντά στον άξονα των  $x$ , δηλαδή στον άξονα που έχουμε τις τιμές για τους άνω των 35. Επομένως αυτή η ηλικιακή ομάδα δείχνει να έχει κάπως μεγαλύτερη προτίμηση στις διφωνίες γενικά. Δεξιά έχουμε το διάγραμμα με τις συνολικές μέσες τιμές των δύο ομάδων για τα διάφορα τονικά ύψη ξεκινώντας με τα υψηλότερα και καταλήγοντας με τα χαμηλότερα. Αυτό που φαίνεται από το διάγραμμα είναι μία κάπως αναλογική σχέση μεταξύ των μέσων τιμών των δύο ομάδων το οποίο φαίνεται και από την κλίση της, που είναι 1 αλλά και την τεταγμένη της ευθείας στον άξονα

$y$  η οποία είναι κοντά στο 0. Επίσης βλέπουμε ότι και τα περισσότερα σημεία του διαγράμματος βρίσκονται πάνω στην ευθεία, το οποίο υποδηλώνει μία αναλογική σχέση των απαντήσεων για την προτίμηση σε σχέση με τις διαφορετικές συχνότητες. Στις χαμηλές συχνότητες οι συνολικές μέσες τιμές και των δύο ηλικιακών ομάδων είναι υψηλές, ενώ αντίθετα στις υψηλές συχνότητες (σημεία πιο κοντά στην αρχή των αξόνων) οι συνολικές μέσες τιμές και των δύο ομάδων είναι χαμηλές.



---

## Κεφάλαιο 5

# Συμπεράσματα από την πειραματική διαδικασία

### 5.1 Συμπεράσματα που προκύπτουν από το πείραμα

Ουσιαστικά η έρευνα για τη μελέτη των απαντήσεων, που έχουν δώσει οι 70 ακροατές έχει κινηθεί γύρω από δύο παραμέτρους. Η μία είναι ο λόγος, που έχουν οι δύο συχνότητες, που συνιστούν την εκάστοτε διφωνία και η άλλη είναι το τονικό ύψος το οποίο έχουν. Η μελέτη αυτών των δύο παραμέτρων γίνεται αρχικά για το σύνολο των 70 ατόμων, ενώ στη συνέχεια γίνεται διαχωρισμός του δείγματος σε δύο ομάδες, με κριτήρια όπως το αν είναι μουσικοί ή όχι, το φύλο τους και την ηλικία τους. Ο λόγος επιλογής αυτών των κριτηρίων έχει να κάνει με τις διαφορετικές αντιλήψεις ως προς τον ήχο που μπορεί να υπάρχουν λόγω της ενασχόλησης ενός ατόμου με τη μουσική για πολλά χρόνια, λόγω του φύλου του ή της ηλικίας του και άρα βιολογικών λόγων, όπως την μικρή διαφοροποίηση της ακοής σε μεγαλύτερες ηλικίες.

#### 5.1.1 Μελέτη των αποτελεσμάτων ως προς το λόγο των διφωνιών

Ως προς τον λόγο των διφωνιών αυτό που παρατηρείται γενικά είναι ότι η κατηγορία της 2ας έχει τις περισσότερες αρνητικές απαντήσεις και επομένως έχει την μικρότερη προτίμηση από όλες τις άλλες και θα μπορούσε να θεωρηθεί ως η λιγότερο σύμφωνη. Αυτό συμβαίνει και στο διάγραμμα με τις μέσες τιμές του συνόλου (Εικόνα 4.2) αλλά και στα υπόλοιπα αντίστοιχα διαγράμματα με τις μέσες τιμές των διαφόρων ομάδων του δείγματος (Εικόνες: 4.3, 4.4, 4.5, 4.6). Από τα διαστήματα της 2ας φαίνεται ότι οι 2ες μεγάλες θεωρούνται πιο διάφωνες από τις 2ες μικρές καθώς

συγκεντρώνουν περισσότερες αρνητικές απαντήσεις από τα διαστήματα της 2ας μικρής. Από τα διαγράμματα των συνολικών μέσων τιμών του συνόλου (4.7) αλλά και των ομάδων του δείγματος (4.8 -4.11) φαίνεται ότι όσο αυξάνεται το διάστημα των διφωνιών γίνονται κάπως πιο αποδεκτές. Μετά από τα διαστήματα της 2ας υπάρχει μία ανοδική πορεία για τα υπόλοιπα διαστήματα στις απαντήσεις των ακροατών και αυτό σημαίνει ότι έχουμε περισσότερες θετικές απαντήσεις όσο πάμε σε μεγαλύτερα διαστήματα.

Κάτι άλλο που παρατηρούμε είναι ότι στις έβδομες δεν έχουμε μεγάλη διασπορά στις απαντήσεις, ούτε στο σύνολο των 70 ατόμων, αλλά ούτε και στις υπόλοιπες ομάδες του δείγματος. Η εικόνα για αυτό το διάστημα είναι ότι γενικά δεν θεωρείται ούτε σύμφωνο, ούτε διάφωνο αλλά είναι κάπως αδιάφορο ως προς το βαθμό συμφωνίας των διφωνιών του. Αυτό φαίνεται και από την πλειοψηφία των μέσων τιμών στα διαγράμματα της ενότητας 4.2 οι οποίες είναι συγκεντρωμένες στο μέσο των διαγραμμάτων.

Ως προς τα διαστήματα, τα οποία θεωρούνται απόλυτα σύμφωνα, δηλαδή τα διαστήματα της τετάρτης, της πέμπτης και της ογδόης η εικόνα από τα αποτελέσματα είναι διαφορετική από αυτήν, που θα περιμέναμε. Ενώ θα περιμέναμε να έχουν υψηλές μέσες τιμές αυτό δεν φαίνεται να ισχύει στο πείραμά μας. Γενικά οι τιμές τους είναι σχετικά ίδιες με τις υπόλοιπες διφωνίες και μάλιστα είναι πιο κάτω από τις τιμές για τα διαστήματα της έβδομης και της έκτης μεγάλης, οι οποίες και φαίνεται να συγκεντρώνουν τις περισσότερες υψηλές τιμές. Οι τετάρτες, οι πέμπτες και οι όγδοες φαίνονται να ακολουθούν και τελευταίες είναι οι τρίτες με τις δευτέρες. Στην μόνη περίπτωση, που δεν συμβαίνει αυτό είναι για τους μουσικούς όπου τη μεγαλύτερη τιμή έχουν οι διφωνίες της όγδοης, όπως και θα περιμέναμε αρχικά. Όμως μετά η σειρά είναι η ίδια με τις υπόλοιπες ομάδες και ακολουθούν οι έκτης μεγάλης και οι τετάρτες, πέμπτες. Είναι δηλαδή σαν το κέντρο των αποδεκτών διφωνιών να είναι στις έκτης μεγάλης και τις έβδομες μικρές.

Ο Ernst Terhardt το 1984 δημοσίευσε ένα άρθρο με τίτλο The concept of musical consonance: A link between music and psychoacoustics στο οποίο φαίνονται τα αποτελέσματα από πειράματα που έγιναν χρησιμοποιώντας απλούς τόνους αλλά και σύνθετους ήχους με αρμονικές [15]. Οι ήχοι αποτελούνταν από δυάδες τόνων με τον έναν να είναι σταθερός στη συχνότητα του Λα4 και τον άλλον να μεταβάλλεται σταδιακά και να μεγαλώνει το διάστημα μεταξύ τους φτάνοντας μέχρι το διάστημα της όγδοης. Οι ακροατές αξιολογούσαν τις διφωνίες ως προς την συμφωνία τους και την όποια τραχύτητα μπορεί να εμφάνιζαν. Η εικόνα των αποτελεσμάτων σε σχέση με τη συμφωνία των ήχων, μοιάζει αρκετά με τη δική μας καθώς φαίνεται ότι οι ακροατές όσο μεγαλώνει και αυξάνεται το διάστημα των τόνων αντιλαμβάνονται πιο σύμφωνες τις διφωνίες. Επομένως η εικόνα των αποτελεσμάτων μας, ίσως έχει να κάνει με το γεγονός ότι έχουμε χρησιμοποιήσει απλούς τόνους και όχι σύνθετους. Οι σύνθετοι ήχοι με το να περιέχουν και τους αρμονικούς εκτός από τη θεμελιώδη συχνότητα, είναι πιθανό να έχουν διαφορετική αλληλεπίδραση όταν συνδυαστούν και το αποτέλεσμα της συνήχησης δύο τέτοιων ήχων να μη μοιάζει με αυτό των απλών τόνων.

Νωρίτερα το 1965 οι Plomp και Levelt στο άρθρο τους Tonal consonance and critical band width είχαν πραγματοποιήσει πειράματα με απλούς τόνους, αλλά και με σύνθετους με σκοπό να μελετήσουν το θέμα της συμφωνίας των ήχων σε σχέση με το διάστημα των συχνοτήτων, που

έχουν δύο ήχοι και με τον αντίστοιχο βαθμό συμφωνίας ή διαφωνίας που αυτά παρουσιάζουν [16]. Έτσι ανάμεσα σε άλλα έφτιαξαν διάγραμμα στο οποίο φαίνονται διαστήματα με διαφόρους λόγους συχνότητων και το ποσοστό συμφωνίας τους, ανάλογα με τις απαντήσεις των ακροατών. Αποτέλεσμα είναι ένα διάγραμμα στο οποίο φαίνονται διαφορές στην περίπτωση, που οι διφωνίες αποτελούνταν από απλούς τόνους και στην περίπτωση, που αποτελούνταν από σύνθετους ήχους.

Οι D. L. Bowling και D. Purves στο άρθρο τους A biological rationale for musical consonance συμπεριλαμβάνουν ένα διάγραμμα με τα μουσικά διαστήματα για σύνθετους ήχους κατά αυξανόμενη συμφωνία [17]. Αυτό έχει προκύψει από δεδομένα, που έχουν συλλεχθεί κατά το χρονικό διάστημα από το 1898 μέχρι το 2012 μέσα από διάφορα πειράματα που έχουν γίνει με σύνθετους ήχους. Σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται ότι και πρόσφατα τα πιο σύμφωνα διαστήματα θεωρούνται αυτά της τετάρτης, της πέμπτης και της όγδοης (το πιο σύμφωνο), ενώ ακολουθούν οι τρίτες και οι έκτες. Τελευταία είναι τα διαστήματα της εβδόμης και της δευτέρας. Επομένως για σύνθετους ήχους με αρμονικούς, φαίνεται να έχουμε μία διαφοροποίηση στο ποια θεωρούνται ως σύμφωνα διαστήματα και γενικά στο βαθμό συμφωνίας, που μπορεί να παρουσιάζει ένα διάστημα σε σχέση με τους απλούς τόνους.

Κάτι άλλο που παρατηρούμε είναι οι υψηλές μέσες τιμές που έχει η διφωνία της  $2m1$ , καθώς οι επιμέρους τόνοι οι οποίοι την αποτελούν έχουν διαφορά συχνότητων  $\Delta f = 13.86$  Hz και επομένως σύμφωνα με τον Helmholtz σχηματίζουν διακρότημα το οποίο και γίνεται αντιληπτό. Ενώ θα περιμέναμε να ήταν μία διφωνία με αρκετές αρνητικές απαντήσεις και κατ'επέκταση μία από τις λιγότερο προτιμητέες, οι μέσες τιμές που συγκεντρώνει από όλες τις ομάδες του δείγματος είναι υψηλές. Όμως οι συχνότητες των τόνων της διφωνίας αυτής είναι χαμηλές (210 Hz και 223.86 Hz), κάτι που ίσως επηρεάζει το ρυθμό του διακροτήματος που δημιουργούν και δεν το καθιστά τόσο ενοχλητικό όπως θα ήταν εάν οι τόνοι είχαν μεγάλο τονικό ύψος. Ακόμη το ότι έχουν διαφορά  $\Delta f = 13.86$  Hz έχει σαν αποτέλεσμα οι επιμέρους μεταβολές της ακουστότητας να είναι πολύ γρήγορες για να ακουστούν και να γίνουν αντιληπτές από το αυτί [11].

Στους μουσικούς παρατηρείται μία μικρή διαφοροποίηση στην αντίληψη των διφωνιών ως προς το λόγο των συχνότητων τους. Οι οκτάβες έχουν τις περισσότερες θετικές απαντήσεις όπως θα ήταν αναμενόμενο, αφού από πάντα θεωρείτο το πλέον σύμφωνο διάστημα από όλα. Όμως μετά τις όγδοες τις περισσότερες θετικές απαντήσεις έχουν οι έβδομες και ειδικά οι έβδομες μεγάλες. Αυτό κάπως έρχεται σε αντίφαση με όσα ξέρουμε [17], αφού θα περιμέναμε τις πέμπτες και τις τετάρτες να είναι μέσα στα επόμενα διαστήματα που θα προτιμούσαν. Το αμέσως επόμενο διάστημα μετά τις έβδομες είναι οι έκτες κάτι το οποίο παρατηρείται και στις υπόλοιπες ομάδες του δείγματος.

### 5.1.2 Μελέτη των αποτελεσμάτων του πειράματος ως προς τη συχνότητα των διφωνιών

Ως προς τη συχνότητα των διφωνιών αυτό που γίνεται αμέσως αντιληπτό από τα διαγράμματα της ενότητας 4.2 είναι ότι οι υψηλές συχνότητες έχουν τις περισσότερες αρνητικές απαντήσεις και

έτσι συγκεντρώνουν τις πιο χαμηλές μέσες τιμές για όλες τις ομάδες. Γενικά οι μέσες τιμές των απαντήσεων στις περισσότερες κατηγορίες των διφωνιών παρουσιάζουν μία φθίνουσα γραμμική μείωση σε σχέση με το τονικό ύψος των διφωνιών. Δηλαδή όσο αυξάνεται η συχνότητα των διφωνιών, τόσο μειώνεται η μέση τιμή των απαντήσεων και επομένως η προτίμηση των ακροατών. Αυτό παρατηρείται εκτός από το γενικό σύνολο και στις περιπτώσεις των διαφόρων ομάδων του δείγματος (μουσικοί και μη μουσικοί, άνδρες και γυναίκες, άτομα άνω των 50 και κάτω των 50, άτομα άνω των 35 και κάτω των 35).

Αυτό γινόταν αντιληπτό ήδη από τη διεξαγωγή του πειράματος και μέσα από τη συζήτηση με τους ακροατές καθώς κατά πλειοψηφία ήταν από τις πρώτες παρατηρήσεις που θα έκαναν συνήθως όταν ολοκληρωνόταν η διαδικασία. Δεν τους προτιμούσαν και γενικά ανέφεραν ότι τους θεωρούσαν κάπως ενοχλητικούς. Αυτό ήταν κάτι που εκφραζόταν από διαφορετικές ομάδες ακροατών. Και από μουσικούς και από διαφορετικές ηλικίες και από διαφορετικά φύλα ατόμων.

Από τη φθίνουσα γραμμική μείωση των μέσων τιμών των απαντήσεων δεν εξαιρούνται διαστήματα όπως η όγδοος, οι πέμπτες ή οι τετάρτες. Στις μόνες που δεν βλέπουμε να ισχύει είναι στις διφωνίες της δευτέρας και της εβδόμης. Στα διαστήματα της δευτέρας βλέπουμε, ότι ενώ οι διφωνίες με χαμηλές συχνότητες έχουν υψηλές μέσες τιμές, οι διφωνίες με μεσαίες και υψηλές συχνότητες έχουν αρκετά χαμηλές τιμές και χαμηλή προτίμηση γενικά. Επομένως οι μέσες τιμές για τις δευτέρες πέφτουν αρκετά γρήγορα και απότομα. Στα διαστήματα της εβδόμης δεν υπάρχει διασπορά στις μέσες τιμές των ακροατών και οι περισσότερες συχνότητες έχουν ίδιο περίπου αριθμό θετικών και αρνητικών απαντήσεων. Επομένως δεν υπάρχει διαφοροποίηση της προτίμησης των διφωνιών λόγω της διαφορετικής τους συχνότητας. Αυτό για τις δύο αυτές κατηγορίες, ίσως δείχνει ότι ο λόγος των συχνοτήτων μάλλον έχει πρωταρχικό ρόλο στην προτίμησή τους ή όχι και αντίστοιχα στο χαρακτηρισμό τους ως διάφωνες ή σύμφωνες και ότι η συχνότητα ίσως να μην έχει τόσοση σημασία.

Ένας πιθανός λόγος για τον οποίο οι διφωνίες με υψηλές συχνότητες δεν είναι τόσο προτιμητέες είναι επειδή βρίσκονται στη συχνοτική περιοχή των 2000-5000 Hz περιοχή στην οποία το αυτί μας παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στις διάφορες συχνότητες, όπως απεικονίζεται και στην καμπύλη των Fletcher-Munson 1.5 και μάλιστα είναι η περιοχή όπου το αυτί μας διεγείρεται για τις περισσότερες τιμές των συχνοτήτων των διφωνιών με τιμές της έντασης μικρότερη από την ένταση αναφοράς  $I_0 = 10^{-12} \left(\frac{W}{m^2}\right)$ . Επομένως βρισκόμαστε στην περιοχή που το αυτί μας έχει τη μέγιστη ανταπόκριση σε έναν ήχο. Έτσι είναι αναμενόμενο ότι αυτοί οι ήχοι θα είναι κάπως διαπεραστικοί και θα διεγείρουν το μέγιστο το αυτί μας. Επιπλέον στην περίπτωση που έναν ήχο με χαμηλή ή μεσαία συχνότητα π.χ. 1500 Hz τον διαδεχόταν ένας ήχος με υψηλή συχνότητα σημαίνει για το ακουστικό μας σύστημα ότι μετακινείται στην καμπύλη Fletcher-Munson ξαφνικά από ένα σημείο, που είναι ψηλά σε αυτήν σε ένα σημείο που βρίσκεται αρκετά χαμηλά, οπότε και το αυτί πρέπει να ανταποκριθεί σε αυτή την αλλαγή σε σύντομο χρονικό διάστημα σχετικά. Αυτή την αίσθηση θα μπορούσε να την ενισχύει και το γεγονός, ότι ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς ήχους υπήρχε ένα μικρό χρονικό διάστημα που δεν ακουγόταν κάποιος ήχος, οπότε την απόλυτη σιωπή διαδεχόταν ένας ήχος με υψηλή συχνότητα και άρα υψηλή ένταση.

Από πείραμα που έχει γίνει σε πολλούς ακροατές (200 άτομα) με έναν τόνο ο οποίος είχε συχνοτικό εύρος από 100 Hz μέχρι 4000 Hz και που ζητούσαν από τους ακροατές να επιλέξουν ποιος από αυτούς ήταν ο πιο ευχάριστος έδειξε ότι ελάχιστα άτομα διάλεξαν τους ήχους πάνω από τα 2000 Hz, ενώ οι περισσότεροι επέλεξαν ήχους γύρω από τη συχνότητα των 400 Hz [18]. Ακόμη ένα πείραμα με απλούς τόνους, που έγινε σε πολύ λιγότερο αριθμό ατόμων με συχνότητες ήχων από 60 Hz μέχρι 5000 Hz και ζητούσαν να επιλέξουν ποιος τους άρεσε έδειξε ότι οι ήχοι με τις υψηλές συχνότητες είχαν χαμηλά ποσοστά [19].

Ένας άλλος πιθανός λόγος για την μη προτίμηση των ήχων με υψηλές συχνότητες ίσως να είναι και το ότι οι απλοί ήχοι γενικά είναι λόγω έλλειψης αρμονικών κάπως πιο ξεροί και διαπεραστικοί σε σχέση με τους σύνθετους ήχους αντίστοιχων συχνοτήτων. Για παράδειγμα μία νότα με συχνότητα περίπου στα 3000 Hz στο πιάνο, αντιστοιχεί σε νότα που βρίσκεται στην τελευταία του οκτάβα, δηλαδή τις πιο ψηλές από τις νότες του. Ο ήχος που παράγει δεν είναι τόσο διαπεραστικός όπως ο αντίστοιχος απλός τόνος, αλλά κάπως πιο στρογγυλεμένος.

Από τα αποτελέσματα του πειράματος και από όλα τα παραπάνω συμπεράσματα φαίνεται λοιπόν ότι το κομμάτι της συμφωνίας ή της διαφωνίας ενός ήχου και γενικά της προτίμησης τους ή όχι από έναν ακροατή είναι ένα περίπλοκο θέμα το οποίο έχει πολλούς παραμέτρους και οι οποίες το καθορίζουν. Σίγουρα είναι ένα θέμα το οποίο δεν θα πάψει να απασχολεί τους ανθρώπους γενικά, είτε έχουν κάποια σχέση με τη μουσική είτε απλώς επειδή το βρίσκουν ενδιαφέρον και θα ήθελαν να μάθουν κάτι παραπάνω για αυτό, δηλαδή το γιατί δείχνουμε προτίμηση σε κάποιους ήχους και σε κάποιους όχι.

---

# Κατάλογος Σχημάτων

- 1.1 Απεικόνιση ενός ημιτονοειδούς ήχου που παράγεται από μία πηγή, όπου φαίνονται τα αραιώματα και τα πυκνώματα των μορίων του αέρα και αντίστοιχα το ελάχιστο και το μέγιστο της κυματομορφής. Πηγή: [www.miniphysics.com](http://www.miniphysics.com). . . . . 3
- 1.2 Ηχητικά κύματα (απλοί τόνοι) διαφορετικής συχνότητας. Από πάνω προς τα κάτω η συχνότητα των κυμάτων αυξάνεται με αποτέλεσμα να έχουμε ένα όλο και πιο πυκνό ημιτονοειδές σήμα, το οποίο δείχνει ότι μέσα στην ίδια μονάδα του χρόνου, πραγματοποιούνται όλο και περισσότερες ταλαντώσεις. Πηγή: [e-learning.sch.gr](http://e-learning.sch.gr). . . . . 4
- 1.3 Για τον ορισμό της έντασης του ήχου. Η ποσότητα ενέργειας που διαπερνά την επιφάνεια στην οποία διαδίδεται το κύμα, καθορίζει και την ένταση του κύματος. Αυτή εξαρτάται από τη δύναμη με την οποία παράγεται ο ήχος αλλά και με το πόσο κοντά είμαστε στην ηχητική πηγή. Πηγή: Χαράλαμπος Σπυρίδης, Φυσική και Μουσική ακουστική, σελ. 214. . . . . 5
- 1.4 Η κυματομορφή (αριστερά) και το φάσμα (δεξιά) διαφορετικών μουσικών οργάνων που παίζουν τη νότα ΛΑ (440 Hz. Από πάνω προς τα κάτω: (α) διαπασών (β) φλάουτο (γ) βιολί και (δ) τραγουδίστρια. Όπως βλέπουμε και οι κυματομορφές και τα φάσματα έχουν αισθητές διαφορές μεταξύ τους, καθώς διαφέρουν στον αριθμό και τη θέση των κορυφών που περιέχουν, παρόλο που αναπαράγουν την ίδια νότα. Έτσι μπορούμε να ξεχωρίσουμε την πηγή και να καταλάβουμε από ποιο όργανο προέρχεται κάθε φορά ο ήχος. Πηγή: [amath.colorado.edu/pub/matlab/music](http://amath.colorado.edu/pub/matlab/music). . . . . 6

- 1.5 Διάγραμμα ισοακουστικών καμπυλών, το οποίο δείχνει το απαιτούμενο SPL σε κάθε συχνότητα ώστε να μπορεί να γίνεται αντιληπτός ένας ήχος από τον άνθρωπο με μία συγκεκριμένη στάθμη ακουστότητας. Η πιο χαμηλή από αυτές (διακεκομμένη γραμμή) αντιστοιχεί στο κατώφλι της ακουστότητας του ανθρώπου, δηλαδή στο ελάχιστο SPL συναρτήσει της συχνότητας το οποίο πρέπει να έχει ένας ήχος ώστε να γίνει αντιληπτός. Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί στην ίδια στάθμη ακουστότητας, όπως την αντιλαμβάνεται ο μέσος άνθρωπος. Η μεγαλύτερη ευαισθησία του ακουστικού μας συστήματος είναι στην περιοχή των 3000 με 4000 Hz, όπου και έχουμε τις μικρότερες τιμές SPL. Πηγή: [www.acousticslab.org](http://www.acousticslab.org). . . . . 13
- 1.6 Διάγραμμα ισοβαρών καμπυλών για διαφορετικές συχνότητες, το οποίο απεικονίζει τις καμπύλες για τις οποίες η πίεση του ήχου είναι ίδια, άρα και η SPL είναι σταθερή, για διαφορετικές τιμές συχνοτήτων και ακουστότητας. Οι συνεχείς καμπύλες αντιστοιχούν σε απλούς τόνους, ενώ οι διακεκομμένες σε σύνθετους μουσικούς ήχους με 5 αρμονικές. Πηγή: [knilt.arcc.albany.edu](http://knilt.arcc.albany.edu). . . . . 15
- 2.1 Κυματομορφή απλού αρμονικού ήχου συχνότητας 440 Hz, δημιουργημένη με το λογισμικό Audacity (αριστερά) καθώς και το φάσμα του (δεξιά), προκύπτουν όταν κάνουμε σε αυτήν ανάλυση Fourier. Η συχνότητα του ημιτονοειδούς κύματος αντιστοιχεί στη νότα ΛΑ 4. Όπως είναι αναμενόμενο, στο φάσμα του σήματος έχουμε μία μόνο γραμμή, η οποία και αντιστοιχεί στη μοναδική συχνότητα από την οποία αποτελείται ο ήχος. Αν είχαμε σύνθετο ήχο με αρμονικές, τότε θα υπήρχαν περισσότερες από μία κορυφές. . . . . 16
- 2.2 Το διαπασών και η κίνηση που προκαλεί στη μάζα αέρα, που βρίσκεται γύρω του. Πηγή: [physics.stackexchange.com](http://physics.stackexchange.com). . . . . 17
- 2.3 Διφωνία ίδιων τόνων με διαφορά φάσεως 0 (αριστερά),  $\pi$  (δεξιά). . . . . 20
- 2.4 Διφωνία δύο απλών τόνων συχνότητας  $f_1 = 100$  Hz και  $f_2 = 200$  Hz, δηλαδή με λόγο συχνοτήτων 2/1. Επομένως στο χρόνο μιας περιόδου η κυματομορφή του πρώτου τόνου κάνει 1 πλήρη κίνηση, ενώ του δεύτερου 2 πλήρεις κινήσεις. Αντιστοιχεί στη γνωστή μας οκτάβα. Η προκύπτουσα από την υπέρθεσή των απλών τόνων κυματομορφή (διφωνία) είναι και αυτή περιοδική συνάρτηση, με περίοδο ίση με τη μεγαλύτερη των δύο συνιστωσών περιόδων. Αριστερά με διαφορά φάσεως 0 και δεξιά με διαφορά φάσεως  $\pi$ . . . . . 20
- 2.5 Διφωνία δύο απλών τόνων με συχνότητες  $f_1 = 500$  Hz και  $f_2 = 600$  Hz, δηλαδή με λόγο συχνοτήτων 6/5. Στο χρόνο μιας περιόδου η κυματομορφή του πρώτου τόνου κάνει 5 πλήρεις κινήσεις, ενώ του δεύτερου 6 πλήρεις κινήσεις. Η διφωνία αυτή αντιστοιχεί στο μουσικό διάστημα 3η μικρή. Αριστερά με διαφορά φάσεως 0 και δεξιά με διαφορά φάσεως  $\pi$ . . . . . 21



- 2.6 Αριστερά: Η κυματομορφή της υπερθέσεως δύο τόνων με συχνότητες  $f_1 = 500$  Hz και  $f_2 = 600$  Hz της Εικόνας 2.5, αντιστοιχούσα σε μουσικό διάστημα 3ης μικρής. Δεξιά: Το αντίστοιχο φάσμα Fourier. . . . . 21
- 2.7 Κυματομορφή της διφωνίας 5ti3 του πειράματος (αριστερά) και του φάσματός Fourier της (δεξιά). Οι συχνότητες των τόνων της διφωνίας είναι  $f_1 = 1022$  Hz και  $f_2 = 1533$  Hz και ο λόγος τους 3/2. Επομένως, στο χρόνο μιας περιόδου η κυματομορφή του πρώτου τόνου κάνει 2 πλήρεις κινήσεις, ενώ του δεύτερου 3 πλήρεις κινήσεις. Και εδώ στο φάσμα δεξιά λόγω της μικρής διάρκειας των ήχων (2 s) έχουμε και άλλες κορυφές που εμφανίζονται και οι οποίες οφείλονται στο πεπερασμένο σήμα της διφωνίας. . . . . 22
- 2.8 Κυματομορφή της διφωνίας 8va1 του πειράματος (αριστερά) και το φάσμα Fourier της (δεξιά). Οι επιμέρους τόνοι της διφωνίας έχουν συχνότητες  $f_1 = 200$  Hz και  $f_2 = 400$  Hz και λόγο συχνοτήτων 2/1. Επομένως, στο χρόνο που ο ένας τόνος έχει κάνει μια πλήρη κίνηση, ο άλλος (με τη μεγαλύτερη συχνότητα), θα έχει κάνει 2 πλήρεις κινήσεις. . . . . 23
- 2.9 Κυματοσυνάρτηση ενός διακροτήματος με συχνότητες επιμέρους τόνων  $f_1 = 200$  Hz και  $f_2 = 203$  Hz. Ο ακροατής παρατηρεί μια περιοδική εναλλαγή μεταξύ αύξησης και μείωσης της έντασης του ήχου. Στην αύξηση τα μέγιστα των δύο κυματομορφών συμπίπτουν, ενώ στην απουσία ήχου συμπίπτει το μέγιστο πλάτος της κυματομορφής του ενός ήχου με το ελάχιστο πλάτος του άλλου. Ο ρυθμός με τον οποίον γίνεται αυτή η εναλλαγή από το μέγιστο στο ελάχιστο ονομάζεται συχνότητα διακροτήματος και είναι ίση με τη διαφορά των συχνοτήτων των δύο κυμάτων. Για παράδειγμα όταν έχουμε συχνότητες 200 Hz και 203 Hz, τότε η συχνότητα του διακροτήματος θα είναι 3 Hz. Επομένως μικρή συχνότητα η οποία επιτρέπει στο αυτί να αντιληφθεί τις αυξομειώσεις του πλάτους του ήχου. . . . . 24
- 2.10 Διαγράμματα της διφωνίας 2m1 του πειράματος, η οποία είναι και αυτή με τη μικρότερη διαφορά στις συχνότητες των τόνων που την αποτελούν. Οι συχνότητες των τόνων της είναι  $f_1 = 210$  Hz και  $f_2 = 223.86$  Hz, δηλαδή η διαφορά μεταξύ τους είναι:  $\Delta f = 13.86$  Hz. Αυτή είναι και η συχνότητα του διακροτήματος με την οποία το μέγιστο και το ελάχιστο πλάτος εναλλάσσονται και έχουμε την αντίστοιχη αυξομείωση του ήχου. . . . . 25
- 2.11 Κυματοσυνάρτηση και φάσμα της διφωνίας του πειράματος 2Meg.1.1 με συχνότητες τόνων  $f_1 = 230$  Hz και  $f_2 = 255.53$  Hz. Η διαφορά των συχνοτήτων των τόνων της είναι  $\Delta f = 25.53$  Hz. Επομένως το σύνθετο κύμα, που δημιουργείται έχει πιο γρήγορη εναλλαγή μέγιστου και ελάχιστου πλάτους και δεν δημιουργεί τόσο έντονη ηχητική αίσθηση, όπως το διακρότημα της διφωνίας 2m1. . . . . 26



- 3.1 Αριστερά εικόνα του αυτιού, όπου φαίνονται όλα τα μέρη του και δεξιά εικόνα του μεσαίου και του εσωτερικού αυτιού, όπου απεικονίζεται ο κοχλίας τεντωμένος (Πηγή: Kandel-Schwartz-Jessel, Principles of neural science, fourth edition, σελ. 591 και 595). . . . . 27
- 3.2 Διατομή του κοχλίου (Πηγή: Dale Purves, Η μουσική ως βιολογία - Οι ήχοι που μας αρέσουν και γιατί (2017), σελ.18). . . . . 30
- 3.3 Ο βασικός υμένας του κοχλίου και η απόκρισή του σε διαφορετικές περιπτώσεις όταν διαδίδεται κατά μήκος του κάποιο ηχητικό κύμα. (B) Ο κοχλίας ξεδιπλωμένος, όπου φαίνονται όλα τα μέρη. (C) Η κίνηση που προκαλείται στον βασικό υμένα ανάλογα με την κίνηση του αναβολέα επάνω στην ωσειδή θυρίδα. (D) Η διάδοση ενός αρμονικού κύματος κατά μήκος του βασικού υμένα, όπου φαίνεται και η μεταβολή του πλάτους του. (E) Το μέγιστο ενός οδεύοντος κύματος στο βασικό υμένα είναι σε διαφορετικό σημείο του κάθε φορά, ανάλογα με τη συχνότητα της διέγερσης. Για υψηλές συχνότητες το μέγιστο του κύματος βρίσκεται στη βάση του κοχλίου, ενώ αντίθετα για πολύ χαμηλές συχνότητες το μέγιστο του οδεύοντος κύματος βρίσκεται στην κορυφή του κοχλίου. Έτσι οι ενδιάμεσες συχνότητες απλώνονται λογαριθμικά κατά μήκος του βασικού υμένα δημιουργώντας έναν τονοτοπικό χάρτη των συχνοτήτων. (F) Η λειτουργία του βασικού υμένα είναι κατά τον Helmholtz αντίθετη αυτής του πιάνου. Ενώ το πιάνο συνθέτει έναν πολύπλοκο ήχο με το να συνδυάζει τους απλούς τόνους που παράγονται από πολλές διαφορετικές ταλαντώσεις των χορδών του, ο κοχλίας κάνει ακριβώς το αντίθετο. Αναλύει κάθε απλό τόνο που υπάρχει σε έναν σύνθετο ήχο και περιορίζει τη δράση του σε ένα συγκεκριμένο σημείο του βασικού υμένα. (Πηγή: Kandel-Schwartz-Jessel, Principles of neural science, fourth edition, σελ. 595). . . . . 31
- 4.1 Διαγράμματα απαντήσεων, τα οποία δημιουργήθηκαν για κάθε ένα άτομο ξεχωριστά, και απεικονίζουν: α) (αριστερά) το σύνολο των θετικών και αρνητικών απαντήσεων για κάθε κατηγορία διφωνίας και β) (δεξιά) τις απαντήσεις (θετικές και αρνητικές) για όλες τις διφωνίες με σειρά αυξανόμενης συχνότητας για κάθε κατηγορία διφωνιών. . . . . 37
- 4.2 Μέσες τιμές απαντήσεων, στο σύνολο των υποκειμένων (70 άτομα), ανά κατηγορία διφωνίας. Από πάνω αριστερά προς κάτω δεξιά: (α) δευτέρες, (β) τρίτες, (γ) τετάρτες και πέμπτες, (δ) έκτες, (ε) εβδόμες, και (ς) όγδοες. . . . . 40
- 4.3 Διαγράμματα αντίστοιχα με εκείνα της εικόνας 4.2, με το διαχωρισμό όμως σε μουσικούς και μη μουσικούς. Από πάνω αριστερά προς κάτω δεξιά: (α) δευτέρες, (β) τρίτες, (γ) τετάρτες και πέμπτες, (δ) έκτες, (ε) εβδόμες, και (ς) όγδοες. Βλέπουμε και εδώ ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα, τόσο αυξάνονται και οι αρνητικές απαντήσεις και αντίστοιχα μικραίνουν οι τιμές στα διαγράμματα. . . . . 42

- 4.4 Διαγράμματα μέσων τιμών για τις ομάδες του δείγματος των αντρών και των γυναικών. Από άνω αριστερά προς κάτω δεξιά: (α) δευτέρες, (β) τρίτες, (γ) τετάρτες και πέμπτες, (δ) έκτες, (ε) εβδόμες, και (ς) όγδοες. Παρατηρούμε γενικά μείωση των μέσων τιμών με την αύξηση του τονικού ύψους των διφωνιών και στους άντρες και στις γυναίκες. Οι άντρες δεν φαίνεται να έχουν προτίμηση στις υψηλές συχνότητες και τους είναι πιο δυσάρεστες, από ότι είναι στις γυναίκες. . . . . 44
- 4.5 Απεικόνιση των μέσων τιμών των απαντήσεων για τις ηλικιακές ομάδες του δείγματος άνω των 50 με κόκκινο χρώμα και κάτω των 50 με μαύρο χρώμα για όλες τις κατηγορίες των διφωνιών. Από πάνω αριστερά προς κάτω δεξιά: (α) δευτέρες, (β) τρίτες, (γ) τετάρτες και πέμπτες, (δ) έκτες, (ε) εβδόμες, και (ς) όγδοες. . . . . 47
- 4.6 Διαγράμματα μέσων τιμών για τις ηλικιακές ομάδες του δείγματος των ατόμων άνω των 35 ετών (κόκκινα σημεία) και κάτω των 35 ετών (μαύρα σημεία) για όλες τις κατηγορίες διφωνιών. Από πάνω αριστερά προς κάτω δεξιά: (α) δευτέρες, (β) τρίτες, (γ) τετάρτες και πέμπτες, (δ) έκτες, (ε) εβδόμες, και (ς) όγδοες. Η μεταβολή των μέσων τιμών με την αύξηση του τονικού ύψους είναι ίδια και για τις δύο ομάδες. Όσο αυξάνεται η συχνότητα, υπάρχει μία προοδευτική μείωση των τιμών και των δύο υποομάδων του δείγματος. Αυτό δε φαίνεται να ισχύει για τα διαστήματα της 2ας, αφού δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη πτωτική μεταβολή των μέσων τιμών και των δύο γκρουπ, αλλά γενικά σε όλες τις διφωνίες της κατηγορίας αυτής βρίσκονται κοντά στην τιμή 0.3. . . . . 50
- 4.7 Διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τις μέσες τιμές των απαντήσεων όλου του συνόλου (70 άτομα): (Α) αριστερά για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών με βάση το λόγο των συχνοτήτων και (Β) δεξιά για κάθε μία από τις 6 κατηγορίες τονικού ύψους. . . . . 52
- 4.8 Διαγράμματα που απεικονίζουν τις μέσες τιμές των απαντήσεων μουσικών (13 άτομα) και των μη μουσικών (57 άτομα) του δείγματος: (Α) αριστερά για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών με βάση το λόγο των συχνοτήτων και (Β) δεξιά για κάθε μία από τις 6 κατηγορίες τονικού ύψους. . . . . 53
- 4.9 Διαγράμματα που απεικονίζουν τις μέσες τιμές των απαντήσεων των ανδρών (33 άτομα) και των γυναικών (37 άτομα) του δείγματος: (Α) αριστερά για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών με βάση το λόγο των συχνοτήτων και (Β) δεξιά για κάθε μία από τις 6 κατηγορίες τονικού ύψους. . . . . 54
- 4.10 Διαγράμματα που απεικονίζουν τις μέσες τιμές των απαντήσεων των ατόμων άνω των 35 ετών (41 άτομα) και κάτω των 35 ετών (29 άτομα) του δείγματος: (Α) αριστερά για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών με βάση το λόγο των συχνοτήτων και (Β) δεξιά για κάθε μία από τις 6 κατηγορίες τονικού ύψους. . . . . 55

- 4.11 Διαγράμματα των συνολικών μέσων τιμών των ατόμων άνω των 50 ετών (16 άτομα) και κάτω των 50 ετών (54 άτομα) του δείγματος: (A) αριστερά για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών με βάση το λόγο των συχνοτήτων και (B) δεξιά για κάθε μία από τις 6 κατηγορίες τονικού ύψους. . . . . 57
- 4.12 Διαγράμματα  $X$ - $Y$  για τη σύγκριση των απαντήσεων των ομάδων των μουσικών και των μη μουσικών. Έχουμε βάλει στον άξονα  $x$  τις μέσες τιμές των μουσικών και στον άξονα  $y$  τις μέσες τιμές των μη μουσικών του δείγματός μας. Γενικά η κλίση σε όλες τις ευθείες είναι μικρότερη του 1 που σημαίνει ότι η προτίμηση των διφωνιών φαίνεται να είναι μεγαλύτερη στους μουσικούς παρά στους μη μουσικούς. Αυτό το καταλαβαίνουμε και από τη μορφή της ευθείας η οποία προσεγγίζει στα περισσότερα διαγράμματα τον άξονα  $x$ , δηλαδή αυτόν με τις μέσες τιμές των μουσικών. 59
- 4.13 Διαγράμματα  $X$ - $Y$  με τις μέσες τιμές των γυναικών στον άξονα  $x$  και τις μέσες τιμές των ανδρών στον άξονα  $y$ . Στα διαστήματα της 2ας η προτίμηση και των δύο ομάδων φαίνεται να είναι η ίδια αφού, τόσο η κλίση της ευθείας έχει τιμή πολύ κοντά στο 1 όσο και η τετμημένη στον άξονα  $y$  έχει τιμή πολύ κοντά στο (0,0). Στα υπόλοιπα διαστήματα οι μέσες τιμές των ανδρών φαίνεται να είναι μεγαλύτερες των γυναικών, καθώς σε όλες τις ευθείες οι κλίσεις τους είναι μεγαλύτερες από το 1. 61
- 4.14 Διαγράμματα  $X$ - $Y$  για τις ηλικιακές ομάδες ατόμων άνω των 50 ετών και κάτω των 50 ετών του δείγματος. Στον άξονα  $x$  έχουμε τις μέσες τιμές των κάτω των 50, ενώ στον  $y$  των άνω των 50. Από ότι φαίνεται οι μέσες τιμές των ατόμων άνω των 50 είναι μεγαλύτερες από αυτές των ατόμων κάτω των 50. Αυτό το συμπεραίνουμε από το γεγονός ότι η τεταγμένη στον άξονα  $y$  είναι σχετικά μεγάλη στις περισσότερες ευθείες και είναι περίπου στο 0.34. Οι κλίσεις των ευθειών γενικά είναι μικρότερες του 1, οπότε δεν έχουν αναλογική σχέση οι μέσες τιμές των δύο ομάδων, ενώ οι ευθείες προσεγγίζουν πιο πολύ τον άξονα των  $x$ . . . . . 63
- 4.15 Διαγράμματα  $X$ - $Y$  για τις ομάδες των ατόμων με ηλικίες άνω των 35 ετών και των ατόμων με ηλικίες κάτω των 35 του δείγματος. Στον άξονα  $x$  βρίσκονται οι μέσες τιμές των άνω των 35 και στον άξονα  $y$  των ατόμων κάτω των 35. Αυτή που φαίνεται να προσεγγίζει την ευθεία  $y = ax$  είναι η ευθεία στα διαστήματα της 5ης. Σε κάποιες κατηγορίες διφωνιών υπάρχει προτίμηση στους άνω των 35, όπως για παράδειγμα στις 6ες και τις 7ες, ενώ στις 8ες, η προτίμηση φαίνεται να είναι μεγαλύτερη για τα άτομα κάτω των 35, αφού εκεί η ευθεία προσεγγίζει τον  $x$ . . . . 65

- 4.16 Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών για τις ομάδες των μουσικών και των μη μουσικών. Αριστερά: Τα διαφορετικά σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικές κατηγορίες διφωνιών (δευτέρα μικρή, δευτέρα μεγάλη, δείτε τον Πίνακα 4.1) με τον άξονα  $x$  να αντιπροσωπεύει μέσες τιμές προτιμήσεων για μουσικούς και τον άξονα  $y$  να αντιπροσωπεύει μέσες τιμές προτιμήσεων για μη μουσικούς. Δεξιά: Τα διαφορετικά σημεία αντιστοιχούν σε διαφορετικό τονικό ύψος κατά φθίνουσα σειρά, δηλαδή ξεκινάνε από τις υψηλότερες συχνότητες και συνεχίζουν προς τις χαμηλότερες. Βλέπουμε ότι και στις δύο ομάδες οι υψηλότερες συχνότητες έχουν χαμηλές τιμές και όσο προχωράμε σε πιο χαμηλά τονικά ύψη οι τιμές και των δύο ομάδων ανεβαίνουν. . . . 66
- 4.17 Διαγράμματα συνολικών μέσων τιμών για τις ομάδες των ανδρών και των γυναικών του δείγματος. Αριστερά είναι οι συνολικές μέσες τιμές για κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών του πειράματος. Παρατηρούμε ότι γενικά οι συνολικές μέσες τιμές των γυναικών είναι μεγαλύτερες από αυτές των ανδρών, πράγμα το οποίο φαίνεται από την ευθεία η οποία προσεγγίζει τον άξονα των γυναικών (άξονα  $x$ ). Δεξιά: έχουμε τα διαγράμματα με τις συνολικές μέσες τιμές για τις συχνότητες των διφωνιών κατά φθίνουσα σειρά τονικού ύψους. Γενικά η προτίμηση των ανδρών για τα περισσότερα τονικά ύψη φαίνεται να είναι μεγαλύτερη από αυτήν των γυναικών αν συγκρίνουμε τις τιμές . . . . . 67
- 4.18 Τα διαγράμματα είναι παρόμοια με αυτά της εικόνας 4.17 με τις συνολικές μέσες τιμές των ατόμων άνω των 50 να βρίσκονται στον άξονα  $y$  και των ατόμων κάτω των 50 ετών να βρίσκονται στον άξονα  $x$ . Αριστερά έχουμε την εικόνα με τις συνολικές μέσες τιμές και των δύο ομάδων για όλες τις κατηγορίες των διφωνιών. Αυτό που βλέπουμε είναι ότι οι τιμές των άνω των 50 είναι γενικά πιο μεγάλες από των κάτω των 50, καθώς η κόκκινη γραμμή εκτείνεται για τιμές του άξονα  $y$  από την τιμή 0.4 μέχρι την 0.6 περίπου. Δεξιά έχουμε τις συνολικές μέσες τιμές των δύο ομάδων για τις διαφορετικές συχνότητες των διφωνιών ξεκινώντας με τις υψηλές συχνότητες και προχωρώντας προς τα δεξιά του άξονα να κατεβαίνουμε τονικό ύψος. Παρατηρούμε ότι η θέση της ευθείας είναι αρκετά προς τα πάνω το οποίο δείχνει ότι γενικά οι τιμές για την ομάδα των ατόμων άνω των 50 είναι υψηλές σε σχέση με τις τιμές των κάτω των 50. . . . . 68

4.19 Διαγράμματα μέσων τιμών συνολικά για τις ηλικιακές ομάδες των ατόμων άνω των 35 και των ατόμων κάτω των 35 του δείγματός μας. Αριστερά βλέπουμε τις συνολικές μέσες των ατόμων άνω των 35 ετών στον άξονα  $x$  και τις συνολικές μέσες τιμές των ατόμων κάτω των 35 ετών στον άξονα  $y$  για το σύνολο των 15 κατηγοριών των ήχων του πειράματος. Παρατηρούμε ότι η ευθεία έχει κλίση 0.85, που σημαίνει ότι βρίσκεται πιο κοντά στον άξονα των  $x$ , δηλαδή στον άξονα που έχουμε τις τιμές για τους άνω των 35. Επομένως αυτή η ηλικιακή ομάδα δείχνει να έχει κάπως μεγαλύτερη προτίμηση στις διφωνίες γενικά. Δεξιά έχουμε το διάγραμμα με τις συνολικές μέσες τιμές των δύο ομάδων για τα διάφορα τονικά ύψη ξεκινώντας με τα υψηλότερα και καταλήγοντας με τα χαμηλότερα. Αυτό που φαίνεται από το διάγραμμα είναι μία κάπως αναλογική σχέση μεταξύ των μέσων τιμών των δύο ομάδων το οποίο φαίνεται και από την κλίση της, που είναι 1 αλλά και την τεταγμένη της ευθείας στον άξονα  $y$  η οποία είναι κοντά στο 0. . . . .

---

## Κατάλογος Πινάκων

4.1	Αναλυτικός πίνακας με τα διαστήματα των διφωνιών, που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα, το λόγο των συχνοτήτων τους σε δεκαδική και ρητή μορφή, τον αριθμό των ημιτονίων κάθε κατηγορίας και το συμβολισμό που δώσαμε σε κάθε μία από αυτές. . . . .	35
4.2	Ομάδες κατηγοριών διφωνιών για τη διεξαγωγή του Whitney-Mann test. . . . .	39
4.3	Πίνακας αποτελεσμάτων Whitney-Mann test για τη σύγκριση των μέσων τιμών των απαντήσεων, μεταξύ των μουσικών και των μη μουσικών. Οι διαφορές εντοπίζονται στην ομάδα των διαστημάτων της 4ης, 5ης και 8ης και στην ομάδα των διαστημάτων της 7ης. Τα $p$ , $U$ , $Z$ είναι παράμετροι του Whitney-Mann test. . . . .	43
4.4	Πίνακας αποτελεσμάτων Whitney-Mann test για τη σύγκριση των απαντήσεων των ανδρών και των γυναικών. Δεν φαίνεται κάποια διαφοροποίηση στις απαντήσεις των δύο ομάδων. . . . .	46
4.5	Αποτελέσματα Whitney-Mann test για τη σύγκριση των απαντήσεων μεταξύ των ατόμων άνω των 50 και κάτω των 50 ετών. . . . .	48
4.6	Αποτελέσματα Whitney-Mann test για τη σύγκριση των μέσων τιμών των ηλικιακών ομάδων άνω των 35 ετών και κάτω των 35 ετών. . . . .	51

---

## Παράρτημα Α΄

### Κατάλογος των διφωνιών του πειράματος

Παρακάτω ακολουθεί ο πλήρης κατάλογος των διφωνιών, που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα και δημιουργήθηκαν με το Audacity. Αναφέρεται το είδος του διαστήματος κάθε κατηγορίας, το όνομα που δόθηκε σε αυτή, ο λόγος των συχνοτήτων, που έχει η κάθε κατηγορία και τέλος οι συχνότητες, που συνιστούν την κάθε διφωνία με πρώτη την υψηλότερη και δεύτερη τη χαμηλότερη.

Διάστημα διφωνίας	Όνομα διφωνίας	Λόγος συχνοτήτων	Ζεύγος συχνοτήτων (Hz)
2α μικρή	deuteram1	16:15	223,86/ 210
	deuteram2		530,868/498
	deuteram3		927,42/ 870
	deuteram4		1780,22/ 1670
	deuteram5		2510,43/ 2355
	deuteram6		4210,7/ 3950
2α Μεγάλη	deuteraMeg1.1	10:9	255,53/ 230
	deuteraMeg1.2		485,507/437
	deuteraMeg1.3		850,392/ 744
	deuteraMeg1.4		1310,98/ 1180
	deuteraMeg1.5		2733,06/ 2460
	deuteraMeg1.6		4288,46/ 3860

Διάστημα διφωνίας	Όνομα διφωνίας	Λόγος συχνοτήτων	Ζεύγος συχνοτήτων (Hz)
2α Μεγάλη	deuteraMeg2.1	9:8	348,75/ 310
	deuteraMeg2.2		877,5/ 780
	deuteraMeg2.3		1237,5/ 1100
	deuteraMeg2.4		3228,75/ 2870
	deuteraMeg2.5		3656,25/ 3250
	deuteraMeg2.6		4612,5/ 4100
2α Μεγάλη	deuteraMeg3.1	8:7	445,77/ 390
	deuteraMeg3.2		850,392/ 744
	deuteraMeg3.3		1122,426/ 982
	deuteraMeg3.4		2228,85/ 1950
	deuteraMeg3.5		3600,45/ 3150
	deuteraMeg3.6		4423,41/ 3870
3η μικρή	tritim1	6:5	240/ 200
	tritim2		600/ 500
	tritim3		1800/ 1500
	tritim4		3600/ 3000
	tritim5		3000/ 2500
	tritim6		4800/ 4000
3η Μεγάλη	tritiM1	5:4	325/ 260
	tritiM2		500/ 400
	tritiM3		1250/ 1000
	tritiM4		2750/ 2200
	tritiM5		4,375/ 3500
	tritiM6		4,750/ 3800
4η καθαρή	tetarti1	4:3	293,26/220
	tetarti2		799,8/ 600
	tetarti3		1039,74/ 780
	tetarti4		1466,3/ 1100
	tetarti5		3465,8/ 2600
	tetarti6		4932,1/ 3700
5η καθαρή	pempti1	3:2	375/ 250
	pempti2		975/ 650
	pempti3		1533/ 1022
	pempti4		2775/ 1850
	pempti5		3399/ 2266
	pempti6		4900,5/ 3266
6η μικρή	ektim1	8:5	368/ 230
	ektim2		832/ 520
	ektim3		1600/1000
	ektim4		2960/ 1850
	ektim5		3680/ 2300
	ektim6		4880/ 3050



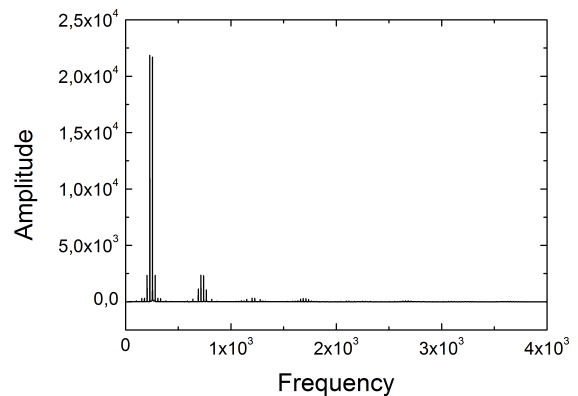
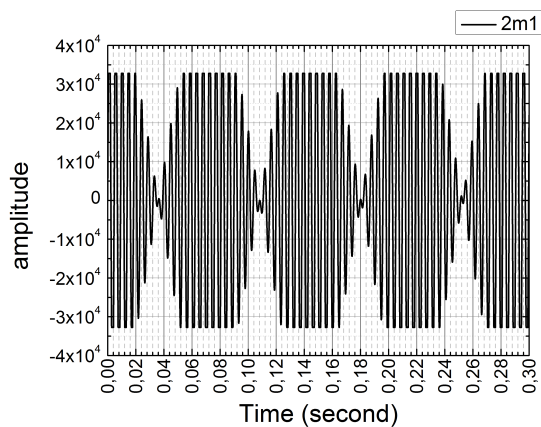
Διάστημα διφωνίας	Όνομα διφωνίας	Λόγος συχνοτήτων	Ζεύγος συχνοτήτων (Hz)
6η Μεγάλη	ektiM1 ektiM2 ektiM3 ektiM4 ektiM5 ektiM6	5:3	416,5/ 250 783,02/ 470 1549,38/ 930 2332,4/ 1400 3498,6/ 2100 4831,4/ 2900
7η μικρή	evdomim1.1 evdomim1.2 evdomim1.3 evdomim1.4 evdomim1.5 evdomim1.6	7:4	612,5/ 350 997,5/ 570 1750/ 1000 2362,5/ 1350 3675/ 2100 4550/ 2600
7η μικρή	evdomim2.1 evdomim2.2 evdomim2.3 evdomim2.4 evdomim2.5 evdomim2.6	16:9	355,4/ 200 621,95/ 350 1279,44/ 720 2487,8/ 1400 3998,25/ 2250 4442,5/ 2500
7η μικρή	evdomim3.1 evdomim3.2 evdomim3.3 evdomim3.4 evdomim3.5 evdomim3.6	9:5	756/ 420 1548/ 860 2070/ 1150 2340/ 1300 3420/ 1900 4860/ 2700
7η Μεγάλη	evdomiM1 evdomiM2 evdomiM3 evdomiM4 evdomiM5 evdomiM6	15:8	506,25/ 270 1106,25/ 590 1621,875/ 865 2137,5/ 1140 3542,75/ 1890 4406,25/ 2350
8η	octava1 octava2 octava3 octava4 octava5 octava6	2:1	400/ 200 1400/ 700 2000/ 1000 3000/ 1500 4000/ 2000 5000/ 2500

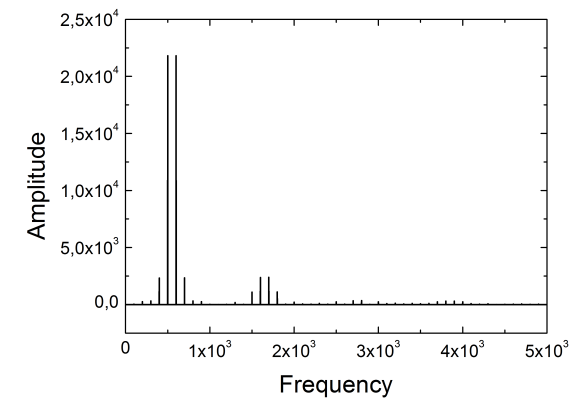
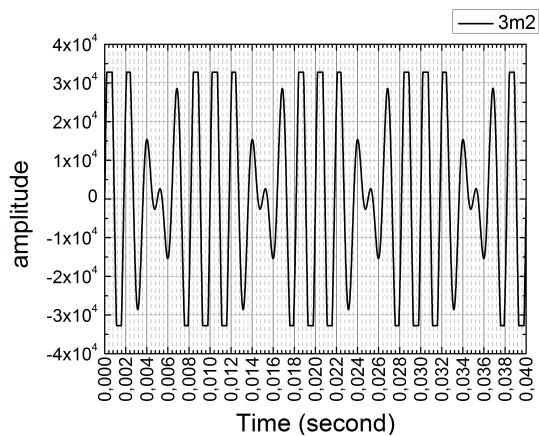
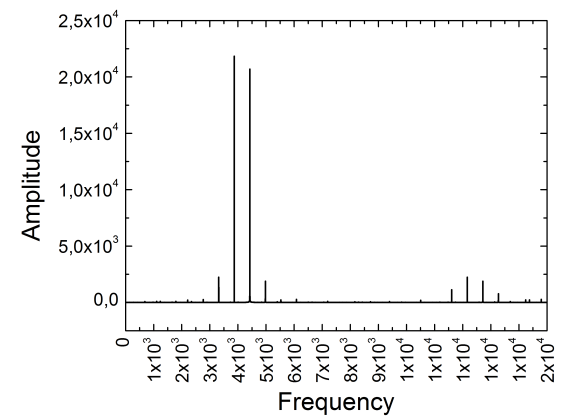
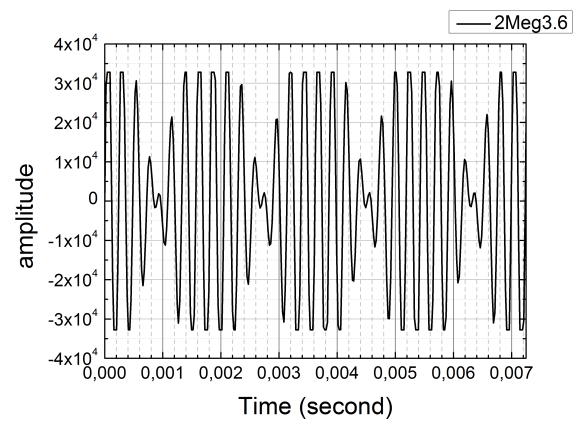
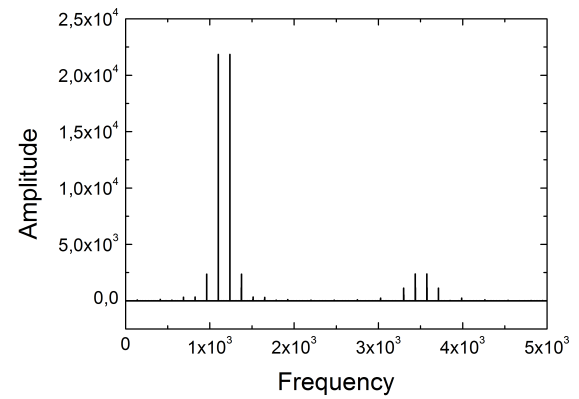
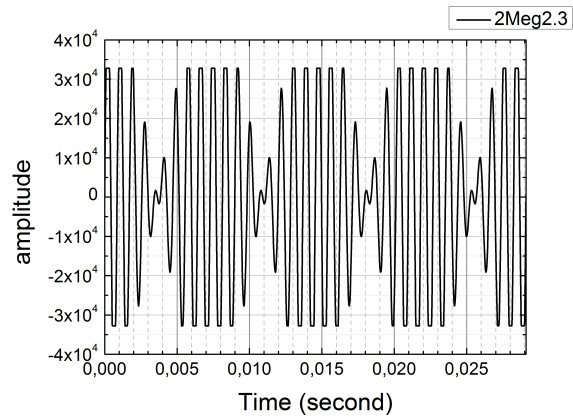
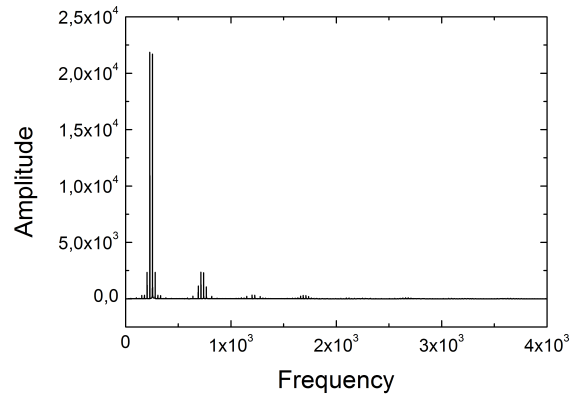
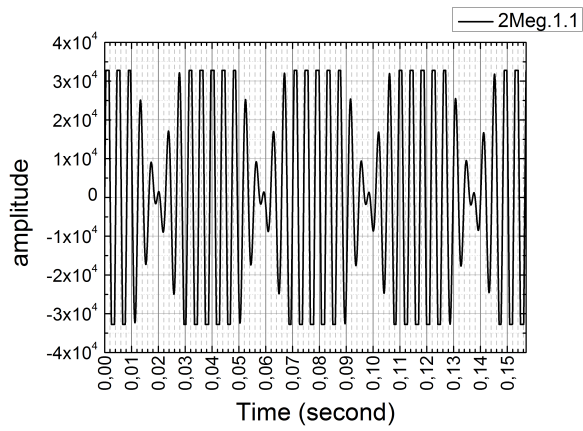
---

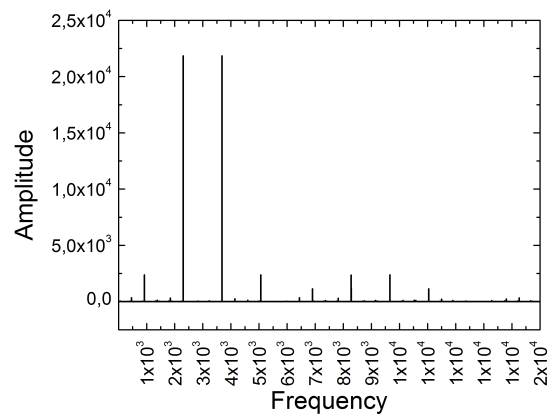
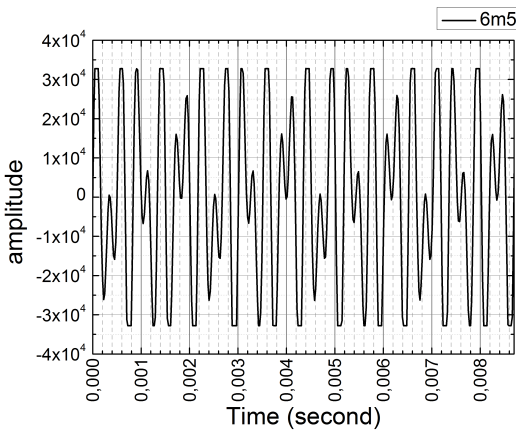
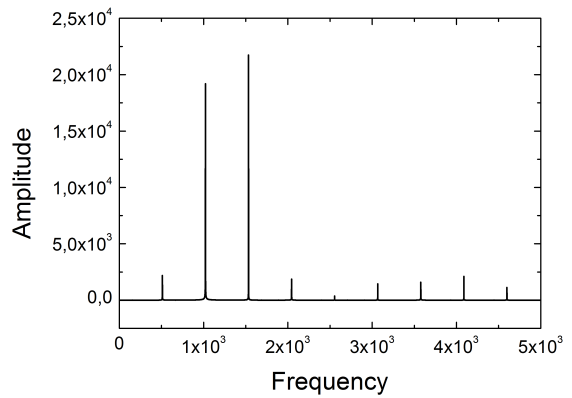
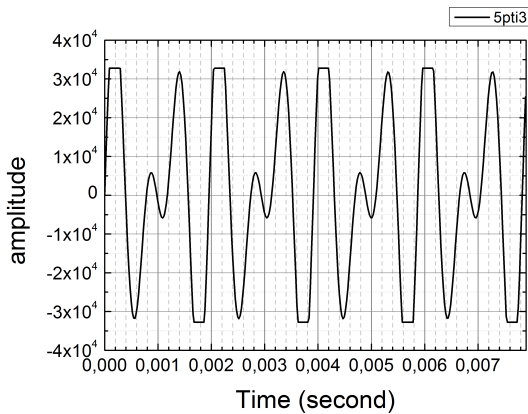
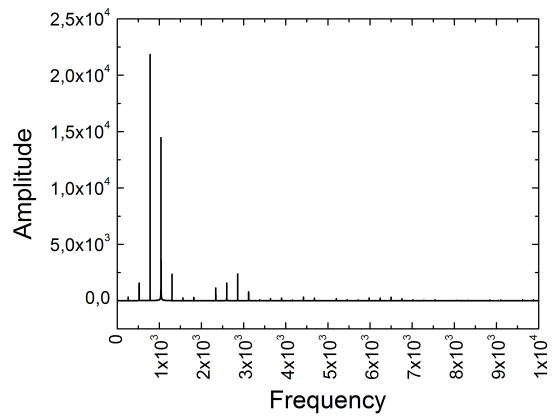
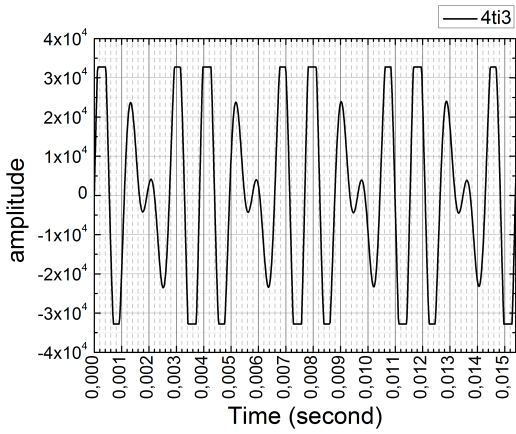
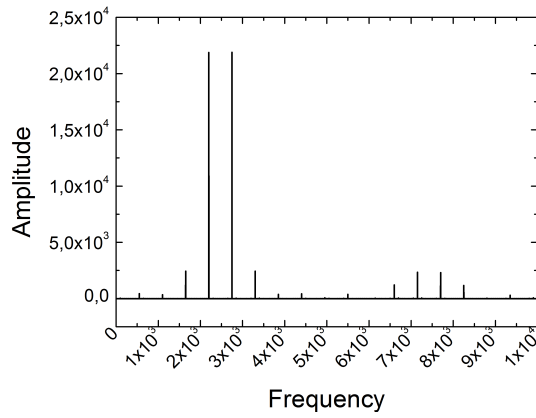
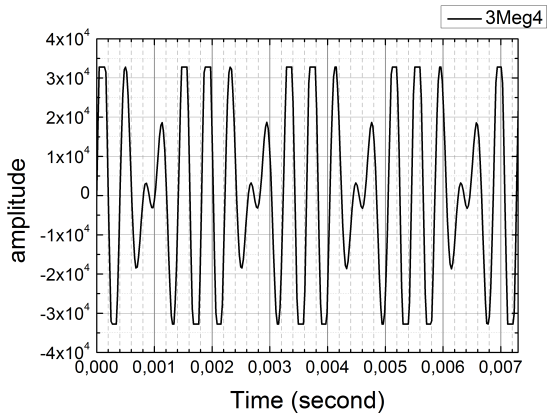
## Παράρτημα Β'

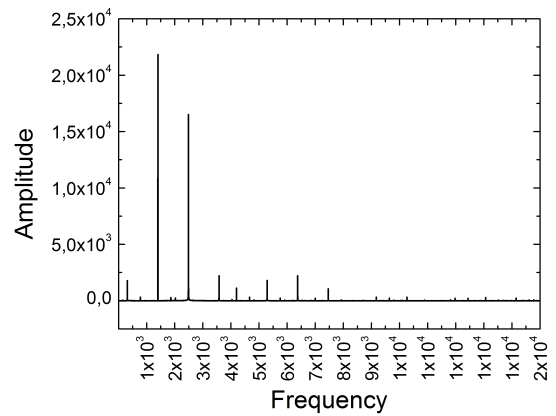
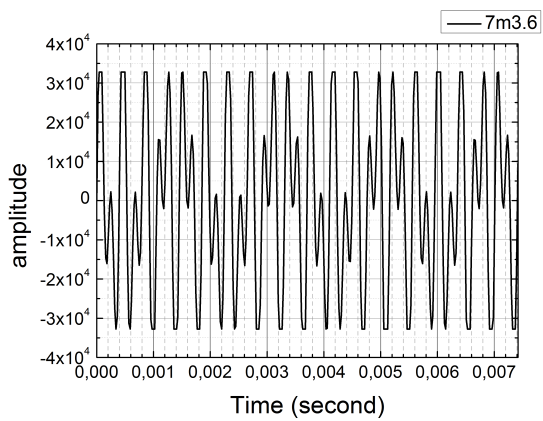
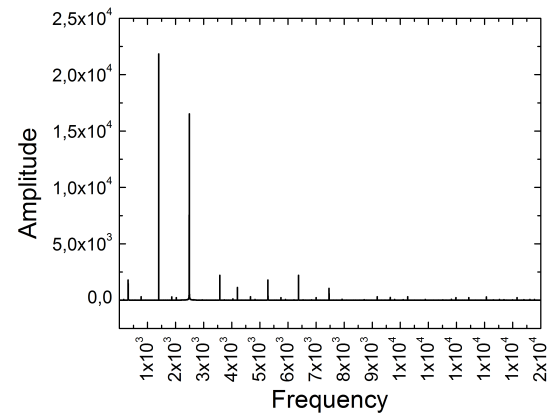
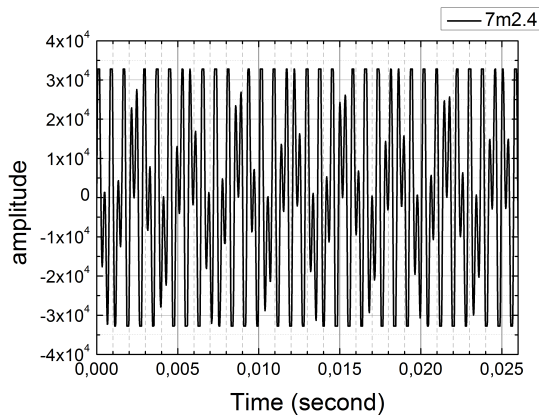
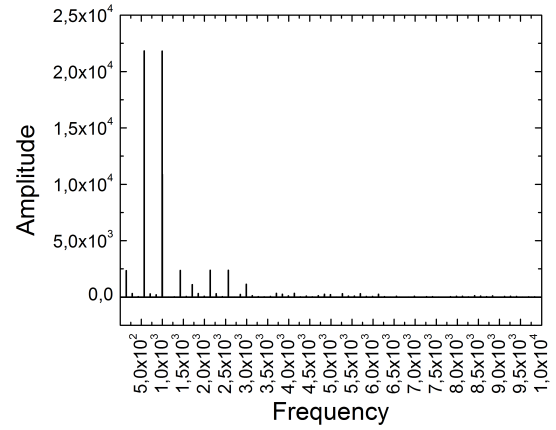
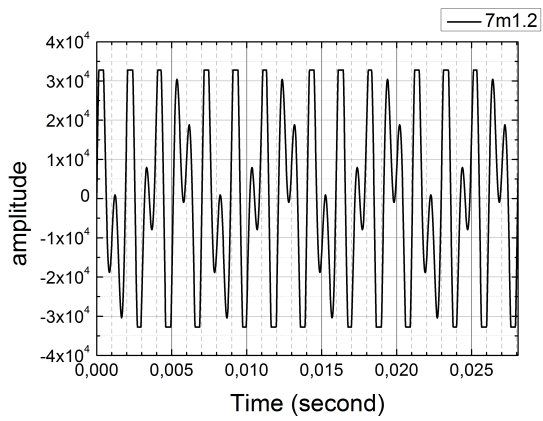
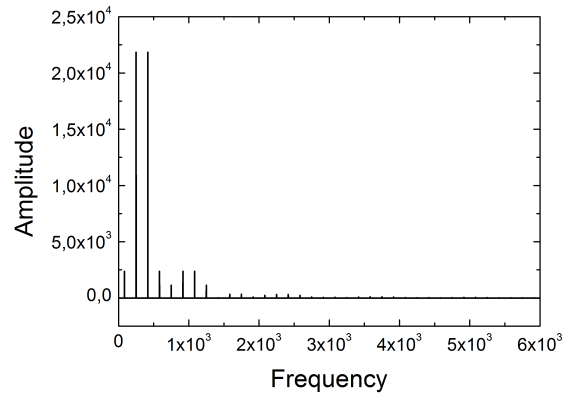
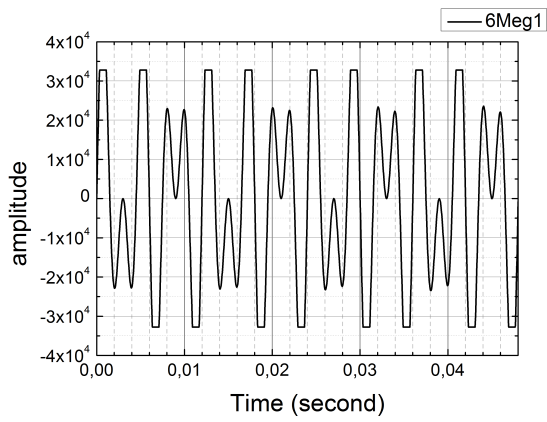
# Κυματοσυναρτήσεις και φάσματα Fourier για κάθε κατηγορία διφωνίας

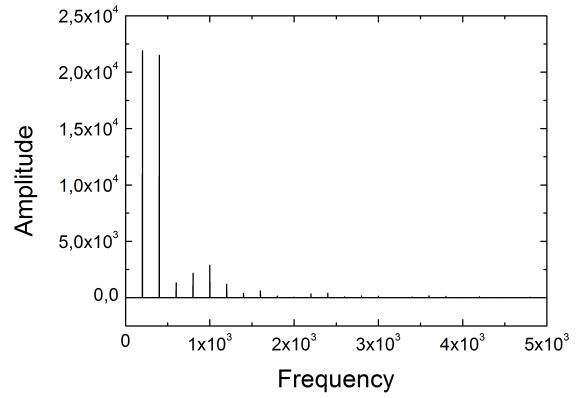
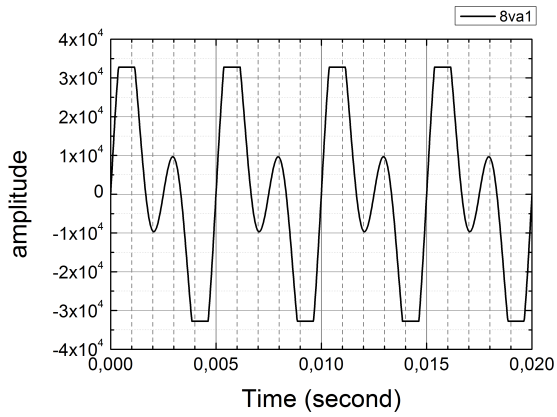
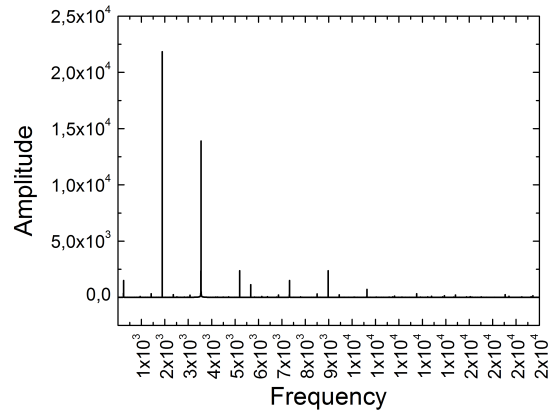
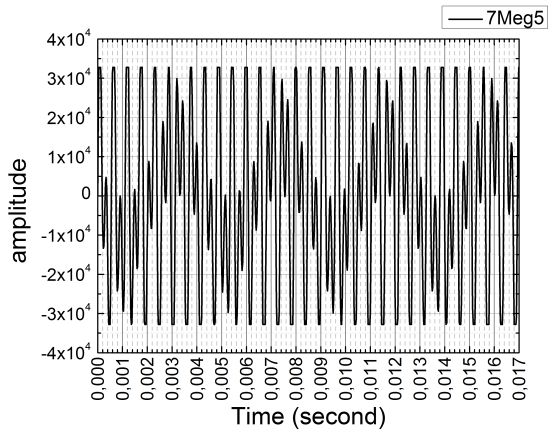
Παρακάτω παρατίθενται για μία επιλεγμένη διφωνία από κάθε μία από τις 15 κατηγορίες διφωνιών η κυματοσυναρτήσή της και το αντίστοιχο φάσμα Fourier, που προκύπτει μετά την ανάλυσή της. Τα διαγράμματα αυτά δημιουργήθηκαν με το Audacity.











---

## Βιβλιογραφία

- [1] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker. *Φυσική τόμος Α': Μηχανική, Κυματική, Θερμοδυναμική*. Εκδόσεις Gutenberg, 2012.
- [2] X. X. Σπυρίδης. *Φυσική και Μουσική Ακουστική*. Grapholine, 2005.
- [3] H. Fletcher and W. A. Munson. Loudness, its definition, measurement and calculation. *Bell System Technical Journal*, 12(4):377–430, 1933.
- [4] H. Fletcher and W. A. Munson. Loudness, its definition, measurement and calculation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 5(2):82–108, 1933.
- [5] D. W. Robinson and R. S. Dadson. A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones. *British Journal of Applied Physics*, 7(5):166, may 1956.
- [6] ISO. Iso 226:2003 - acoustics — normal equal-loudness-level contours, ISO 226:2003.
- [7] J. Backus. *The Acoustical Foundations of Music*. W.W. Norton & Company, Inc., 2nd edition, 1977.
- [8] J. G. Roederer. *The Physics and Psychophysics of Music, An Introduction*. Springer-Verlag New York, Inc., 3rd edition, 1995.
- [9] J. Tyndall. *Sound (a course of eight lectures)*. D. Appleton and Company, New York, 1867.
- [10] J. Tyndall. The project gutenber ebook of sound, by john tyndall. <https://www.gutenberg.org/files/54969/54969-h/54969-h.htm>, 2017. June 23, 2017 [EBook 54969].
- [11] A. H. Benade. *Fundamentals of Musical Acoustics*. Dover Publications, inc., New York, 2nd edition, 1990.
- [12] H. von Helmholtz. *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music*. Dover Publications, inc., New York, 1863.

- 
- [13] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, and T. M. Jessell. *Principles of Neural Science*. McGraw-Hill, 2000.
- [14] Η. Λιώκη-Λειβαδά and Δ. Ν. Ασημακόπουλος. *Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Στατιστική*. Εκδόσεις Συμμετρία, 2004.
- [15] E. Terhardt. The concept of musical consonance: a link between music and psychoacoustics. *JSTOR*, 1:276–295, 1984.
- [16] R. Plomp and WJ. Levelt. Tonal consonance and critical bandwidth. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 38:548–560, Oct 1965.
- [17] D. L. Bowling and D. Purves. A biological rationale for musical consonance. *National Academy of Sciences*, 112:11155–11160, 2015.
- [18] Robin Fraser Patchett. Human sound frequency preferences. *Perceptual and Motor Skills*, 49:324 – 326, 1979.
- [19] Paul Vitz. Preference for tones as a function of frequency (hertz) and intensity (decibels). *Perception and Psychophysics*, 11:84–88, January 1972.