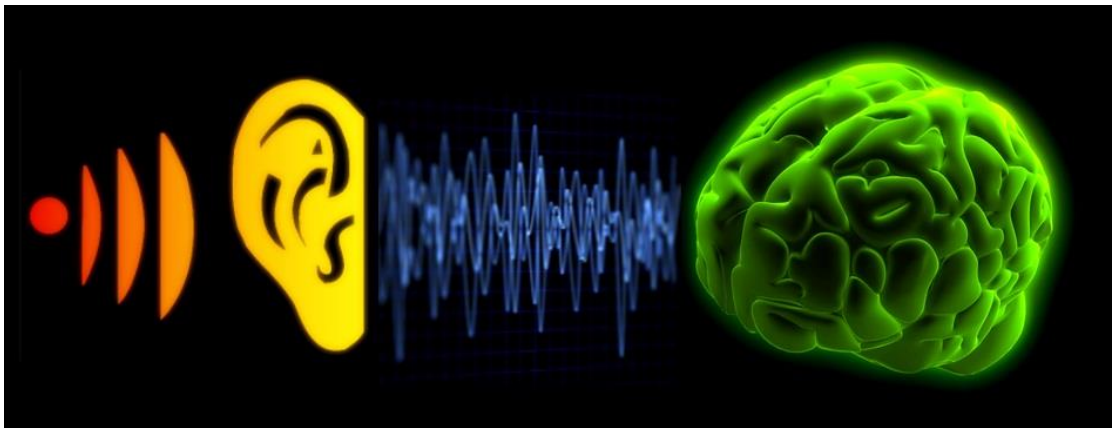
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΑΚΟΗΣ ΓΙΑ ΗΧΟΛΗΠΤΕΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΛΗΨΗ ΤΟΝΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ
ΗΛΙΑΣ ΔΟΥΜΠΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΜΙΝΩΣ ΦΙΤΣΑΝΑΚΗΣ

ΡΕΘΥΜΝΟ 2014



TECHNOLOGICAL EDUCATIONAL INSTITUTE of CRETE
SCHOOL of APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT of MUSIC TECHNOLOGY and ACOUSTICS ENGINEERING

THESIS

TECHNICAL EAR TRAINING ON PITCH PERCEPTION

EDUCATEE
ILIAS DOUMPAKIS

SUPERVISING PROFESSOR
MINOS FITSANAKIS

RETHYMNO 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με το θέμα της ακουστικής εκπαίδευσης των μηχανικών ήχου στην υποκειμενική αίσθηση της συχνότητας ενός ερεθίσματος, δηλαδή στην αντίληψη του τονικού του ύψους. Στο πλαίσιο αυτό, μελετάται ο τρόπος λειτουργίας του ακουστικού μας συστήματος, αναλύονται οι νευρωνικοί μηχανισμοί που συντελούν στην αντίληψη του ύψους καθαρών και σύνθετων τόνων από τον εγκέφαλο και εξετάζεται ο ρόλος της μνήμης στη βελτίωση της ακουστικής ευαισθησίας. Επίσης, γίνεται αναφορά στους παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται η αντίληψη του τονικού ύψους, καθώς και στο ποια είναι η σχέση του με τη μουσική. Τέλος, αφού παρουσιαστούν ενδεικτικά μερικά προγράμματα για την εξάσκηση της κριτικής ακοής των επαγγελματιών του ήχου, διερευνάται η επίδραση της συστηματικής ακουστικής εκπαίδευσης στην τονική αντίληψη μέσω ενός ψυχοακουστικού πειράματος που σχεδιάστηκε και εκτελέστηκε για το σκοπό αυτό.

Λέξεις κλειδιά: *εκπαίδευση ακοής, αντίληψη τονικού ύψους, ακουστική μνήμη, μοντέλα τονικής αντίληψης, ψυχοακουστική για ηχολήπτες*

ABSTRACT

This thesis lays in the area of auditory training for sound engineers on the perception of pitch. In this context, the function and properties of our auditory system are studied, the neural mechanisms underlying pitch perception for pure and complex tones are analyzed, and the role of memory in auditory sensitivity improvement is examined. Factors affecting pitch are also considered, as well as its relation to music. Finally, after a brief presentation of some ear training courses for audio professionals, the effect of systematic auditory training on pitch perception is investigated through a psychoacoustic experiment that was designed and conducted for this purpose.

Key words: *ear training, pitch perception, auditory memory, pitch perception models, psychoacoustics for sound engineers*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ **4**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ **5**

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ **7**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ **9**

ΕΙΣΑΓΩΓΗ **10**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΑΥΤΙ ΚΑΙ ΤΑ ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ **12**

1.1 Ανατομία του Αυτιού: Εξωτερικό Αυτί 13

1.1.1 Πτερύγιο 13

1.1.2 Ακουστικό Κανάλι 13

1.2 Ανατομία του Αυτιού: Μέσο Αυτί 13

1.2.1 Τυμπανική Μεμβράνη 14

1.2.2 Σφύρα, Άκμονας και Αναβολέας 14

1.2.3 Ενίσχυση της Ακουστικής Πίεσης στο Μέσο Αυτί 15

1.2.4 Οι Μύες των Οσταρίων και το Acoustic Reflex 15

1.2.5 Ευσταχιανή Σάλπιγγα 15

1.3 Ανατομία του Αυτιού: Εσωτερικό Αυτί 16

1.3.1 Αιθουσαίο 16

1.3.2 Κοχλίας 17

1.3.3 Βασική Μεμβράνη 18

1.3.4 Το Όργανο του Κόρτι 18

1.3.5 Η Θεωρία του «Ταξιδεύοντος Κύματος» 18

1.4 Ευαισθησία του Ακουστικού Συστήματος 20

1.4.1 Μη Γραμμικότητα του Ακουστικού Συστήματος 20

1.4.2 Όρια Ακουστότητας 20

1.4.3 Διάκριση Έντασης 21

1.4.4 Διάκριση Συχνότητας 21

1.4.5 Διάκριση Διάρκειας 22

1.5 Υποκειμενικά Χαρακτηριστικά του Ήχου 23

1.5.1 Ακουστότητα 23

1.5.2 Τονικό Ύψος 24

1.5.3 Χροιά 24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΤΙΛΗΨΗ ΤΟΝΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ **25**

2.1 Αντίληψη Τονικού Ύψους για Καθαρούς και Σύνθετους Τόνους 26

2.1.1 Θεωρίες Τονικής Αντίληψης 26

2.1.2 Η Χαμένη Θεμελιώδης 27

2.1.3 Αναλυσιμότητα Αρμονικών 28

2.1.4 Μοντέλα Τονικής Αντίληψης 29

2.1.5 Πειραματική Μεθοδολογία 31

2.2 Παράγοντες Που Επηρεάζουν την Αντίληψη Τονικού Ύψους 32

2.2.1 Συχνότητα 33

2.2.2 Στάθμη 33
2.2.3 Διάρκεια 33
2.2.4 Περιβάλλουσα 34
2.2.5 Επικάλυψη 34
2.2.6 Προσαρμογή 34
2.3 Μουσικό Τονικό Ύψος 35
2.3.1 Η Πολυδιάστατη Φύση του Τονικού Ύψους 36
2.3.2 Μουσικές Κλίμακες και Συγκερασμός 36
2.3.3 Μουσική Έκταση και Νευρολογικοί Μηχανισμοί 38
2.3.4 Σύμφωνα και Διάφωνα Διαστήματα 38
2.3.5 Απόλυτο Τονικό Ύψος 39
2.4 Μνήμη και Εκπαίδευση 39
2.4.1 Δομή της Μνήμης 40
2.4.2 Ακουστική Μνήμη 42
2.4.3 Αντιληπτική Μάθηση 44
2.4.4 Παραδείγματα Ακουστικής Εκπαίδευσης 44
2.4.5 Προγράμματα Εκπαίδευσης Ακοής 45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ **47**

3.1 Μεθοδολογία 48
3.2 Συμμετέχοντες 49
3.3 Ηχητικά Δείγματα 49
3.4 Διαδικασία 51
3.5 Εξοπλισμός 52
3.6 Αποτελέσματα 52
3.6.1 Επίδοση Συμμετεχόντων στην Ακριβή Αναγνώριση Συχνότητας 52
3.6.2 Επίδοση Συμμετεχόντων με Απόκλιση ± 1/3 της Οκτάβας 53
3.6.3 Επίδοση Συμμετεχόντων με Απόκλιση ± 2/3 της Οκτάβας 55
3.6.4 Επίδοση Συμμετεχόντων με Απόκλιση ± Οκτάβας 56
3.6.5 Αποτυχία Αναγνώρισης Συχνοτήτων Εντός Οκτάβας 57
3.6.6 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα 59

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΕΡΕΥΝΑΣ **61**

ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ **64**

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ **69**

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1.1: Ανατομία του ανθρώπινου αυτιού 12

Εικόνα 1.2: Τα οστάρια του μέσου αυτιού 14

Εικόνα 1.3: Ανατομία του εσωτερικού αυτιού 16

Εικόνα 1.4: Σχηματική αναπαράσταση της διατομής του κοχλία 17

Εικόνα 1.5: Τονοτοπική κατανομή συχνοτήτων στη βασική μεμβράνη 19

Εικόνα 1.6: Το όργανο του Κόρτι 19

Εικόνα 1.7: Παραμόρφωση των στερεοτριχίων κατά την ταλάντωση της βασικής μεμβράνης 19

Εικόνα 1.8: Το δυναμικό εύρος ενός τυπικού ανθρώπινου αυτιού 21

Εικόνα 1.9: Ελάχιστη αντιληπτή διαφορά στην ένταση για διάφορες συχνότητες 22

Εικόνα 1.10: Ελάχιστη αντιληπτή διαφορά στη συχνότητα, ως ποσοστό μιας κεντρικής συχνότητας για διάφορες διάρκειες 22

Εικόνα 1.11: Καμπύλες ίσης ακουστότητας 23

Εικόνα 2.1: Ναύτες σε υποβρύχιο του Αμερικανικού Ναυτικού, κατά τη διάρκεια ψυχοακουστικών μετρήσεων στην αντίληψη τονικού ύψους 25

Εικόνα 2.2: Όρια εικονικού τονικού ύψους 28

Εικόνα 2.3: Το φάσμα, το μοτίβο διέγερσης και η ταλάντωση της βασικής μεμβράνης για ένα σύνθετο τόνο με θεμελιώδη συχνότητα 100 Hz 29

Εικόνα 2.4: Μια τυπική ψυχοακουστική μέτρηση στην αντίληψη καθαρών τόνων 32

Εικόνα 2.5: Σχηματική αναπαράσταση των δύο διαστάσεων του τονικού ύψους 35

Εικόνα 2.6: Οι λόγοι συχνοτήτων και τα μόρια των μουσικών διαστημάτων, όπως αντιστοιχούν στην ισοσυγκερασμένη, φυσική και Πυθαγόρεια κλίμακα 37

Εικόνα 2.7: Οι τρεις βασικές κατηγορίες μνήμης 40

Εικόνα 2.8: Ο διαχωρισμός της μακροπρόθεσμης μνήμης στις επιμέρους υποκατηγορίες 41

Εικόνα 2.9: Το μοντέλο της μνήμης εργασίας κατά τους Baddeley και Hitch 42

Εικόνα 3.1: Στιγμιότυπο από την τελική δοκιμασία του πειράματος 47

Εικόνα 3.2: Στιγμιότυπο από τη δημιουργία των ηχητικών δειγμάτων 50

Πίνακας 1: Αποτελέσματα συμμετεχόντων στην ακριβή αναγνώριση συχνότητας 52

Πίνακας 2: Αποτελέσματα συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 1/3 της οκτάβας 54

Πίνακας 3: Αποτελέσματα συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 2/3 της οκτάβας 55

Πίνακας 4: Αποτελέσματα συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± οκτάβας 56

Πίνακας 5: Αποτελέσματα συμμετεχόντων στην αποτυχία αναγνώρισης συχνότητας εντός οκτάβας 58

Γραφική παράσταση 1.1: Επίδοση συμμετεχόντων στην ακριβή αναγνώριση συχνότητας 53

Γραφική παράσταση 1.2: Ποσοστό μεταβολής της επίδοσης των συμμετεχόντων στην ακριβή αναγνώριση συχνότητας 53

Γραφική παράσταση 2.1: Επίδοση συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 1/3 της οκτάβας 54

Γραφική παράσταση 2.2: Ποσοστό μεταβολής της επίδοσης των συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 1/3 της οκτάβας 54

Γραφική παράσταση 3.1: Επίδοση συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 2/3 της οκτάβας 55

Γραφική παράσταση 3.2: Ποσοστό μεταβολής της επίδοσης των συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 2/3 της οκτάβας 56

Γραφική παράσταση 4.1: Επίδοση συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± οκτάβας 57

Γραφική παράσταση 4.2: Ποσοστό μεταβολής της επίδοσης των συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± οκτάβας 57

Γραφική παράσταση 5.1: Επίδοση συμμετεχόντων στην αποτυχία αναγνώρισης συχνότητας εντός οκτάβας 58

Γραφική παράσταση 5.2: Ποσοστό μεταβολής της αποτυχίας των συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας εντός οκτάβας 58

Γραφική παράσταση 6.1: Κατανομή των απαντήσεων της πειραματικής ομάδας κατά την αρχική και τελική δοκιμασία 59

Γραφική παράσταση 6.2: Κατανομή των απαντήσεων της ομάδας ελέγχου κατά την αρχική και τελική δοκιμασία 60

Γραφική παράσταση 6.3: Ποσοστό μεταβολής (%) του μέσου όρου κάθε ομάδας για την εκάστοτε κατηγορία 60

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχάς, θέλω να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου κ. Μίνω Φιτσανάκη, που εν μέσω δυσμενών εργασιακών συγκυριών δέχτηκε να αναλάβει την ευθύνη της επίβλεψής μου για την εκπόνηση της πτυχιακής μου εργασίας.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου που συμμετείχαν στην πειραματική διαδικασία, καθώς και τους εκλεκτούς μου φίλους και συναδέλφους για τα σχόλια και τις παρατηρήσεις τους.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη ψυχολογική και οικονομική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής αυτής της πτυχιακής.

Η παρούσα εργασία είναι αφιερωμένη στη μνήμη του εκλιπόντος πατέρα μου.

Ηλίας Δουμπάκης

Ρέθυμνο, Νοέμβριος 2014

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αφορμή για την επιλογή του θέματος της παρούσας εργασίας, προήλθε από την ανάγκη που μου παρουσιάστηκε πολλές φορές ως επαγγελματίας ηχολήπτης να αναγνωρίσω μια συχνότητα μικροφωνισμού ή ένα «κουδούνισμα» κατά τη διάρκεια μιας ηχογράφησης. Η αναγνώριση συχνοτήτων αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές ικανότητες που πρέπει να διαθέτει ένας καλός ηχολήπτης και όπως είναι φυσικό, η βελτίωσή της έρχεται μέσα από τη συσσώρευση εμπειρίας εξαιτίας της διαρκούς τριβής με το αντικείμενο. Ωστόσο, στο εμπόριο κυκλοφορούν πολλές μέθοδοι και προγράμματα ακουστικής εκπαίδευσης που υποστηρίζουν ότι συμπυκνώνουν χρόνια εμπειρίας σε μόλις λίγες εβδομάδες εξάσκησης. Το ερώτημα που μου γεννήθηκε τότε ήταν *μπορεί να εκπαιδευτεί η κριτική ακοή ενός μηχανικού ήχου στην αναγνώριση συχνότητας όπως υποστηρίζουν αυτά τα προγράμματα;* Έτσι λοιπόν, αποφάσισα να καταπιαστώ με το θέμα της εκπαίδευσης ακοής στην αντίληψη του ήχου και ειδικότερα του τονικού ύψους, με σκοπό να καλύψω πρωτίστως μια δικιά μου ανάγκη και κατ' επέκταση, να μοιραστώ αυτές τις γνώσεις με όσους τυχόν ενδιαφέρονται.

Η εργασία απευθύνεται κυρίως σε άτομα που έχουν ήδη μια επαφή με το αντικείμενο και επιδιώκουν να εμπλουτίσουν τις γνώσεις τους σχετικά με τον τρόπο που ο εγκέφαλος κωδικοποιεί και επεξεργάζεται μια ηχητική πληροφορία. Για το σκοπό αυτό, κάποιοι βασικοί ακουστικοί και τεχνολογικοί όροι όπως το *φάσμα του ήχου*, τα *φίλτρα*, τα *dB* ή τα *αρχεία wav*, θεωρήθηκαν γνωστοί και προτιμήθηκε για την οικονομία της εργασίας να μην δοθεί βαρύτητα στην ανάλυσή τους. Αν για κάποιο λόγο ο αναγνώστης επιθυμεί να μάθει για αυτά ή να καλύψει τυχόν κενά που μπορεί να διαπιστώσει, πιστεύουμε ότι είναι πολύ εύκολο – ειδικά στις μέρες μας – να το κάνει είτε μέσω διαδικτύου, είτε μέσω των περισσότερων βιβλίων και εγχειριδίων που ασχολούνται με την τεχνολογία της μουσικής. Η συγκεκριμένη εργασία δεν έχει στόχο να αποτελέσει μια ακόμα εισαγωγή στην Ψυχοακουστική, αλλά επιδιώκει με βάση τη σύγχρονη βιβλιογραφία να προσεγγίσει το κομμάτι της ακουστικής εκπαίδευσης και να διερευνήσει τους τρόπους με τους οποίους κάτι τέτοιο καθίσταται εφικτό.

Αυτό το εγχείρημα αποδείχτηκε τελικά αρκετά δύσκολο, κυρίως επειδή μέχρι και σήμερα η επιστήμη δεν έχει καταφέρει να ορίσει με ακρίβεια τους μηχανισμούς που διέπουν την ακουστική αντίληψη, αλλά ούτε έχει καταφέρει να περιγράψει ικανοποιητικά το σύστημα μνήμης που είναι υπεύθυνο για την εκπαίδευσή της. Ωστόσο, όλο και περισσότερες έρευνες από διαφορετικά επιστημονικά πεδία, συμβάλλουν στο να συμπληρώσουμε την εικόνα που έχουμε για τον τρόπο λειτουργίας του ακουστικού μας συστήματος και να κατανοήσουμε βαθύτερα τους παράγοντες που επηρεάζουν την αντίληψη του ήχου. Στα κεφάλαια που ακολουθούν, παρουσιάζονται όλα εκείνα τα στοιχεία που συνθέτουν την εκπαίδευση της ακοής στην αντίληψη του τονικού ύψους, από την κωδικοποίηση και την επεξεργασία έως την αποθήκευση και την ανάκληση της ηχητικής πληροφορίας. Ωστόσο, η εργασία δεν στέκεται μόνο στη μελέτη της βιβλιογραφίας αλλά προχωράει και στη δοκιμή μιας προτεινόμενης μεθόδου εκπαίδευσης, μέσω της διεξαγωγής ενός ψυχοακουστικού πειράματος που σχεδιάστηκε για το σκοπό αυτό. Έτσι λοιπόν, η δομή της εργασίας έχει ως εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο, μελετάται ο τρόπος λειτουργίας του ακουστικού μας συστήματος και το πως αυτό κωδικοποιεί τις εισερχόμενες ακουστικές πληροφορίες σε νευρωνικά σήματα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η ανατομία και η φυσιολογία του ανθρώπινου αυτιού, οι περιορισμοί του στην απόκριση εξαιτίας της κατασκευής του, καθώς και η ευαισθησία του σε ορισμένες ιδιότητες του ήχου όπως η ένταση, η συχνότητα και η διάρκεια. Επίσης, γίνεται η απαραίτητη αναφορά στη σχέση των φυσικών χαρακτηριστικών του ήχου και της υποκειμενικής τους αντίληψης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, εξετάζονται όλες οι παράμετροι που συντελούν στην αντίληψη του τονικού ύψους από τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Αρχικά, παρουσιάζονται οι επικρατέστερες θεωρίες και μοντέλα τονικής αντίληψης, ώστε να αποκτήσει ο αναγνώστης μια εικόνα για τους νευρωνικούς μηχανισμούς που εμπλέκονται στη διαδικασία. Στη συνέχεια εξετάζονται οι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται η υποκειμενική αίσθηση της συχνότητας, ενώ στη πορεία γίνεται αναφορά και στην αντίληψη του τονικού ύψους από την πλευρά της μουσικής. Τέλος, επιχειρείται μια επισκόπηση του ρόλου της μνήμης στην εκπαίδευση της ακοής, μέσα από τη μελέτη του τρόπου λειτουργίας της ακουστικής μνήμης και των χαρακτηριστικών της μάθησης που οφείλονται σε αυτήν. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση ορισμένων προγραμμάτων και μεθόδων ακουστικής εκπαίδευσης που αναπτύχθηκαν για την εξάσκηση της κριτικής ακοής των επαγγελματιών του ήχου.

Στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός ψυχοακουστικού πειράματος που σχεδιάστηκε για να ελέγξει την επίδραση της συστηματικής ακουστικής εκπαίδευσης στην αντίληψη του τονικού ύψους. Το πείραμα εξετάζει εάν μπορεί να βελτιωθεί η ικανότητα αναγνώρισης συχνοτήτων των ακροατών, μέσω της εκπαίδευσής τους με καθαρούς τόνους για ένα τυπικό χρονικό διάστημα. Εκτός από τα αποτελέσματα, παρουσιάζονται επίσης η μεθοδολογία του πειράματος και ο σχεδιασμός των πρωτότυπων ηχητικών δειγμάτων που δημιουργήθηκαν για αυτό το σκοπό.

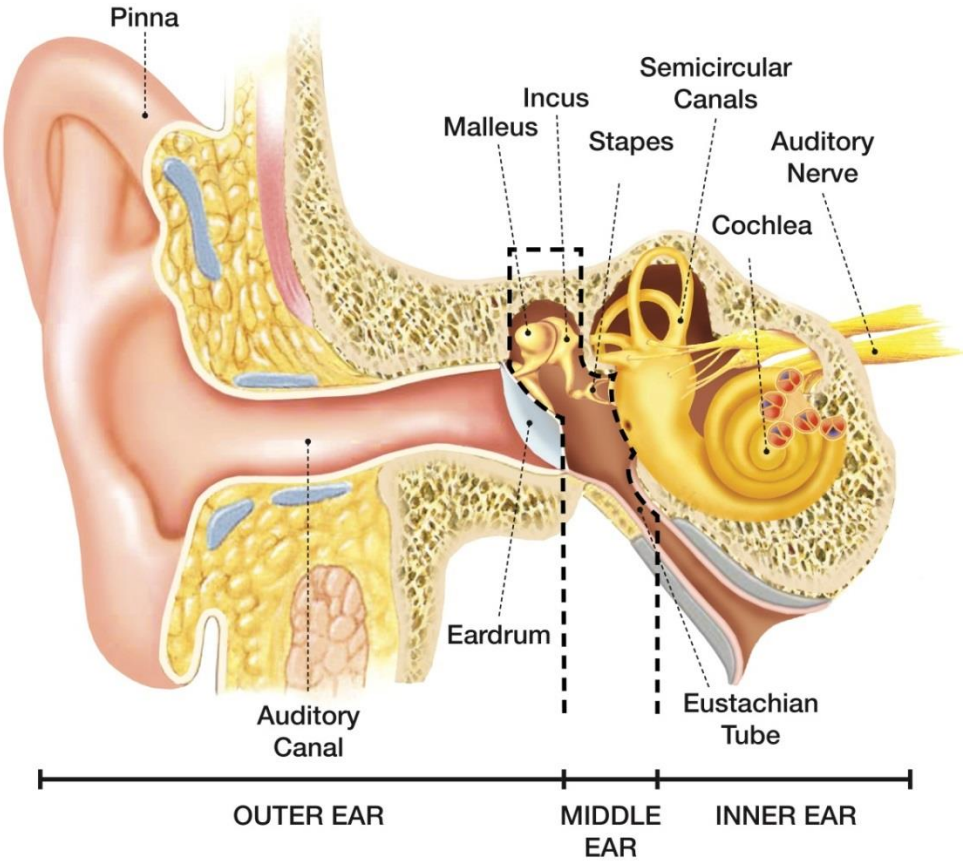
Η εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου εκπαίδευσης που ακολουθήθηκε, συνοδευόμενα από τις προτάσεις μας για μελλοντικές κατευθύνσεις της έρευνας. Σε αυτό το σημείο, παρατίθενται και οι βιβλιογραφικές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του θέματος, προσδοκώντας να αποτελέσουν μια αφετηρία για όσους ενδιαφέρονται να εμβαθύνουν στη μελέτη της αντίληψης του ήχου από τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Κλείνοντας αυτή την εισαγωγή, ευελπιστούμε πως μέσα στις επόμενες σελίδες ο αναγνώστης θα ανακαλύψει ενδιαφέρουσες πληροφορίες σχετικά με τους μηχανισμούς που κρύβονται πίσω από την αίσθηση της ακοής, βοηθώντας τον έτσι να αποκτήσει μια σαφώς πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τους παράγοντες που μπορούν να βελτιώσουν την ακουστική του ευαισθησία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Το Ανθρώπινο Αυτί και τα Φυσικά Χαρακτηριστικά του

Γενικά

Το αυτί είναι το πρώτο αισθητήριο όργανο που είναι έτοιμο να λειτουργήσει στο έμβρυο. Κάνει την εμφάνισή του από τους πρώτους μήνες της σύλληψης, ενώ λειτουργικά έχει ολοκληρωθεί από τον τέταρτο μήνα της εγκυμοσύνης. Πρόκειται για ένα μικρό όργανο, με δυσανάλογες για το μέγεθός του ιδιότητες. Μπορεί να αντέξει ήχους που φτάνουν σε ακουστική πίεση το 1 kPa, αλλά και να αντιληφθεί εντάσεις που αντιστοιχούν σε μετατόπιση του τυμπάνου μικρότερη της διαμέτρου ενός ατόμου υδρογόνου. Έχει την ικανότητα να αυτοπροστατεύεται από απότομους ήχους υψηλής έντασης, να ενισχύει τις συχνότητες που είναι σημαντικές για την ανθρώπινη επικοινωνία αλλά και να εστιάζει σε μια μόνο φωνή, απορρίπτοντας τις υπόλοιπες γύρω του (cocktail party effect). Εκτός όμως από τις λειτουργίες που σχετίζονται με την αίσθηση της ακοής, το αυτί προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες στον εγκέφαλο για τη θέση του κεφαλιού σε σχέση με το σώμα, συνεισφέροντας έτσι στην διατήρηση της ισορροπίας. Στο παρόν κεφάλαιο θα εστιάσουμε στην ανατομία και τη φυσιολογία του ακουστικού συστήματος, με σκοπό να αναδείξουμε τα στοιχεία και τους μηχανισμούς που συντελούν στην αντίληψη του ήχου.



Εικόνα 1.1 *Ανατομία του ανθρώπινου αυτιού. Χωρίζεται σε τρία μέρη: Στο εξωτερικό, το μέσο και το εσωτερικό αυτί*

1.1 Ανατομία του Αυτιού: Εξωτερικό Αυτί

Το εξωτερικό αυτί είναι το μέρος όπου ο ήχος συλλέγεται και ενισχύεται πριν μεταφερθεί στο μέσο αυτί. Αποτελείται από το πτερύγιο και το ακουστικό κανάλι, το οποίο καταλήγει στην τυμπανική μεμβράνη, η οποία δονείται ανάλογα με το ακουστικό ερέθισμα.

1.1.1 Πτερύγιο (Pinna)

Το πτερύγιο, που είναι το μοναδικό ορατό μέρος του αυτιού, είναι το πρώτο τμήμα του οργάνου που συναντάει ο ήχος. Είναι κατασκευασμένο από χόνδρο και έχει πτυχές, ενώ επιτελεί δύο βασικές λειτουργίες. Η πρώτη είναι να συγκεντρώνει τους ήχους που φτάνουν σε αυτό και να τους διοχετεύει στο ακουστικό κανάλι και η δεύτερη είναι να βοηθάει στον εντοπισμό της ηχητικής πηγής. Αυτό γίνεται επειδή η μορφολογία του πτερυγίου διαφοροποιεί την ηχητική πληροφορία από τα 4 kHz περίπου και πάνω, ανάλογα με την κατεύθυνση της πηγής. Το αποτέλεσμα της φασματικής διαφοροποίησης που προκύπτει, επιτρέπει στον εγκέφαλο να εντοπίσει τη σχετική θέση της πηγής στο χώρο.[1] Οι συναρτήσεις που περιγράφουν τη διαφορά μεταξύ του ήχου της πηγής και του ήχου που περνάει από το πτερύγιο, ονομάζονται *Head Related Transfer Functions* (HTRFs). Το πτερύγιο συναντάται μόνο στα θηλαστικά και διαφέρει αρκετά από είδος σε είδος. Παρατηρείται δε, ότι τα θηλαστικά με ικανότητα ακοής πολύ υψηλών συχνοτήτων έχουν κινούμενα πτερύγια για μεγαλύτερη ευαισθησία στον εντοπισμό της κατεύθυνσης μιας ηχητικής πηγής. Το ανθρώπινο πτερύγιο ωστόσο δεν διαθέτει τους απαραίτητους μύες για μια τέτοια κίνηση και βασίζεται στην κίνηση ολόκληρου του κεφαλιού.

1.1.2 Ακουστικό Κανάλι (Auditory Canal)

Το ακουστικό κανάλι είναι ένας αγωγός με μέση διάμετρο 0,8 cm και μήκος περίπου 2,5 cm. Ενώνει το πτερύγιο με το εξωτερικό στρώμα της τυμπανικής μεμβράνης και έχει την ικανότητα να ενισχύει τον ήχο από τα 3 έως 12 kHz.[2] Λόγω της δομής του, μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ως ένας σωλήνας με κλειστή τη μια του άκρη. Έτσι, εξαιτίας του φαινομένου του συντονισμού, η ενίσχυση που μπορεί να προκαλέσει πλησιάζει ακόμα και τα 15 dB, με το μέγιστο να βρίσκεται κοντά στη συχνότητα που ο σωλήνας έχει το ένα τέταρτο του μήκους κύματος, δηλαδή περίπου στα 3 kHz.[3] Με αυτόν τον τρόπο ενισχύει τις συχνότητες που είναι σημαντικές για την ανθρώπινη ομιλία. Μια ακόμα πολύ σημαντική λειτουργία του είναι η προστασία του μέσου αυτιού από εξωτερικά σώματα και από αλλαγές στην υγρασία και την θερμοκρασία. Αυτό είναι επίσης το μέρος του αυτιού στο οποίο παράγεται το κερί, από αδένες που βρίσκονται στον ιστό του εξωτερικού τμήματος του ακουστικού πόρου.

1.2 Ανατομία του Αυτιού: Μέσο Αυτί

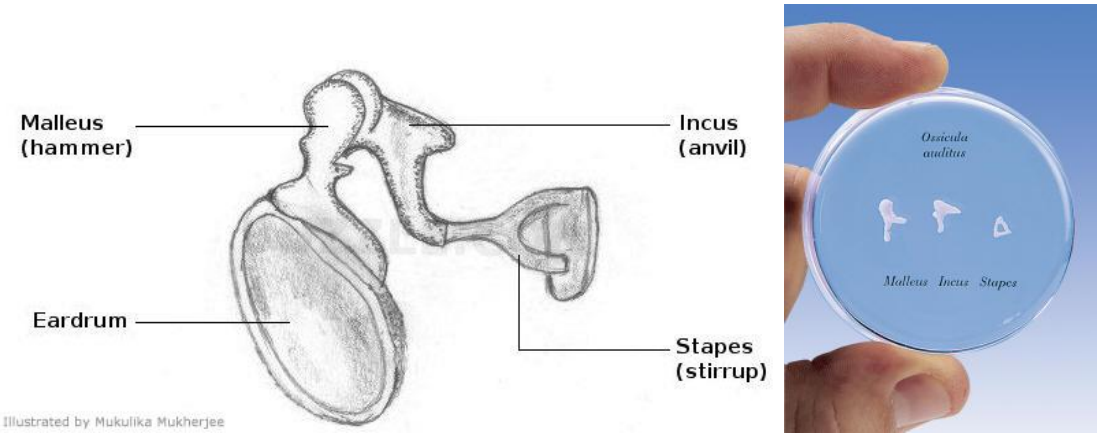
Το μέσο αυτί, είναι το τμήμα του οργάνου που μεταφέρει μηχανικά την ακουστική ενέργεια από το γεμάτο αέρα εξωτερικό αυτί στον γεμάτο υγρό κοχλία. Αποτελείται από την τυμπανική μεμβράνη, τα οστάρια και τους μύες του μέσου αυτιού, την κοιλότητα του μέσου αυτιού και την ευσταχιανή σάλπιγγα.

1.2.1 Τυμπανική Μεμβράνη (Tympanic Membrane)

Η τυμπανική μεμβράνη, γνωστή και ως *τύμπανο* (eardrum), είναι μια σχετικά διαφανής, κυρτή μεμβράνη με επιφάνεια περίπου 80 mm^2, που αποτελείται από τρία λεπτά στρώματα ιστού και συγκρατείται στη θέση της από νευρικές ίνες. Χωρίζει το ακουστικό κανάλι από την κοιλότητα του μέσου αυτιού και λειτουργεί ως ένας μετατροπέας ακουστικής πίεσης σε μηχανική κίνηση, μεταφέροντας τις δονήσεις από τα ηχητικά κύματα που προκαλούνται στην επιφάνειά της, στα οστάρια που τη συνδέουν με τον κοχλία. Η ελαστικότητα της μεμβράνης παίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματική μετάδοση της ενέργειας καθώς, εάν είναι πολύ άκαμπτη θα αντανακλά μεγάλο μέρος της ενέργειας πίσω στο ακουστικό κανάλι, ενώ αν είναι πολύ εύκαμπτη θα απορροφά αρκετή από την ενέργεια.[4]

1.2.2 Σφύρα, Άκμονας και Αναβολέας (Malleus, Incus, Stapes)

Η σφύρα, ο άκμονας και ο αναβολέας, είναι τρία μικρά οστά που βρίσκονται στην ακουστική κοιλότητα του μέσου αυτιού και είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά της ηχητικής ενέργειας από το τύμπανο στον κοχλία. Η σφύρα, που είναι προσαρτημένη στο κέντρο της τυμπανικής μεμβράνης, συνδέεται με τον άκμονα και αυτός με τη σειρά του με τον αναβολέα. Το πέλμα του αναβολέα είναι ενωμένο με μια μικρή μεμβράνη που ονομάζεται *ελλειψοειδές παράθυρο* (ή οβάλ παράθυρο), το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το υγρό του κοχλία. Επειδή όμως το υγρό παρουσιάζει μεγαλύτερη αδράνεια από ότι ο αέρας, είναι απαραίτητη η προσαρμογή αντιστάσεων για την αποτελεσματική μετάδοση της ενέργειας στο έσω αυτί. Έτσι, τα οστάρια λειτουργούν σαν ένα σύστημα μοχλών που μετατρέπουν τις ταλαντώσεις χαμηλής πίεσης στη τυμπανική μεμβράνη, σε ταλαντώσεις υψηλής πίεσης στο ελλειψοειδές παράθυρο. Η σφύρα, ο άκμονας και ο αναβολέας κινούνται στον ίδιο άξονα και πάντα σχετικά με τις δονήσεις της μεμβράνης. Επίσης, εξαιτίας των μυών που φέρουν, έχουν την τάση να αποσβένουν την κίνησή τους αμέσως μόλις σταματήσει η ηχητική διέγερση, αποτρέποντας έτσι το φαινόμενο της ηχούς.[5]



Εικόνα 1.2 *Τα οστάρια του μέσου αυτιού*

1.2.3 Ενίσχυση της Ακουστικής Πίεσης στο Μέσο Αυτί

Ο λόγος αντιστάσεων μεταξύ του αέρα και του υγρού του έσω αυτιού είναι 4000:1 και άρα ο λόγος πιέσεων που χρειάζεται για την προσαρμογή των δύο μέσων είναι περίπου 63:1. Το νούμερο αυτό επιτυγχάνεται ως εξής: Τα οστά του μέσου αυτιού σχηματίζουν μια μηχανική σύνδεση μεταξύ του τυμπάνου και του ελλειψοειδούς παραθύρου. Στη σύνδεση αυτή υπάρχει κίνηση μοχλού με αναλογία 1,3:1 μέχρι 3:1. Επίσης, η επιφάνεια του τυμπάνου είναι περίπου 80 mm^2 ενώ του ελλειψοειδούς παραθύρου μόλις 3 mm^2. Έτσι, μια δεδομένη δύναμη στο τύμπανο αυξάνεται κατά ένα λόγο 80:3 ή περίπου 27 φορές. Η συνολική αύξηση της δύναμης των παραπάνω είναι μεταξύ 35 και 80 φορές.[6] Έτσι, υπερκαλύπτεται η ζητούμενη ενίσχυση της ακουστικής πίεσης στο μέσο αυτί και η ηχητική πληροφορία μπορεί να μεταδοθεί αποτελεσματικά από το τύμπανο στο υγρό του κοχλία.

1.2.4 Οι Μύες των Οσταρίων και το Acoustic Reflex

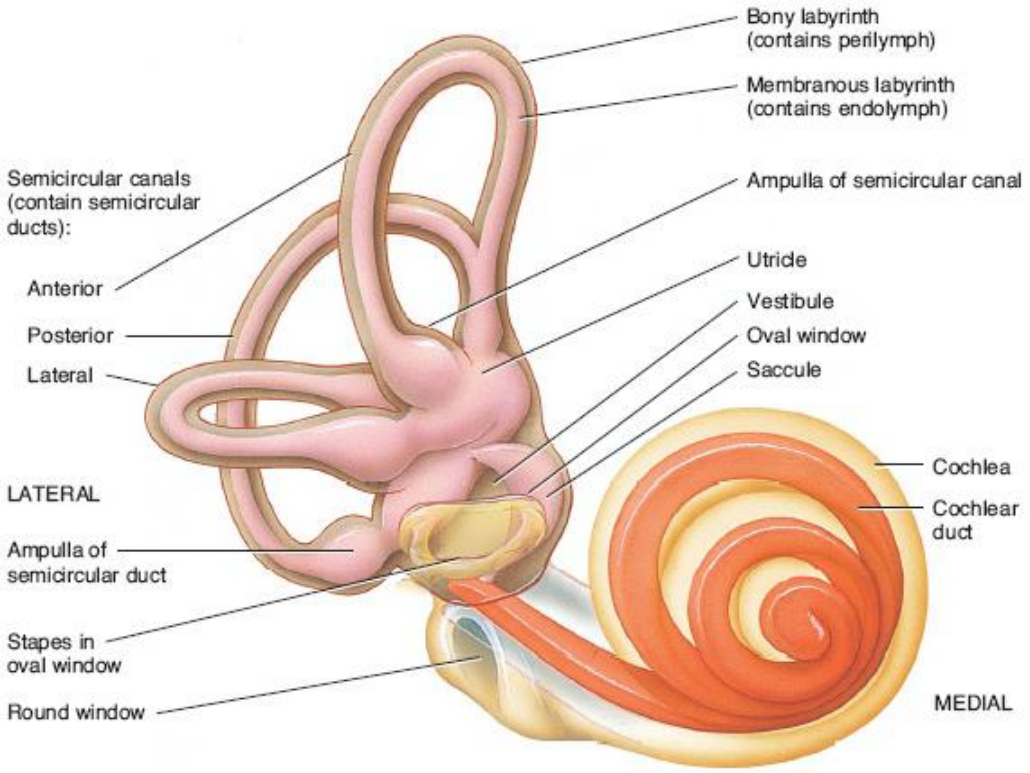
Η σφύρα και ο αναβολέας συνδέονται με μύες που ονομάζονται *tensor tympani* και *stapedius muscle* αντίστοιχα. Οι μύες αυτοί συστέλλονται ακούσια μόλις ο εγκέφαλος αντιληφθεί δυνατούς ήχους χαμηλής συχνότητας, προκαλώντας αυτό που ονομάζουμε *acoustic reflex* (ή attenuation reflex). Το acoustic reflex, είναι ένας αντανακλαστικός μηχανισμός που ενεργοποιείται με μια καθυστέρηση των 40 με 80 msec, μειώνοντας την ένταση των ήχων που διέρχονται στον κοχλία κατά 30 με 40 dB, με έμφαση στις συχνότητες κάτω του 1 kHz.[7] Αυτό γίνεται επειδή κατά τη συστολή των μυών, δυσχεραίνεται η κίνηση των οσταρίων και άρα μειώνεται σημαντικά η μετάδοση ενέργειας μέσω αυτών. Η χρησιμότητα του μηχανισμού αυτού είναι διττή. Πρώτον, προστατεύει το ευαίσθητο εσωτερικό αυτί από τη ζημιά που μπορεί να προκαλέσει μια έκθεση σε υψηλής έντασης ήχους και δεύτερον, βοηθάει στο να εστιάζουμε την ακοή μας μέσα σε ένα θορυβώδες περιβάλλον, μειώνοντας την επικάλυψη (masking) που προκαλείται από τις χαμηλές συχνότητες. Πρόσθετα στο acoustic reflex, οι μύες αυτοί συστέλλονται για να μειώσουν την αντίληψη του ήχου που παράγεται από τον άνθρωπο κατά τη φώνηση ή κατά την κίνηση του σώματος.

1.2.5 Ευσταχιανή Σάλπιγγα (Eustachian Tube)

Η ευσταχιανή σάλπιγγα είναι ένας αγωγός περίπου 3,5 cm σε μήκος που ενώνει την κοιλότητα του μέσου αυτιού με το ρινοφάρυγγα. Το 1/3 περίπου του αγωγού προς το αυτί είναι οστέινο, ενώ το υπόλοιπο είναι από χόνδρο. Κατά κύριο λόγο παραμένει κλειστός και ανοίγει ακούσια κατά την κατάποση. Η βασική λειτουργία της σάλπιγγας, είναι να προστατεύει την ευαίσθητη τυμπανική μεμβράνη από τη διαφορά πίεσης στις δύο πλευρές της, που προκύπτει από τη μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης σε σχέση με την πίεση του αέρα που βρίσκεται παγιδευμένος στο μέσο αυτί. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισροή μικρής ποσότητας αέρα από τον ρινοφάρυγγα κατά το άνοιγμά της, που έχει σαν αποτέλεσμα την εξίσωση της πίεσης μεταξύ του αέρα της ακουστικής κοιλότητας και του περιβάλλοντος. Με αυτό τον τρόπο, η μεμβράνη κινείται ελεύθερα και διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία της. Η ευσταχιανή σάλπιγγα επίσης χρησιμοποιείται από τον οργανισμό για την παροχέτευση της βλέννας που συσσωρεύεται στο μέσο αυτί από μολύνσεις ή αλλεργίες.

1.3 Ανατομία του Αυτιού: Εσωτερικό Αυτί

Το εσωτερικό αυτί εντοπίζεται βαθιά στο πλάγιο μέρος του κρανίου και περικλείεται από ένα πυκνό οστό που αποκαλείται *οστέινος λαβύρινθος* (bony labyrinth). Αυτή η οστέινη κύστη περιέχει το *μεμβρανώδη λαβύρινθο* (membranous labyrinth) που χωρίζεται σε δύο μέρη, τον κοχλία και το αιθουσαίο. Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα περίπλοκο σύνολο, κυρίως λόγω της ανατομικής κατασκευής των διαφόρων στοιχείων που το απαρτίζουν.



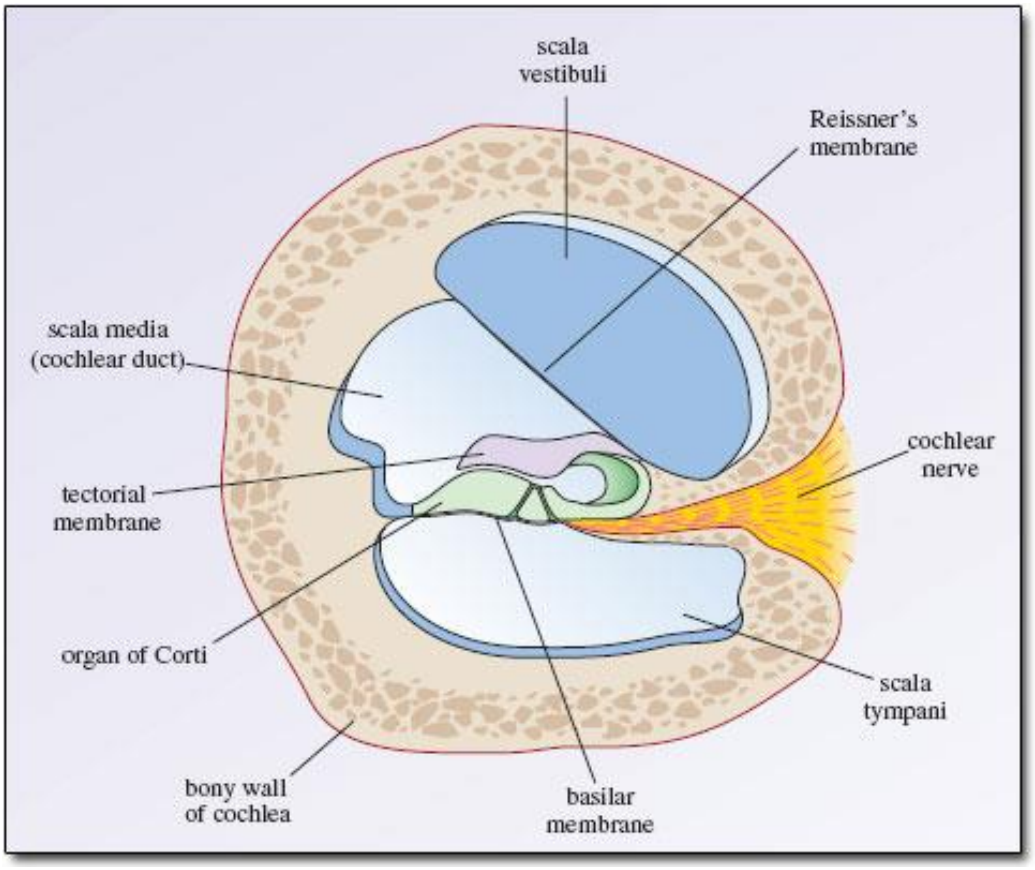
Εικόνα 1.3 *Ανατομία του εσωτερικού αυτιού*

1.3.1 Αιθουσαίο (Vestibular System)

Το αιθουσαίο σχετίζεται με την αίσθηση της ισορροπίας του σώματος και του προσανατολισμού στον τρισδιάστατο χώρο. Αποτελείται από τρεις *ημικυκλικούς σωλήνες* (semicircular canals) και τα όργανα των ωτολίθων που χωρίζονται στο *ελλειπτικό* (utricle) και στο *σφαιρικό* (saccule) κυστίδιο. Οι ημικυκλικοί σωλήνες, που είναι διατεταγμένοι σε τρία διαφορετικά επίπεδα, παράγουν πληροφορίες για την κλίση και τη γωνιακή ταχύτητα του κεφαλιού σε σχέση με το σώμα, ενώ τα όργανα των ωτολίθων για την γραμμική επιτάχυνση στο οριζόντιο και κάθετο επίπεδο. Οι πληροφορίες αυτές επεξεργάζονται από τον εγκέφαλο μαζί με άλλα αισθητήρια ερεθίσματα, προκαλώντας τρία σημαντικά αντανακλαστικά. Αυτά τα αντανακλαστικά επιτρέπουν στα μάτια να ακολουθούν την κίνηση του κεφαλιού (vestibulo-ocular reflex – VOR), τους μύες του λαιμού να φροντίζουν την σταθεροποίησή του (vestibulocollic reflex – VCR) και το σώμα να κάνει αντισταθμιστικές κινήσεις ώστε να αποφεύγεται η πτώση (vestibulospinal reflex – VSR).

1.3.2 Κοχλίας (Cochlea)

Ο κοχλίας είναι ένα σύστημα αγωγών που είναι τυλιγμένοι σε σχήμα σαλιγκαριού, σχηματίζοντας δυόμισι έλικες. Ο όγκος του είναι γύρω στα 0.2 ml και το μήκος του σε έκταση φτάνει περίπου τα 34 mm. Αποτελείται από τις κοιλότητες *scala vestibule*, *scala media* και *scala tympani*. Η μεμβράνη του *Reissner* (ή αλλιώς vestibular membrane), διαχωρίζει την πρώτη από τη δεύτερη και η *βασική μεμβράνη* (basilar membrane), τη δεύτερη από την τρίτη. Το υγρό που περιέχεται στη scala vestibule και στη scala tympani ονομάζεται *περίλεμφος* (perilymph) και παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε ιόντα νατρίου, ενώ το υγρό στη scala media ονομάζεται *ενδόλεμφος* (endolymph) και αποτελείται κυρίως από ιόντα καλίου. Επί της βασικής μεμβράνης και κατά μήκος της, εκτείνεται το *Όργανο του Κόρτι*, το οποίο φέρει πολυάριθμα τριχοειδή κύτταρα που δρουν ως ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς, μετατρέποντας τις δονήσεις της μεμβράνης σε ηλεκτρικά νευρωνικά σήματα. Στη βάση του κοχλία, η scala vestibule επικοινωνεί με το ελλειψοειδές παράθυρο ενώ η scala tympani επικοινωνεί με το *στρογγυλό παράθυρο* (round window). Αυτό είναι μια παρόμοια με το ελλειψοειδές παράθυρο μεμβράνη, η οποία όμως κινείται σε αντίθετη φάση ώστε να εκτονώνεται η πίεση που προκαλείται στο πρακτικά ασυμπίεστο υγρό που περιέχεται στο εσωτερικό του κοχλία.



Εικόνα 1.4 *Σχηματική αναπαράσταση της διατομής του κοχλία*

1.3.3 Βασική Μεμβράνη (Basilar Membrane)

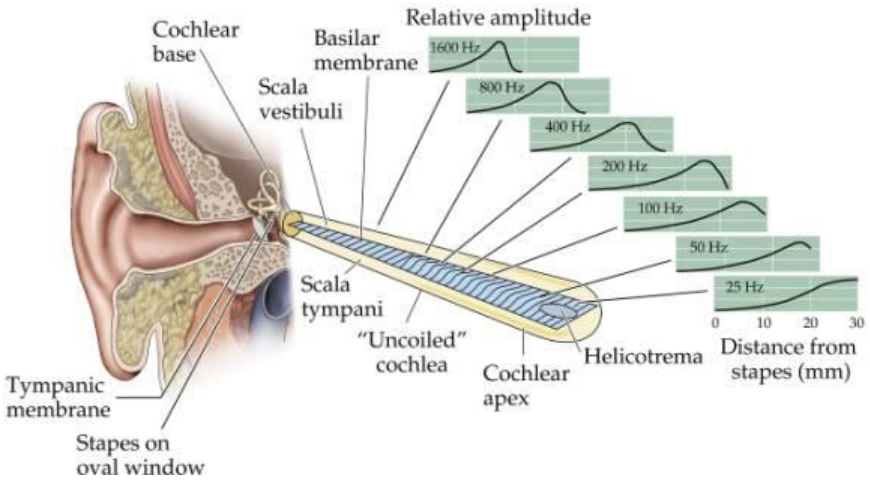
Η βασική μεμβράνη που χωρίζει τη scala media από τη scala tympani, έχει πλάτος περίπου 0.04 mm στη βάση του κοχλία και 0.5 mm στην άκρη του (που ονομάζεται και *ελικότρημα*). Αυξάνεται δηλαδή το εύρος της κατά 12 φορές. Αντίθετα, η ακαμψία της μειώνεται προς την ίδια κατεύθυνση κατά 100 φορές. Έτσι, παρατηρείται στη βάση της κοντά στο οβάλ παράθυρο να είναι στενή και άκαμπτη και καθώς εκτείνεται στην κορυφή της να γίνεται φαρδιά και εύκαμπτη. Η βασική μεμβράνη δονείται εξαιτίας των ταλαντώσεων που μεταφέρονται σε αυτήν μέσω του υγρού της scala vestibule, από την κίνηση του ελλειψοειδούς παραθύρου στο οποίο είναι προσαρτημένος ο αναβολέας. Να σημειωθεί πως η μεμβράνη του Reissner είναι πάρα πολύ λεπτή και δεν εμποδίζει τις δονήσεις του υγρού της scala vestibule να μεταφερθούν στη scala media και επομένως στη βασική μεμβράνη. Η σημασία της περιορίζεται στον διαχωρισμό των υγρών που αυτές οι δύο κοιλότητες περιέχουν.

1.3.4 Το Όργανο του Κόρτι (Organ of Corti)

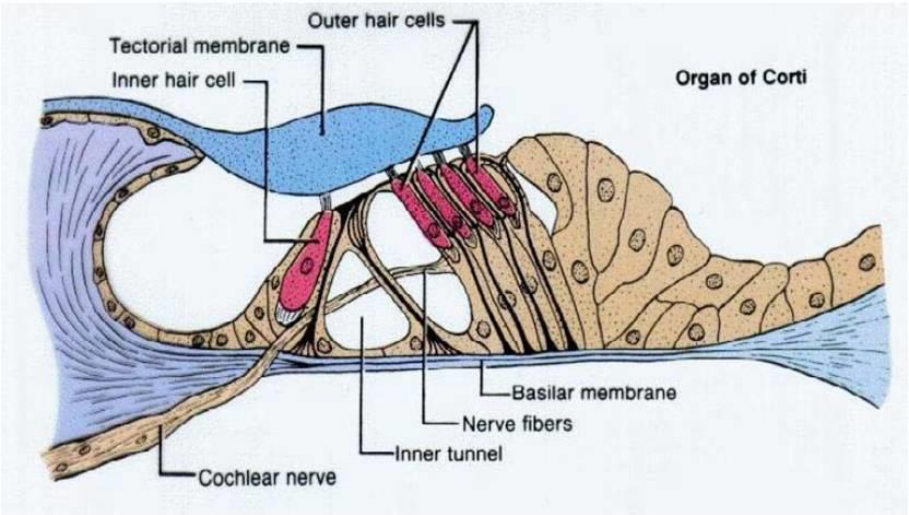
Το όργανο του Κόρτι, είναι το αισθητήριο όργανο που μετατρέπει τις δονήσεις της βασικής μεμβράνης σε νευρωνικά σήματα (nerve impulses). Τη δουλειά αυτή αναλαμβάνουν εξειδικευμένα νευρωνικά κύτταρα που ονομάζονται *τριχοειδή κύτταρα* (hair cells) και χωρίζονται, ανάλογα με τη θέση τους στο όργανο, στα *εσωτερικά* και στα *εξωτερικά*. Στις κορυφές αυτών των κυττάρων εξέχουν κάθετα πολλά μικρά τριχίδια που ονομάζονται *στερεοτριχία* (strereocilia) τα οποία είτε εφάπτονται, είτε είναι συνδεδεμένα με την *καλυπτήρια μεμβράνη* (tectorial membrane) που εκτείνεται ακριβώς από πάνω τους. Έτσι, οι κινήσεις της βασικής μεμβράνης κατά την ταλάντωσή της, αναγκάζουν τα στερεοτριχία να λυγίζουν προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση, προκαλώντας ανάλογη ηλεκτρική φόρτιση που οφείλεται στην κίνηση ιόντων καλίου (K^+) από την ενδόλεμφο προς τον ενδοκυτταρικό χώρο. Αυτή η διέγερση στη συνέχεια μεταφέρεται στο *ακουστικό νεύρο* (auditory nerve) και από εκεί στον εγκέφαλο. Σύγχρονες έρευνες δείχνουν πως η κωδικοποίηση της ηχητικής πληροφορίας προέρχεται από τα εσωτερικά τριχοειδή κύτταρα, ενώ τα εξωτερικά χρησιμεύουν στην ενίσχυση και διαμόρφωση της λειτουργίας των εσωτερικών.[8]

1.3.5 Η Θεωρία του «Ταξιδεύοντος Κύματος» (Traveling Wave Theory)

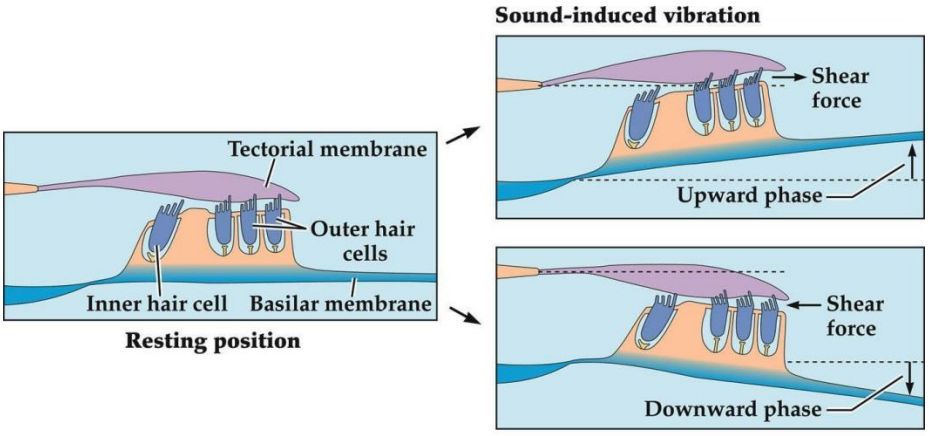
Ο ακριβής μηχανισμός με τον οποίο κωδικοποιείται μια ηχητική πληροφορία σε νευρωνικά σήματα, παραμένει μέχρι και σήμερα ασαφής. Ωστόσο, η επικρατέστερη θεωρία είναι αυτή του «ταξιδεύοντος κύματος». Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, η ενέργεια που μεταφέρεται στο υγρό του κοχλία από το ελλειψοειδές παράθυρο εξαναγκάζει σε ταλάντωση τη βασική μεμβράνη κοντά στην βάση της, προκαλώντας το σχηματισμό ενός κύματος που διαδίδεται κατά μήκος της. Καθώς το κύμα «ταξιδεύει» προς το ελικότρημα, αυξάνεται προοδευτικά το εύρος του μέχρι το σημείο όπου η συχνότητα συντονισμού της μεμβράνης (που είναι άμεσα εξαρτημένη από τα φυσικά της χαρακτηριστικά), συμπίπτει με τη συχνότητα του ακουστικού ερεθίσματος. Στο σημείο αυτό εμφανίζεται μια κορυφή εξαιτίας του συντονισμού, ο οποίος όμως προκαλεί την ταχύτατη απώλεια της ενέργειας του κύματος με αποτέλεσμα η διάδοσή του να σταματάει εκεί. Έτσι λοιπόν επιτελείται μια *τονοτοπική* κατανομή κατά μήκος της μεμβράνης, με τις υψηλές συχνότητες να εμφανίζονται κοντά στη βάση της, οι χαμηλές προς το ελικότρημα και οι μεσαίες στο ενδιάμεσο.



Εικόνα 1.5 *Τονοτοπική κατανομή συχνοτήτων στη βασική μεμβράνη*



Εικόνα 1.6 *Το όργανο του Κόρτι*



Εικόνα 1.7 *Παραμόρφωση των στερεοτριχίων κατά την ταλάντωση της βασικής μεμβράνης*

1.4 Ευαισθησία Ακουστικού Συστήματος

Το ανθρώπινο αυτί είναι ένα πολύ ευαίσθητο όργανο που όμως διατηρεί κάποιους περιορισμούς στο πώς αντιλαμβάνεται τον ήχο. Οι περιορισμοί οφείλονται κυρίως στην ανατομία του και ορίζουν την ευαισθησία του σε ένα ηχητικό ερέθισμα. Οι σημαντικότερες πτυχές της ευαισθησίας του ακουστικού μας συστήματος είναι τα όρια ακουστότητας και η ελάχιστη αντιληπτή διαφορά (just noticeable difference – JND) στην ένταση, τη συχνότητα και τη διάρκεια ενός ήχου. Σημειώνεται πως τα δεδομένα λαμβάνονται από ψυχοακουστικά πειράματα σε τυπικό αριθμό μέσων ακροατών και αφορούν στην απόκριση του αυτιού σε καθαρούς τόνους.

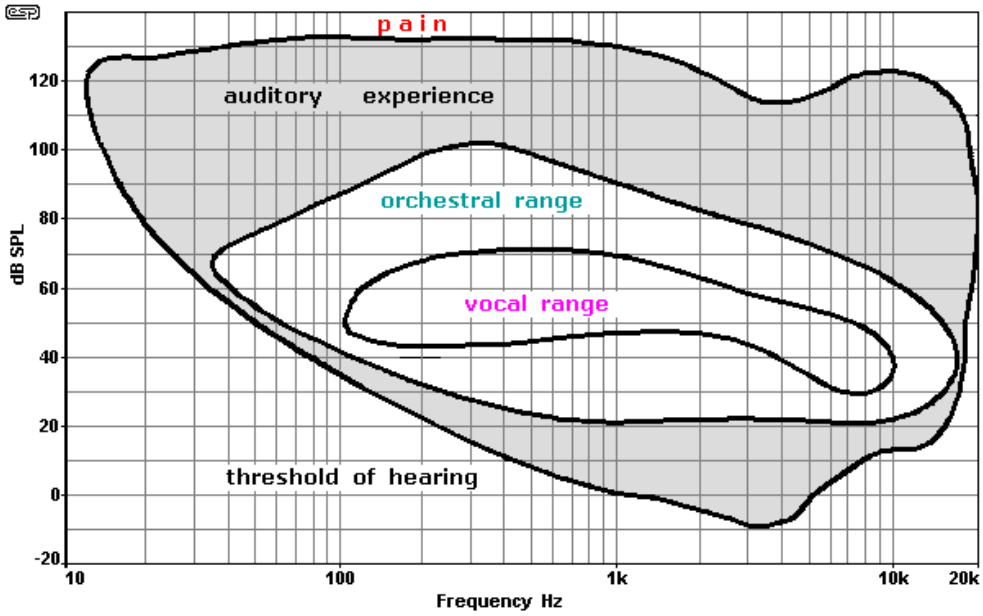
1.4.1 Μη Γραμμικότητα του Ακουστικού Συστήματος

Ο ήχος που αντιλαμβάνεται ο εγκέφαλος, δεν είναι ακριβώς ο ίδιος με αυτόν που ακούμε στην πραγματικότητα. Αυτό συμβαίνει επειδή το ακουστικό σύστημα του ανθρώπου παρουσιάζει μη γραμμικά χαρακτηριστικά, δηλαδή εισάγει κάποιες επιπλέον συχνότητες που δεν υπάρχουν στην αρχική ηχητική πληροφορία. Αυτού του τύπου η παραμόρφωση είναι προϊόν της συνολικής λειτουργίας του εσωτερικού αυτιού και δεν μπορεί να μετρηθεί με συμβατικά όργανα. Μπορεί όμως να παρατηρηθεί έμμεσα, με απλά ηχητικά πειράματα που υποδηλώνουν την παρουσία αρμονικών (aural harmonics) και τόνων συνδυασμού (combination tones). Η μη γραμμική συμπεριφορά του αυτιού αποκαλείται *compressive nonlinearity* και εξαρτάται από την ένταση των συχνοτήτων που εισέρχονται σε αυτό.

1.4.2 Όρια Ακουστότητας (Thresholds of Audibility)

Για να γίνει αντιληπτός ένας ήχος από το ανθρώπινο αυτί, θα πρέπει να ξεπερνάει μια ελάχιστη τιμή έντασης η οποία εξαρτάται από τη συχνότητά του. Το ελάχιστο αυτό όριο ονομάζεται *κατώφλι ακουστότητας* (threshold of hearing) και χαρακτηρίζει την ευαισθησία του αυτιού στο ακουστικό φάσμα. Η χαμηλότερη τιμή του εντοπίζεται στη μεσαία περιοχή και κυμαίνεται στα 0 dB_{SPL}, που αντιστοιχούν σε 20 μPa ακουστικής πίεσης. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις το κατώφλι ακουστότητας μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές, που σημαίνει ότι ο ακροατής είναι ευαίσθητος σε πίεση μικρότερη των 20 μPa. Η αύξηση που παρατηρείται για τις συχνότητες κάτω του 1 kHz και άνω των 4 kHz, οφείλεται αφενός στις συναρτήσεις μεταφοράς (HTRFs) του εξωτερικού και ιδιαίτερα του μέσου αυτιού και αφετέρου στη μάζα του ίδιου του ακουστικού συστήματος, που λόγω αδράνειας λειτουργεί ως υψιπερατό φίλτρο.[9]

Το όριο της έντασης πάνω από το οποίο ένας ήχος προκαλεί πόνο και θεωρείται επιβλαβής, ονομάζεται *κατώφλι του πόνου* (threshold of pain) και διαφοροποιείται ελάχιστα με τη συχνότητα. Αυτό ουσιαστικά μας δείχνει ότι η ευαισθησία του αυτιού σε πολύ μεγάλες εντάσεις παραμένει σχετικά σταθερή. Το όριο για το κατώφλι του πόνου μπορεί να υπερβεί τα 130 dB_{SPL}, αν και τέτοια ένταση συνήθως προκαλεί ζημιά στο αυτί και οδηγεί σε απώλεια ακοής. Η τιμή για το κατώφλι ακουστότητας εξαρτάται από παράγοντες όπως η ηλικία, το φύλο και η εκπαίδευση ακοής, σε αντίθεση με το κατώφλι του πόνου όπου τέτοιοι παράγοντες δεν το επηρεάζουν ιδιαίτερα. Στην εικόνα 1.8 παρουσιάζεται το δυναμικό εύρος του ακουστικού μας συστήματος, όπως καθορίζεται από τα δύο κατώφλια.



Εικόνα 1.8 *Το δυναμικό εύρος ενός τυπικού ανθρώπινου αυτιού*

1.4.3 Διάκριση Έντασης (Intensity Discrimination)

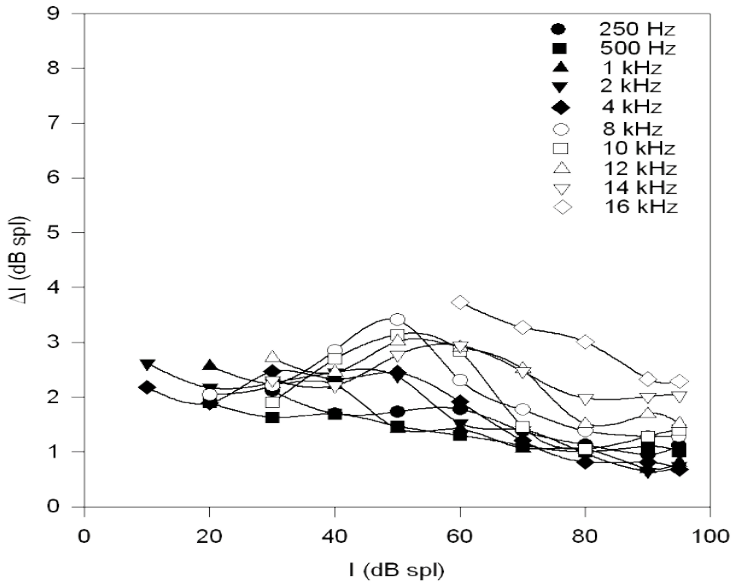
Η διάκριση της έντασης αφορά στην ικανότητα του ακουστικού μας συστήματος να αντιλαμβάνεται διαφορές στην ένταση ενός ήχου. Μέσα από πειράματα προκύπτει πως η ελάχιστη αντιληπτή διαφορά (JND) παραμένει σχετικά σταθερή για εντάσεις από 20 έως 80 dB_{SPL} και ανεξάρτητη συχνότητας από τα 250 έως τα 4000 Hz.[10] Σε υψηλές στάθμες ωστόσο, η JND φαίνεται να μειώνεται ελαφρά, κάτι που πιθανόν οφείλεται στην εξάπλωση της διέγερσης κατά μήκος της βασικής μεμβράνης που συμβαίνει σε τέτοιες εντάσεις. Αντίθετα, η JND αυξάνεται δραματικά κοντά στο κατώφλι ακουστότητας και ειδικά για τις συχνότητες κάτω των 200 Hz. Γενικά, πάντως, ισχύει ότι η ελάχιστη αντιληπτή διαφορά για την ένταση κυμαίνεται περίπου στο 1 dB.[11]

1.4.4 Διάκριση Συχνότητας (Frequency Discrimination)

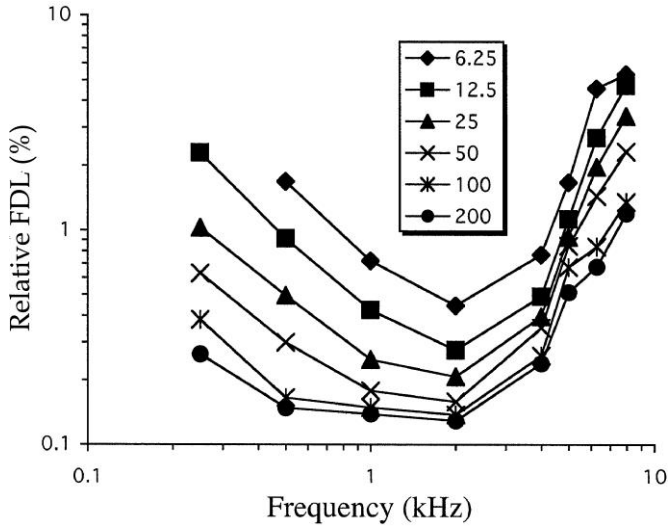
Αντίστοιχα με τη διάκριση έντασης, η διάκριση συχνότητας αφορά στη μικρότερη αντιληπτή μεταβολή της συχνότητας ενός ήχου. Τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί για την μέτρηση της JND, δείχνουν πως το αυτί διατηρεί μια υψηλή ευαισθησία στην αλλαγή της συχνότητας στη μεσαία περιοχή (500 - 2000 Hz), ενώ η ανάλυση μειώνεται στα δύο άκρα του φάσματος και περισσότερο για τις συχνότητες άνω των 5 KHz. Η τιμή της JND εξαρτάται άμεσα από τη συχνότητα του ερεθίσματος και για αυτό συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό μιας κεντρικής συχνότητας. Το ποσοστό κάτω από ιδανικές συνθήκες μπορεί να φτάσει το 0,2%, που σημαίνει ότι για έναν ήχο 1 kHz η ελάχιστη αντιληπτή διαφορά είναι μόλις 2 Hz.[12] Η διάκριση συχνότητας επηρεάζεται επίσης από τη διάρκεια και την ένταση του ερεθίσματος. Έχει παρατηρηθεί ότι για διάρκειες κάτω των 200 msec, η JND αυξάνεται σημαντικά ενώ το ίδιο συμβαίνει και όταν η ένταση του ήχου πέφτει κάτω από τα 25 dB.[13]

1.4.5 Διάκριση Διάρκειας (Duration Discrimination)

Η διάκριση της διάρκειας αφορά στην ικανότητα αντίληψης της διαφοράς στη διάρκεια ενός ήχου. Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τις έρευνες είναι ότι η JND εξαρτάται από τη διάρκεια του ηχητικού ερεθίσματος και μάλιστα μειώνεται όσο ελαττώνεται η συνολική διάρκειά του. Τυπικά, για διάρκειες 10, 100 και 1000 msec, η ελάχιστη αντιληπτή διαφορά είναι 4, 15 και 60 msec αντίστοιχα.[14] Επιπλέον, τα αποτελέσματα δείχνουν να είναι ανεξάρτητα από την ένταση του ερεθίσματος αλλά και από τα φασματικά χαρακτηριστικά του όταν πρόκειται για σύνθετους τόνους. Γενικά, πάντως, οι μηχανισμοί που διέπουν την διάκριση διάρκειας παραμένουν μέχρι και σήμερα ελάχιστα κατανοητοί.



Εικόνα 1.9 *Ελάχιστη αντιληπτή διαφορά στην ένταση* (ΔI) *για διάφορες συχνότητες*



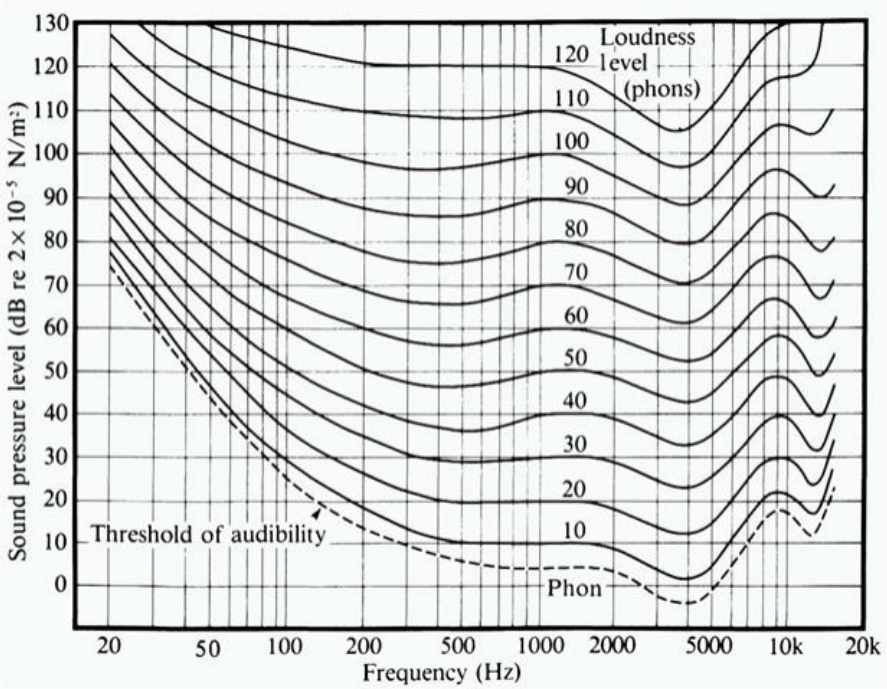
Εικόνα 1.10 *Ελάχιστη αντιληπτή διαφορά στη συχνότητα, ως ποσοστό μιας κεντρικής συχνότητας* $[100 \cdot (\Delta f / f)]$ *για διάφορες διάρκειες*

1.5 Υποκειμενικά Χαρακτηριστικά του Ήχου

Η ακουστότητα, το τονικό ύψος και η χροιά, είναι έννοιες που περιγράφουν τη μη γραμμική σχέση μεταξύ των φυσικών χαρακτηριστικών του ήχου και της υποκειμενικής τους αντίληψης. Αυτές οι ιδιότητες δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα επειδή αφορούν την υποκειμενική αίσθηση του κάθε ακροατή, αλλά παραμένουν χρήσιμες στην μελέτη της απόκρισης του ακουστικού μας συστήματος.

1.5.1 Ακουστότητα (Loudness)

Ακουστότητα ονομάζεται η υποκειμενική αίσθηση της έντασης ενός ήχου. Διαφέρει από τη πραγματική ένταση επειδή επηρεάζεται άμεσα από τη στάθμη και τη συχνότητά του. Μονάδα μέτρησης της ακουστότητας είναι το *sone*, που ορίζεται ως η ακουστότητα ενός τόνου 1000 Hz στα 40 dB_{SPL}. Αύξηση της έντασης κατά 10 dB, οδηγεί σε διπλασιασμό των sone και άρα σε διπλασιασμό της ακουστότητας. Η στάθμη ακουστότητας του ήχου μετριέται σε *phon*, που αντιστοιχούν στα dB_{SPL} ενός τόνου 1000 Hz που ακούγεται το ίδιο δυνατά με τον υπό εξέταση ήχο. Για παράδειγμα, όλοι οι ήχοι που γίνονται αντιληπτοί ως ίσοι στην ένταση με έναν των 1000 Hz στα 60 dB_{SPL}, έχουν στάθμη ακουστότητας 60 phon. Διατηρώντας σταθερή την ακουστότητα και μεταβάλλοντας τη συχνότητα, προκύπτουν οι καμπύλες που φαίνονται στη γραφική παράσταση της εικόνας 1.11. Αυτές ονομάζονται *καμπύλες ίσης ακουστότητας* (equal loudness contours) και μας δείχνουν τη σχέση ακουστότητας και ηχητικής στάθμης για όλο το ακουστικό φάσμα. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να υπολογιστεί το πόσο πρέπει να μεταβληθεί η στάθμη ηχητικής πίεσης ανάλογα με τη συχνότητα, ώστε να παραμείνει σταθερή η ακουστότητα. Σημειώνεται πως, η χαμηλότερη από τις καμπύλες, αντιστοιχεί στο κατώφλι ακουστότητας που εξετάστηκε στη προηγούμενη παράγραφο. Επίσης, οι ισοακουστικές καμπύλες ανεστραμμένες, δείχνουν τη συχνοτική απόκριση του αυτιού συναρτήσει της έντασης.



Εικόνα 1.11 *Καμπύλες ίσης ακουστότητας, γνωστές και ως καμπύλες Fletcher - Munson*

1.5.2 Τονικό Ύψος (Pitch)

Το τονικό ύψος είναι η υποκειμενική αίσθηση της συχνότητας ενός ηχητικού ερεθίσματος. Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Προτύπων (ANSI), ορίζει το τονικό ύψος ως *«εκείνο το χαρακτηριστικό της ακουστικής αίσθησης, με βάση το οποίο ένας ήχος μπορεί να ταξινομηθεί σε μια κλίμακα που εκτείνεται από χαμηλά έως ψηλά»*.[15] Για τη μέτρηση του τονικού ύψους χρησιμοποιείται η μονάδα *mel*. Εξ ορισμού, ένας ήχος συχνότητας 1000 Hz και στάθμης 40 dB_{SPL} ισούται με 1000 mel. Διπλασιασμός του τονικού ύψους οδηγεί σε διπλασιασμό των mel, ενώ αντίστοιχα η μείωσή του στο μισό, τα υποδιπλασιάζει. Σημαντικό ρόλο στην αντίληψη του τονικού ύψους παίζει η ένταση του ήχου. Αύξηση της ηχητικής στάθμης προκαλεί μείωση του υποκειμενικού ύψους για ήχους κάτω του 1 kHz και αύξηση για ήχους άνω των 2 kHz, με την ενδιάμεση περιοχή ωστόσο να διατηρείται σχετικά σταθερή.[16] Σε κάθε περίπτωση, το εύρος της τονικής ολίσθησης δεν φαίνεται να ξεπερνάει το 1-2 % της συχνότητας.

1.5.3 Χροιά (Timbre)

Η χροιά είναι το υποκειμενικό χαρακτηριστικό της ανθρώπινης ακοής που κάνει έναν ήχο να είναι αναγνωρίσιμος και διακριτός ανάμεσα σε άλλους. Για παράδειγμα, οι διαφορές στη χροιά μιας νότας είναι αυτές που μας επιτρέπουν να ξεχωρίσουμε το ένα μουσικό όργανο από το άλλο. Ο επίσημος ορισμός της χροιάς είναι *«εκείνο το χαρακτηριστικό της ακουστικής αίσθησης που επιτρέπει σε έναν ακροατή να μπορεί να κρίνει εάν δύο ήχοι που παρουσιάζονται με τον ίδιο τρόπο και έχουν την ίδια ακουστότητα και τονικό ύψος, είναι όμοιοι ή διαφορετικοί»*.[17] Οι κύριοι παράγοντες που διαμορφώνουν την αντίληψη της χροιάς για σύνθετους τόνους, είναι το συχνοτικό περιεχόμενο και η περιβάλλουσα του ήχου. Πιο συγκεκριμένα, η χροιά επηρεάζεται από την κατανομή ενέργειας ανάμεσα στη θεμελιώδη συχνότητα και τις αρμονικές της, από το attack (*onset*) και το decay (*offset*) της κάθε αρμονικής ξεχωριστά αλλά και από τις μεταβολές στο σχετικό τους πλάτος συναρτήσει του χρόνου. Για τη μέτρηση της χροιάς δεν υπάρχει κάποια κλίμακα όπως στην ακουστότητα ή το τονικό ύψος, αλλά χρησιμοποιούνται συνήθως επίθετα που περιγράφουν την αίσθηση του ακροατή. Για παράδειγμα, σύνθετοι τόνοι με ισχυρές χαμηλές αρμονικές (μέχρι την έκτη) αντιλαμβάνονται ως «μαλακοί», ενώ τόνοι με ισχυρές υψηλές αρμονικές, ακούγονται «διαπεραστικοί».[18] Επίσης, η απουσία άρτιων αρμονικών, δίνει την αίσθηση ενός «κούφιου» ήχου.[19]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Αντίληψη Τονικού Ύψους

Γενικά

Το τονικό ύψος είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό του ήχου που διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στη μουσική, όσο στην ομιλία και την ανάλυση του ηχητικού μας περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, εκτός από τον σχηματισμό μελωδίας στη μουσική, το τονικό ύψος μεταφέρει πολύτιμες προσωδιακές πληροφορίες που σε συνδυασμό με άλλες πληροφορίες όπως η χροιά, επιτρέπουν τον προσδιορισμό του ομιλητή. Επίσης, σε κάποιες τονικές γλώσσες όπως τα *Mandarin* και τα *Cantonese*, οι πληροφορίες αυτές καθορίζουν το περιεχόμενο των λέξεων. Η μελέτη της αντίληψης του τονικού ύψους αποτελεί στην ουσία μια μελέτη της σχέσης των φυσικών χαρακτηριστικών του ήχου και των νευρωνικών τους μετασχηματισμών. Πολλά βήματα έχουν γίνει προς αυτή τη κατεύθυνση, ωστόσο ακόμα επικρατεί μια διάσταση απόψεων μεταξύ των ερευνητών σε ζητήματα που αφορούν τους μηχανισμούς που εμπλέκονται στη κωδικοποίηση και την επεξεργασία του τονικού ύψους από τον εγκέφαλο. Όμως, η χρήση σύγχρονων νευροαπεικονιστικών μεθόδων έρχεται να ρίξει περισσότερο φως σε αυτή τη διαδικασία, ενώ παράλληλα η ανάπτυξη άλλων επιστημονικών κλάδων όπως η Νευροβιολογία και η Γνωστική Ψυχολογία, επιταχύνει την κάλυψη των κενών μας. Σε αυτό το κεφάλαιο θα επιχειρήσουμε αρχικά μια επισκόπηση των κυρίαρχων θεωριών και μοντέλων τονικής αντίληψης, στη συνέχεια θα εξετάσουμε τους παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται, έπειτα θα αναφερθούμε στη σχέση του τονικού ύψους με τη μουσική και τέλος, θα εξετάσουμε το ρόλο της μνήμης στην ακουστική εκπαίδευση.



Εικόνα 2.1 *Ναύτες σε υποβρύχιο του Αμερικανικού Ναυτικού, κατά τη διάρκεια ψυχοακουστικών μετρήσεων στην αντίληψη τονικού ύψους (Operation Hideout, 1953)*

2.1 Αντίληψη Τονικού Ύψους για Καθαρούς και Σύνθετους Τόνους

Η έρευνα πάνω στην αντίληψη του τονικού ύψους, επικεντρώνεται σε δύο βασικούς τύπους περιοδικών ήχων. Στους καθαρούς τόνους και στους σύνθετους τόνους. Ο καθαρός τόνος είναι μια ημιτονοειδής μεταβολή της πίεσης στο χρόνο και θεωρείται η απλούστερη μορφή ήχου που μπορεί να προκαλέσει την αίσθηση του ύψους. Ωστόσο, οι περισσότεροι ήχοι της καθημερινότητάς μας όπως η ομιλία και η μουσική, ανήκουν στη κατηγορία των σύνθετων τόνων. Σύμφωνα με το θεώρημα του Fourier, ένας σύνθετος τόνος μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα ενός αριθμού καθαρών τόνων με διαφορετικές συχνότητες, πλάτη και φάσεις. Επομένως, για να υπολογίσει το ακουστικό μας σύστημα το ύψος ενός σύνθετου τόνου, προχωράει σε μια ανάλυση του φάσματος στις συνιστώσες του από τις οποίες στη συνέχεια λαμβάνει τις πληροφορίες που απαιτούνται για την εκτίμηση του τονικού του ύψους. Αν και δεν γνωρίζουμε ακόμα με βεβαιότητα τους νευρωνικούς μηχανισμούς που εμπλέκονται στην επεξεργασία, έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του ύψους ενός τόνου και των συχνοτήτων που αυτός περιέχει.

2.1.1 Θεωρίες Τονικής Αντίληψης (Pitch Perception Theories)

Έρευνες που έχουν διεξαχθεί μέχρι και σήμερα, δεν έχουν καταφέρει να περιγράψουν με βεβαιότητα τον μηχανισμό κωδικοποίησης της συχνότητας ενός ήχου στο ακουστικό μας σύστημα. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί δύο βασικές θεωρίες προς αυτή την κατεύθυνση. Η πρώτη ονομάζεται *χωρική θεωρία* (place theory) και η δεύτερη *χρονική θεωρία* (temporal theory).

Η χωρική θεωρία υποστηρίζει ότι η αντίληψη του τονικού ύψους σχετίζεται με το μοτίβο διέγερσης των νευρώνων από την τονοτοπική κατανομή των συχνοτήτων κατά μήκος της βασικής μεμβράνης. Η θεωρία αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι, διαφορετικές συχνότητες διεγείρουν διαφορετικά σημεία της βασικής μεμβράνης και κατά συνέπεια, τριχοειδή κύτταρα με διαφορετική χαρακτηριστική συχνότητα. Ο εγκέφαλος αναλύει το μοτίβο που προκύπτει από τη διέγερση αυτών των κυττάρων και καθορίζει το τονικό ύψος του ερεθίσματος από τη θέση της μέγιστης μετατόπισης της μεμβράνης.[20] Αυτή η θεωρία φαίνεται να ισχύει για καθαρούς τόνους, όμως αδυνατεί να εξηγήσει την εφαρμογή της σε σύνθετους, οι οποίοι περιέχουν πολλές αρμονικές και άρα πολλά διαφορετικά μέγιστα κατά μήκος της μεμβράνης.

Η χρονική θεωρία από την άλλη, υποστηρίζει ότι το τονικό ύψος προκύπτει από την ανάλυση του χρονικού μοτίβου της διέγερσης των νευρώνων που προκαλεί ένα ηχητικό ερέθισμα. Στην περίπτωση αυτή, ο εγκέφαλος εκμεταλλεύεται μια ιδιότητα των νευρώνων που ονομάζεται *phase locking* και που είναι ο συγχρονισμός του ρυθμού πυροδότησης (firing rate) των νευρωνικών σημάτων με την φάση της κυματομορφής.[21] Το διάστημα μεταξύ των σημάτων δίνει την πληροφορία της περιοδικότητας και έτσι καθορίζεται το τονικό ύψος του ερεθίσματος. Το πρόβλημα με αυτή τη θεωρία είναι ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί για συχνότητες άνω των 5 kHz, για τις οποίες φαίνεται να μην ισχύει το phase locking. Ωστόσο, οι τόνοι που παράγονται από τα μουσικά όργανα, την ανθρώπινη φωνή και τους περισσότερους ήχους της καθημερινότητάς μας, έχουν θεμελιώδη συχνότητα κάτω από αυτό το όριο.

Πολλοί ερευνητές πιστεύουν ότι η αντίληψη του τονικού ύψους εμπλέκει και τους δύο μηχανισμούς που περιγράφουν οι θεωρίες, συνδυαστικά ή μεμονωμένα ανάλογα με τη περίπτωση. Όμως, και οι δύο θεωρίες αποτυγχάνουν να εξηγήσουν ικανοποιητικά τον μηχανισμό αντίληψης σύνθετων τόνων, οι οποίοι δεν περιέχουν απαραίτητα ενέργεια στις συχνότητες που αντιστοιχούν στο τονικό τους ύψος.

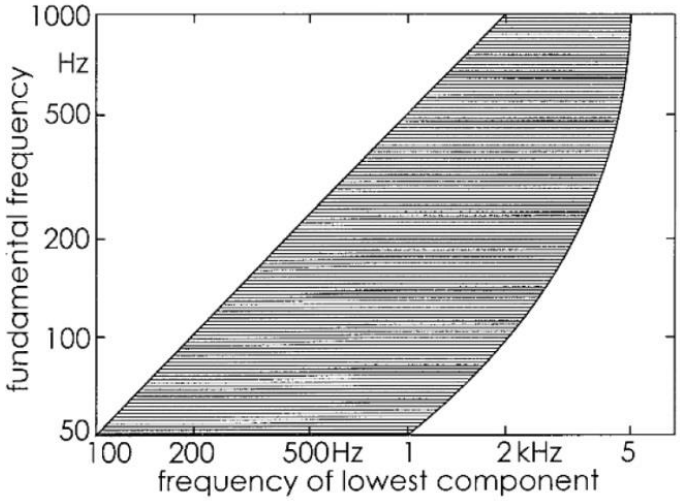
2.1.2 Η Χαμένη Θεμελιώδης (The Missing Fundamental)

Το φάσμα ενός περιοδικού σύνθετου τόνου αποτελείται από ένα πλήθος ημιτονοειδών συχνοτήτων που ονομάζονται *αρμονικές* και είναι ακέραια πολλαπλάσια της χαμηλότερης εξ αυτών, που ονομάζεται *θεμελιώδης*. Η θεμελιώδης συχνότητα είναι αυτή που καθορίζει το ρυθμό επανάληψης της κυματομορφής, την πληροφορία δηλαδή που σχετίζεται με το τονικό της ύψος. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, το ύψος που αντιστοιχεί στη θεμελιώδη συχνότητα ενός σύνθετου τόνου μπορεί να γίνει αντιληπτό ακόμα και αν επικαλυφθεί ή αφαιρεθεί αυτή η συχνότητα από το φάσμα του. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως *η περίπτωση της χαμένης θεμελιώδους,* αλλά αναφέρεται επίσης ως *periodicity pitch*, *virtual pitch* και *low pitch*.

Αυτή η παρατήρηση, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το ακουστικό σύστημα καθορίζει το ύψος ενός σύνθετου τόνου από την πληροφορία που βρίσκεται στις αρμονικές του. Πράγματι, έρευνες έχουν δείξει ότι υπάρχει μια μικρή περιοχή χαμηλών αρμονικών που παίζει κυρίαρχο ρόλο στην τονική αντίληψη, με αποτέλεσμα οποιαδήποτε μεταβολή στη συχνότητά τους να επηρεάζει άμεσα και το ύψος του τόνου.[22] Αυτή η περιοχή αποκαλείται *κυρίαρχη περιοχή* (dominant region) και αφορά στις αρμονικές που βρίσκονται κοντά στη συχνότητα των 600 Hz.[23] Επομένως, για σύνθετους τόνους με θεμελιώδη κάτω από αυτή τη συχνότητα, οι αρμονικές που παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην τονική αντίληψη είναι συνήθως από την τρίτη μέχρι την πέμπτη, ενώ για θεμελιώδη πάνω από τα 600 Hz, τον κυρίαρχο ρόλο κατέχει η ίδια η θεμελιώδης.

Σημειώνεται ότι, όταν ένας σύνθετος τόνος αποτελείται μόνο από δύο ή τρεις χαμηλές αρμονικές, μερικοί άνθρωποι είναι ικανοί να αντιληφθούν τα τονικά ύψη που αντιστοιχούν στην κάθε αρμονική ξεχωριστά. Αυτοί αποκαλούνται *αναλυτικοί ακροατές*. Οι *συνθετικοί ακροατές* από την άλλη, αντιλαμβάνονται μόνο το ολιστικό τονικό ύψος. Στην περίπτωση παρουσίας πολλών αρμονικών, τότε αυτό που συνήθως κυριαρχεί είναι το εικονικό ύψος της θεμελιώδους. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί από τους Fastl και Zwicker[24] ότι υπάρχει ένα όριο στο φάσμα μέσα το οποίο πρέπει να βρίσκονται οι αρμονικές, ώστε να είναι σε θέση να παράγουν το ύψος του τόνου (εικόνα 2.2). Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα, ένας σύνθετος τόνος δεν μπορεί να σχηματίσει εικονικό ύψος αν η χαμηλότερη αρμονική του είναι πάνω από τα 5 kHz, ενώ για έναν τόνο με θεμελιώδη κάτω από τα 50 Hz, το εικονικό ύψος είναι εφικτό μόνο αν η χαμηλότερη αρμονική του δεν ξεπερνάει το 1 kHz.

Τα παραπάνω ανατρέπονται από πρόσφατες έρευνες όπως αυτή του Oxenham κ.ά,[25] που υποστηρίζει ότι το ύψος της χαμένης θεμελιώδους μπορεί να γίνει αντιληπτό ακόμα και όταν όλες οι αρμονικές του τόνου είναι πάνω από τα 6 kHz. Σε αυτή τη περίπτωση βέβαια, το εικονικό τονικό ύψος είναι σαφώς πιο αδύναμο, αλλά θεωρείται ικανό ακόμα και για το σχηματισμό μελωδίας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι, ως ένα βαθμό, οι υψηλές αρμονικές συνεισφέρουν παράλληλα με τις χαμηλές στον καθορισμό του ύψους σύνθετων τόνων.

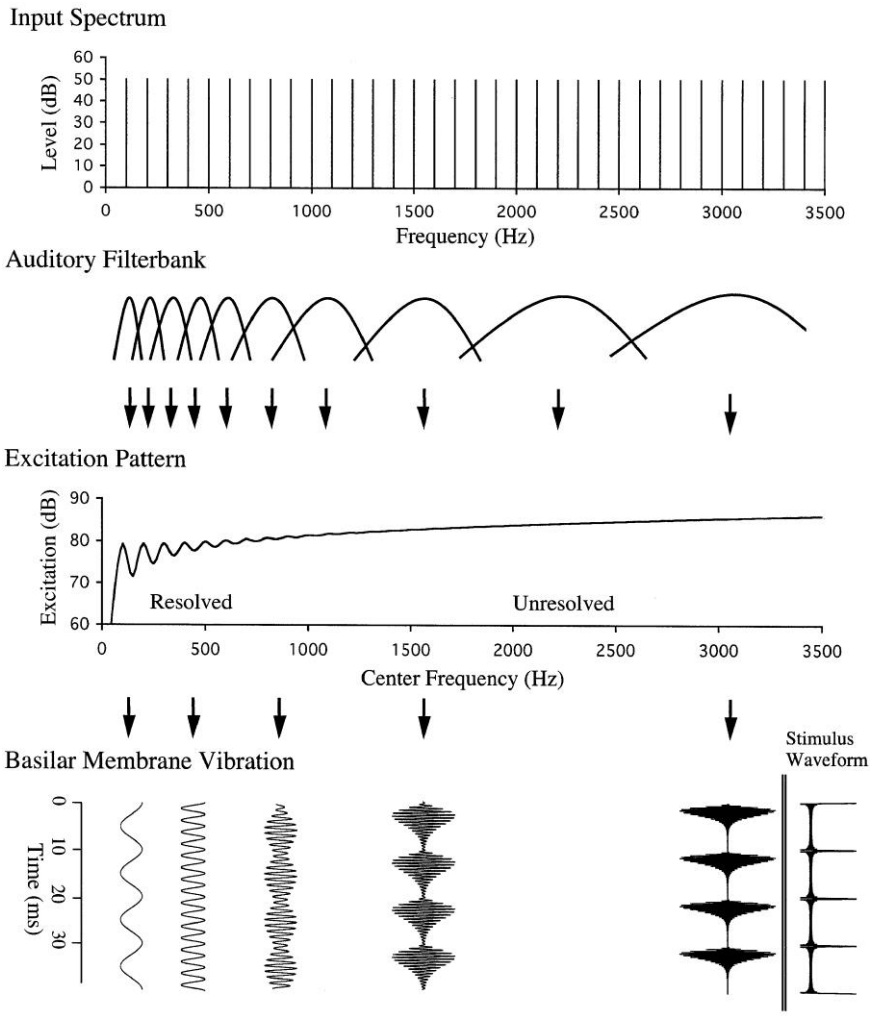


Εικόνα 2.2 *Όρια εικονικού τονικού ύψους. Το ύψος της θεμελιώδους που μπορεί να γίνει αντιληπτό, συναρτήσει της χαμηλότερης συχνοτικά αρμονικής του τόνου (σκιαγραφημένη περιοχή)*

2.1.3 Αναλυσιμότητα Αρμονικών (Harmonics Resolvability)

Η ανάλυση των αρμονικών ενός σύνθετου τόνου από τη βασική μεμβράνη, μπορεί να προσομοιωθεί με μια σειρά από επικαλυπτόμενα ζωνοπερατά φίλτρα που ονομάζονται *ακουστικά φίλτρα* (auditory filters). Το εύρος ζώνης αυτών των φίλτρων αυξάνεται με τη συχνότητα, ενώ η απόσταση των αρμονικών παραμένει σταθερή και ίση με τη θεμελιώδη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι χαμηλές αρμονικές να αναλογούν σε ξεχωριστό φίλτρο η κάθε μια και έτσι να αναλύονται ξεχωριστά από το ακουστικό σύστημα (resolved harmonics), ενώ αντίθετα, οι υψηλές αρμονικές να καταλήγουν περισσότερες από μια στο ίδιο φίλτρο και επομένως να μην αναλύονται ξεχωριστά (unresolved harmonics). Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3, παρεμβολές μεταξύ δύο ή περισσότερων υψηλών αρμονικών στο ίδιο φίλτρο προκαλούν σε εκείνο το σημείο της μεμβράνης μια σύνθετη περιοδική ταλάντωση, η οποία επαναλαμβάνεται με τη συχνότητα που αντιστοιχεί στην απόσταση των αρμονικών, δηλαδή τη συχνότητα της θεμελιώδους. Αντίθετα, οι χαμηλές αρμονικές που καταλήγουν σε φίλτρα με ξεχωριστή χαρακτηριστική συχνότητα το καθένα, προκαλούν στα αντίστοιχα σημεία της μεμβράνης μια σχεδόν ημιτονοειδή κυματομορφή με τη συχνότητα της κάθε αρμονικής.

Το σημείο μετάβασης των αρμονικών από αναλυμένες σε μη, παραμένει θέμα συζήτησης μέχρι και σήμερα και εξαρτάται από το πώς ορίζεται η αναλυσιμότητα. Σύμφωνα με την άποψη που κυριαρχεί, μια αρμονική θεωρείται αναλυμένη εάν μπορεί να γίνει αντιληπτή ως ένας καθαρός τόνος με σαφές τονικό ύψος. Κάποιοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι το σημείο που σηματοδοτεί τη μετάβαση βρίσκεται ανάμεσα στην πέμπτη και τη δέκατη αρμονική, ωστόσο αυτό εξαρτάται κυρίως από τη συχνότητα της θεμελιώδους. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η περιοχή της αρμονικής αναλυσιμότητας δεν φαίνεται να συμπίπτει ακριβώς με την κυρίαρχη περιοχή, αν και ισχύει πως οι αναλυμένες αρμονικές είναι πιο σημαντικές για την αντίληψη του τονικού ύψους από ότι οι μη αναλυμένες, τουλάχιστον για θεμελιώδεις πάνω από τα 100 Hz.



Εικόνα 2.3 *Το φάσμα, το μοτίβο διέγερσης και η ταλάντωση της βασικής μεμβράνης για ένα σύνθετο τόνο με θεμελιώδη συχνότητα 100 Hz και αρμονικές ίσου πλάτους*

2.1.4 Μοντέλα Τονικής Αντίληψης (Pitch Perception Models)

Τον ακριβή μηχανισμό αντίληψης του ύψους σύνθετων τόνων, καλούνται να περιγράψουν τα διάφορα μοντέλα που προτείνονται κατά καιρούς από πολλούς ερευνητές. Τα πρώιμα μοντέλα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες. Στα μοντέλα *αναγνώρισης μοτίβου* (pattern recognition models) που στηρίζονται στη χωρική θεωρία και στα *χρονικά μοντέλα* (temporal models) που στηρίζονται στη χρονική θεωρία.

Τα μοντέλα αναγνώρισης μοτίβου, υποστηρίζουν ότι η αντίληψη του τονικού ύψους γίνεται από τις αναλυμένες αρμονικές του τόνου. Η συχνοτική ανάλυση που πραγματοποιείται στον κοχλία, ακολουθείται από μια σύγκριση του μοτίβου των αναλυμένων αρμονικών με κάποια πρότυπα (templates) που είναι αποθηκευμένα στο αυτί, πιθανόν από τη βρεφική ηλικία.[26] Η σύγκριση γίνεται με σκοπό να βρεθεί η θεμελιώδης συχνότητα της οποίας η αρμονική σειρά θα ταιριάζει περισσότερο στις συχνότητες των αναλυμένων αρμονικών του ερεθίσματος. Σημειώνεται πως η τεκμαιρόμενη συχνότητα της θεμελιώδους, είναι πάντα η υψηλότερη δυνατή τιμή που ταιριάζει στις συχνότητες των αναλυμένων αρμονικών του

τόνου. Για παράδειγμα, εάν κατά την αρχική ανάλυση προκύψουν οι αρμονικές με συχνότητες 800, 1000 και 1200 Hz, τότε η θεμελιώδης συχνότητα που αναλογεί σε αυτή τη σειρά είναι τα 200 Hz, παρόλο που μια θεμελιώδης των 100 Hz θα είχε επίσης αρμονικές σε αυτές τις συχνότητες.

Η μεγάλη αδυναμία αυτών των μοντέλων είναι ότι βασίζονται στις αναλυμένες αρμονικές για την εξαγωγή του ύψους και ως εκ τούτου, υπολείπονται μιας πειστικής εξήγησης για την αντίληψη του ύψους σύνθετων τόνων που αποτελούνται μόνο από μη αναλυμένες αρμονικές. Ένα εναλλακτικό μοντέλο αυτής της κατηγορίας, που όμως εξακολουθεί να βασίζεται στην αναλυσιμότητα των αρμονικών, προτάθηκε το 1973 από τον Goldstein.[27] Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, το ύψος σύνθετων τόνων διαμορφώνεται από ένα κεντρικό μηχανισμό που λαμβάνει πληροφορίες μόνο για τις συχνότητες των αρμονικών και όχι για τα πλάτη ή τις φάσεις τους. Ωστόσο, η θεωρία προϋποθέτει το ερέθισμα να είναι περιοδικό και το φάσμα του να αποτελείται από διαδοχικές αρμονικές που μπορούν να αναλυθούν επαρκώς από το ακουστικό σύστημα.

Τα χρονικά μοντέλα από την άλλη, υποστηρίζουν ότι η αντίληψη του ύψους ενός σύνθετου τόνου προέρχεται από την πληροφορία της περιοδικότητας που βρίσκεται στις μη αναλυμένες αρμονικές του. Σύμφωνα με αυτά τα μοντέλα, το τονικό ύψος εξάγεται από το χρονικό μοτίβο της κυματομορφής στο σημείο της βασικής μεμβράνης όπου οι υψηλότερες αρμονικές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Στην περίπτωση που ανιχνευτεί παραπάνω από μια χρονική περίοδος, τότε αυτή που συνήθως επικρατεί είναι η πιο διακριτή, αν και μερικές φορές είναι πιθανή μια ασάφεια στο ύψος. Το ισχυρό σημείο αυτών των μοντέλων είναι ότι μπορούν να εξηγήσουν την εξαγωγή του ύψους από ένα μη αναλυμένο σύμπλεγμα αρμονικών, αλλά το γεγονός ότι το ύψος σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αδύναμο, δεν επιτρέπει την πλήρη αποδοχή τους.

Τα νεότερα μοντέλα αυτής της κατηγορίας, βασίζονται στη μέθοδο της *αυτοσυσχέτισης* (autocorrelation), όπως χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον Licklider.[28] Η αυτοσυσχέτιση είναι η σύγκριση μιας χρονικής σειράς στοιχείων με τις παρελθοντικές ή μελλοντικές τους τιμές. Πρόκειται ουσιαστικά για έναν μετασχηματισμό του φάσματος στο χρονικό πεδίο και περιγράφεται από την συνάρτηση

$$A(\tau) = \int x(t)x(t+\tau)\,dt$$

όπου $x(t)$ είναι η κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου και τ η χρονική της καθυστέρηση. Αυτό σημαίνει πως, το ολοκλήρωμα του αρχικού χρονικού μοτίβου $x(t)$ που μετατοπίζεται στο χρόνο κατά τ και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με το ίδιο το αρχικό μοτίβο, δίνει τη συνάρτηση της χρονικής μετατόπισης της κυματομορφής. Η συνάρτηση θα πάρει τη μέγιστη τιμή της όταν η χρονική μετατόπιση θα είναι 0 msec, ενώ θα παραμείνει υψηλή ακόμα και για μικρές διακυμάνσεις. Επιπλέον, η συνάρτηση θα ξαναγίνει μέγιστη για χρονικές μετατοπίσεις του μοτίβου που ισούνται με τη περίοδο του ερεθίσματος, επειδή τα δύο μοτίβα σε αυτή τη περίπτωση θα είναι περίπου όμοια. Έτσι, οι περιοδικοί σύνθετοι τόνοι εμφανίζουν μια κορυφή (peak) στη συσχέτισή τους για χρονικές μετατοπίσεις που αντιστοιχούν στην περίοδό τους και για αυτό η αυτοσυσχέτιση χρησιμοποιείται ως η βάση για τη περιγραφή του μηχανισμού εκτίμησης του τονικού ύψους στα χρονικά μοντέλα.

Πολλά σύγχρονα μοντέλα τονικής αντίληψης ωστόσο, υποστηρίζουν ότι το ακουστικό σύστημα εκτελεί μια σύνθεση πληροφοριών τόσο από τις αναλυμένες, όσο και από τις μη αναλυμένες αρμονικές ενός τόνου, ώστε να παραχθεί το τελικό του ύψος. Αυτά τα μοντέλα αναφέρονται συνήθως ως *υβριδικά* ή *φασματοχρονικά* μοντέλα, επειδή υιοθετούν και τις δύο προσεγγίσεις για την παραγωγή του τονικού ύψους. Αν και μια τέτοια πρόταση είναι δελεαστική γιατί ταιριάζει στα μέχρι τώρα στοιχεία, αυτά τα μοντέλα έχουν το μειονέκτημα ότι γίνονται πολύπλοκα λόγω των δύο μηχανισμών που εμπεριέχουν, συν ενός τρίτου που θα ενσωματώνει τους άλλους δύο. Η άλλη υπόθεση βέβαια, είναι πως υπάρχει μόνο ένας μηχανισμός που εντοπίζεται κεντρικά και εκτελεί διαφορετικά επίπεδα επεξεργασίας ανάλογα με τις συνθήκες του ερεθίσματος. Μάλιστα, τα πειράματα διχωτικής ακρόασης των Houtsma και Goldstein,[29] ενισχύουν την υπόθεση ότι η επεξεργασία των πληροφοριών γίνεται σε κάποιο σημείο εκτός του περιφερειακού ακουστικού συστήματος, πιθανόν στο κοχλιακό πυρήνα, το στέλεχος δηλαδή του εγκεφάλου όπου καταλήγει το ακουστικό νεύρο.

2.1.5 Πειραματική Μεθοδολογία

Για τη βαθύτερη κατανόηση του μηχανισμού αντίληψης του τονικού ύψους, διενεργούνται ψυχοακουστικές μετρήσεις σε ένα δείγμα μέσων ακροατών, που αποτελούνται συνήθως από νεαρά σε ηλικία άτομα χωρίς προβλήματα ακοής και με ελάχιστη ή καθόλου μουσική εκπαίδευση. Το μέγεθος του δείγματος μπορεί να ξεκινάει από τα 30 και να φτάνει έως και τα 340 άτομα. Αυτό που συνήθως ζητείται από τους συμμετέχοντες, είναι να προβούν σε σύγκριση μεταξύ δύο ή περισσότερων ηχητικών ερεθισμάτων των οποίων τα χαρακτηριστικά διαφέρουν ανάλογα με την πτυχή που εξετάζεται αλλά και τη προσέγγιση του ερευνητή. Οι διάρκειες των ερεθισμάτων κυμαίνονται από 5 ms έως 1 sec[30] [31] και οι μετρήσεις διαρκούν αρκετές ώρες ώστε η επίδοση των συμμετεχόντων να μην μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με τον χρόνο (*ασυμπτωτική*).[32]

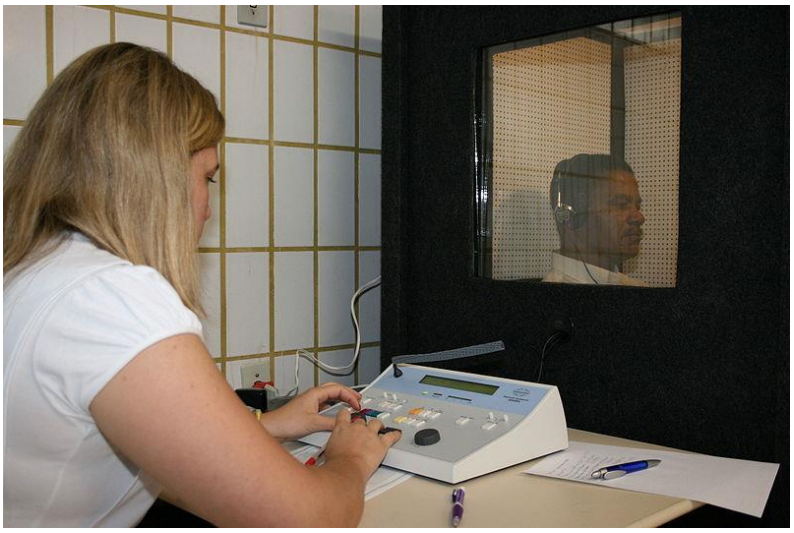
Η πιο κλασική μέθοδος που ακολουθείται από πολλούς ερευνητές για την εκτίμηση του ύψους καθαρών τόνων, είναι η προσαρμογή της συχνότητας ενός άλλου τόνου από τον ακροατή ώστε να ταιριάζει στο ύψος του υπό εξέταση ήχου. Με αυτό τον τρόπο, υπάρχει μια απευθείας αντιστοιχία της αίσθησης του ύψους με τη συχνότητα του ερεθίσματος εκφρασμένη σε Hz. Ακολουθώντας την ίδια μέθοδο, αλλά ζητώντας αυτή τη φορά από τον ακροατή να ρυθμίσει τη συχνότητα στο μισό ή στο διπλάσιο του αντιληπτού τονικού ύψους, δημιουργείται η κλίμακα των mel.

Για τη διάκριση συχνότητας καθαρών τόνων, υπάρχουν δύο συνηθισμένοι τρόποι μέτρησης. Σύμφωνα με τον πρώτο, ο ακροατής υποβάλλεται σε δύο διαδοχικούς σταθερούς τόνους με ελαφρώς διαφορετική συχνότητα μεταξύ τους και μετά του ζητείται να κρίνει εάν αντιλαμβάνεται τη διαφορά. Με κάθε σωστή εκτίμηση η συχνοτική απόσταση των δύο τόνων μειώνεται, ενώ με κάθε λανθασμένη αυξάνεται. Η διαφορά στη συχνότητα για την οποία ο ακροατής θα καταφέρει ένα προκαθορισμένο ποσοστό επιτυχημένων απαντήσεων (συνήθως 70-75 %), δίνει και την ελάχιστη αντιληπτή διαφορά που είναι ικανός να αντιληφθεί. Αυτή η μέτρηση ονομάζεται *difference limen for frequency* (DLF). Σύμφωνα με τον δεύτερο τρόπο, ο ακροατής υποβάλλεται σε δύο διαδοχικούς τόνους από τους οποίους ο ένας έχει υποστεί συχνοτική διαμόρφωση (FM) χαμηλού ρυθμού, ενώ ο άλλος όχι. Στη συνέχεια του ζητείται να υποδείξει τον διαμορφωμένο, με τον ρυθμό διαμόρφωσης που

απαιτείται για την επιτυχημένη αναγνώρισή του να δίνει την ελάχιστη αντιληπτή διαφορά στη συχνότητα. Η μέτρηση αυτή ονομάζεται *frequency modulation detection limen* (FMDL).

Τα πειράματα για την αντίληψη του ύψους της χαμένης θεμελιώδους, διεξάγονται συνήθως με τη χρήση θορύβου για την επικάλυψη των χαμηλών συχνοτικών περιοχών. Αυτή η διαδικασία προτιμάται για την ορθότητα της μέτρησης, λόγω της μη γραμμικής απόκρισης του ακουστικού συστήματος που δημιουργεί προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης με συχνότητες ίσες με αυτές των αρμονικών του τόνου. Έτσι, με την επικάλυψη των χαμηλών περιοχών, εξασφαλίζεται ότι το ύψος που αντιλαμβάνεται ο ακροατής δεν προκύπτει από τους τόνους συνδυασμού που σχηματίζονται στη θέση της απουσιάζουσας θεμελιώδους.

Για την πιο σφαιρική μελέτη της τονικής αντίληψης, πραγματοποιούνται ψυχοακουστικές μετρήσεις και σε άλλες πληθυσμιακές ομάδες όπως άτομα με κοχλιακά εμφυτεύματα,[33] βρέφη[34] ή ακόμα και ζώα.[35] Στις σύγχρονες έρευνες μάλιστα, εφαρμόζονται τεχνικές μαγνητικής απεικόνισης εγκεφάλου με τις οποίες μπορούμε να μελετήσουμε άμεσα την διέγερση των νευρώνων κατά την υποβολή ηχητικών ερεθισμάτων, συλλέγοντας έτσι περισσότερα στοιχεία για την κατανόηση των βασικών ικανοτήτων του ακουστικού μας συστήματος.



Εικόνα 2.4 *Μια τυπική ψυχοακουστική μέτρηση στην αντίληψη καθαρών τόνων*

2.2 Παράγοντες Που Επηρεάζουν Την Αντίληψη Τονικού Ύψους

Το τονικό ύψος είναι μια καθαρά υποκειμενική αίσθηση, συνεπώς η αντίληψή του εξαρτάται από πολλούς και διαφορετικούς παράγοντες. Τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός ήχου όπως η ένταση ή η διάρκεια, είναι αυτά που επηρεάζουν άμεσα το ύψος του τόνου, ενώ άλλες παράμετροι όπως η επικάλυψη ή η προσαρμογή του ακροατή σε ένα ερέθισμα, διαδραματίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο. Στη παράγραφο που ακολουθεί, γίνεται μια αναφορά στους βασικούς παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η αντίληψη του τονικού ύψους.

2.2.1 Συχνότητα (Frequency)

Η συχνότητα, δηλαδή ο ρυθμός επανάληψης της κυματομορφής, αποτελεί τον κύριο παράγοντα καθορισμού του ύψους ενός τόνου. Αν και δεν συνδέονται γραμμικά, μεταβολή στη συχνότητα ενός ερεθίσματος οδηγεί και σε μεταβολή του τονικού του ύψους. Για τους καθαρούς τόνους, το αντιληπτό ύψος αντιστοιχεί στη συχνότητα της ημιτονοειδούς κυματομορφής, ενώ για τους σύνθετους, καθορίζεται από τη συχνότητα της θεμελιώδους ακόμα και αν η ενέργειά της λείπει από το φάσμα τους. Ένας απλός τρόπος για τη μέτρηση της σχέσης μεταξύ της συχνότητας του ερεθίσματος και του τονικού ύψους, είναι τα πειράματα αντιστοίχισης ενός δοκιμαστικού τόνου με το ύψος που προκαλεί ένας τόνος αναφοράς. Μέσω ανάλογων πειραμάτων αντιστοίχισης, ο Stevens, ο Volkmann και ο Newman, πρότειναν το 1937 μια κλίμακα που συνδέει τη συχνότητα ενός τόνου με το ύψος το οποίο προκαλεί. Αυτή η κλίμακα ονομάστηκε *mel* (από το melody) και αποτελεί μέχρι σήμερα τη μονάδα μέτρησης της υποκειμενικής αίσθησης του τονικού ύψους.

2.2.2 Στάθμη (Level)

Το τονικό ύψος εξαρτάται επίσης από τη στάθμη ηχητικής πίεσης του ερεθίσματος. Η επίδραση της στάθμης στην τονική αντίληψη μπορεί να εκτιμηθεί ποσοτικά, συγκρίνοντας το ύψος που παράγουν καθαροί τόνοι σε διαφορετικές εντάσεις. Τα πρώτα αποτελέσματα τέτοιων ερευνών, έδειξαν ότι με την αύξηση της ηχητικής στάθμης μειώνεται το αντιληπτό ύψος για τις χαμηλές συχνότητες και αυξάνεται για τις υψηλές, με το μέσο όρο της τονικής ολίσθησης να φτάνει έως το 5%. Ωστόσο, μεταγενέστερες έρευνες έδειξαν ότι ο μέσος όρος της μετατόπισης του ύψους εξαιτίας της έντασης είναι πολύ μικρότερος από ότι είχε αρχικά αναφερθεί και ότι υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις ανάμεσα στους συμμετέχοντες ως προς το μέγεθος και την κατεύθυνση της μετατόπισης. Σύμφωνα με τον Cohen,[36] αυτή η διαφορά στα αποτελέσματα οφείλεται στα *σφάλματα αντιστοίχισης ύψους* (pitch-matching errors), δηλαδή στις μικρές συχνοτικές διαφορές που προκύπτουν από την αντιστοίχιση του ύψους ενός δοκιμαστικού τόνου με το ύψος ενός τόνου αναφοράς, υπό συνθήκες ίσης έντασης.

2.2.3 Διάρκεια (Duration)

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει άμεσα την αντίληψη του τονικού ύψους, είναι η διάρκεια του ερεθίσματος. Έχει παρατηρηθεί ότι για πολύ σύντομες διάρκειες (λίγα msec), ένας καθαρός τόνος έχει τη μορφή *κλικ* (click) χωρίς ξεκάθαρο τονικό ύψος, αλλά όσο αυξάνεται η διάρκειά του, το ύψος του γίνεται πιο εύκολα αναγνωρίσιμο. Το σημείο που γίνεται η μετάβαση από κλικ σε τόνο με διακριτό ύψος εξαρτάται από τη συχνότητα. Όπως υποστηρίζεται, η συνάρτηση της ανάδειξης του ύψους με τη διάρκεια του τόνου ακολουθεί την *ακουστική αρχή της αβεβαιότητας* $\Delta f \cdot \Delta t = K$, όπου Δf είναι η αβεβαιότητα στη συχνότητα και Δt είναι η διάρκεια του τόνου. Το K μπορεί να πάρει πολύ χαμηλές τιμές, οι οποίες όμως φαίνεται να εξαρτώνται από την ένταση και τη περιβάλλουσα του ήχου.[37] Η διάρκεια του τόνου επηρεάζει επίσης την εκτίμηση του ύψους του. Έχει βρεθεί ότι οι τόνοι μικρής διάρκειας (μέχρι περίπου τα 25 msec), τείνουν να έχουν χαμηλότερο ύψος σε σχέση με τόνους μεγαλύτερης διάρκειας της ίδιας συχνότητας.[38] Παρατηρείται δε, ότι υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ της διάρκειας και της στάθμης του ερεθίσματος: οι πιο δυνατοί τόνοι είναι περισσότερο επιρρεπείς σε διαφοροποιήσεις του ύψους που σχετίζονται με τη διάρκεια.

2.2.4 Περιβάλλουσα (Envelope)

Περιβάλλουσα ονομάζεται η σχετικά αργή διακύμανση του πλάτους ενός ήχου συναρτήσει του χρόνου. Φαίνεται πως η διακύμανση αυτή, είναι ικανή να επηρεάσει το ύψος ενός τόνου. Το 1978, ο Hartman[39] βρήκε μέσα από ψυχοακουστικά πειράματα ότι το αντιληπτό ύψος ενός τόνου που φθίνει εκθετικά με ρυθμό 1 dB/msec, είναι πιο υψηλό από αυτό ενός άλλου τόνου των 20 msec με σταθερό πλάτος και ίδια συχνότητα. Επιπλέον, βρήκε ότι η ποσοστιαία διαφορά της συχνότητας που απαιτείται για την εξίσωση του ύψους των δύο παραπάνω τόνων εξαρτάται από τη συχνότητα του ερεθίσματος. Τα ευρήματα του Hartman επιβεβαιώνονται και από μεταγενέστερες έρευνες όπως αυτή των Rossing και Houtsma,[40] τα αποτελέσματα της οποίας έδειξαν ότι οι τόνοι με φθίνον πλάτος αντιλαμβάνονται ως υψηλότεροι σε σχέση με τόνους επίπεδης περιβάλλουσας, ενώ αντίθετα, οι τόνοι με αύξον πλάτος αντιλαμβάνονται ως χαμηλότεροι. Ωστόσο, όπως υποστηρίζουν, το φαινόμενο συνδέεται με την αλλαγή στη μέση ένταση των τόνων και ως εκ τούτου, προσεγγίζει αρκετά την επίδραση που έχει η ηχητική στάθμη στην αντίληψη του τονικού ύψους.

2.2.5 Επικάλυψη (Masking)

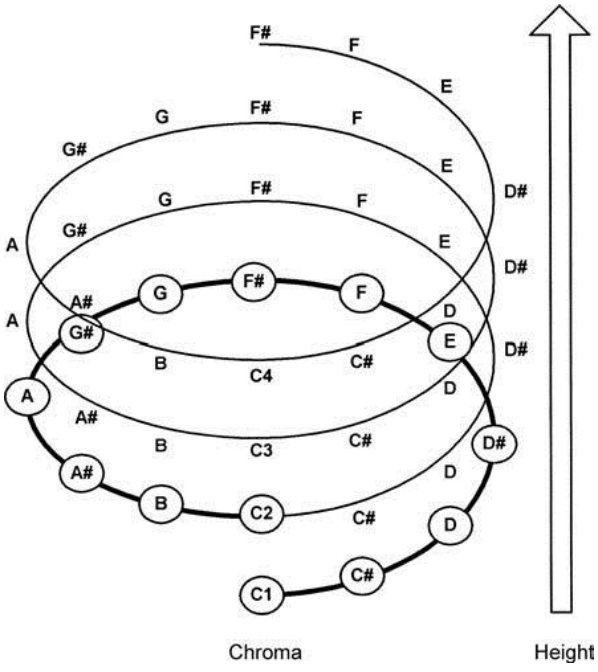
Η ταυτόχρονη παρουσία ενός άλλου τόνου ή θορύβου μπορεί επίσης να αλλοιώσει την αίσθηση του ύψους ενός καθαρού τόνου. Έχει παρατηρηθεί ότι η μερική επικάλυψη από ευρέως φάσματος θόρυβο (broad-band noise), προκαλεί μια ολίσθηση του αντιληπτού ύψους προς τα πάνω σε ποσοστό που κυμαίνεται από 1 έως 3 %.[41] Μεγαλύτερη ολίσθηση όμως παρατηρείται όταν ένας καθαρός τόνος επικαλύπτεται μερικώς από ήχους στενού φάσματος, όπως για παράδειγμα ένας άλλος καθαρός τόνος ή μια ζώνη θορύβου. Στην περίπτωση που ο τόνος επικάλυψης είναι χαμηλότερης συχνότητας από τον εξεταζόμενο τόνο, τότε παρατηρείται στον τελευταίο μια αύξηση του ύψους του ακόμα και κατά ένα ημιτόνιο.[42] Στην περίπτωση όμως που ο τόνος επικάλυψης είναι υψηλότερης συχνότητας, το φαινόμενο αντιστρέφεται και έτσι παρατηρείται μια μείωση στο ύψος του υπό εξέταση τόνου. Γενικά, πάντως, ισχύει ότι η επίδραση της επικάλυψης στην αντίληψη του τονικού ύψους είναι περισσότερο εμφανής στις χαμηλές συχνότητες παρά στις υψηλές.

2.2.6 Προσαρμογή (Adaptation)

Η προσαρμογή, είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μείωση της απόκρισης του ακουστικού συστήματος που παρατηρείται εξαιτίας της παρατεταμένης έκθεσης σε ένα ερέθισμα. Αρκετές έρευνες έχουν δείξει ότι το αντιληπτό ύψος ενός τόνου αλλοιώνεται όταν προηγηθεί υποβολή ενός τόνου προσαρμογής. Το φαινόμενο αρχικά μελετήθηκε από τον van Békésy, που έκανε πειράματα σε ακροατές χρησιμοποιώντας ως τόνο προσαρμογής ένα καθαρό τόνο των 94 dB_{SPL} διάρκειας δύο λεπτών. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι το ύψος του υπό εξέταση τόνου που ακολουθούσε, παρουσίαζε μια ολίσθηση προς τα πάνω όταν η συχνότητα του τόνου προσαρμογής ήταν χαμηλότερη και μια ολίσθηση προς τα κάτω όταν η συχνότητα ήταν υψηλότερη. Μεταγενέστερες έρευνες έδειξαν επίσης, ότι η επίδραση ενός τόνου προσαρμογής στο ύψος ενός καθαρού τόνου μειώνεται όσο το κενό μεταξύ των δύο τόνων μεγαλώνει, έτσι ώστε να θεωρείται αμελητέα για διάρκειες άνω των 100 msec.[43] Τέλος, το φαινόμενο αφορά στο κάθε αυτί ξεχωριστά, με τον τόνο προσαρμογής που παρουσιάζεται στο ένα αυτί να μην επηρεάζει το αντιληπτό ύψος ενός άλλου τόνου που παρουσιάζεται στο ετερόπλευρο αυτί.

2.3 Μουσικό Τονικό Ύψος

Αντίθετα με την Ψυχοακουστική, η αντίληψη του τονικού ύψους στη μουσική βασίζεται περισσότερο στις σχέσεις μεταξύ των τόνων παρά στις απόλυτες τιμές τους. Για παράδειγμα, η πρώτη επαφή που έχουν τα παιδιά στο σχολείο με τη μουσική είναι η κλίμακα «ντο ρε μι», η οποία είναι σχετική: όλες οι νότες είναι καλά καθορισμένες σε σχέση με το ντο, αλλά η ίδια η νότα μπορεί να έχει οποιαδήποτε συχνότητα. Επίσης, όταν παίζουν οι μουσικοί σε μια ορχήστρα, συνήθως είναι αρκετό να κουρδίζουν τα όργανά τους με βάση το όργανο που είναι πιο δύσκολο να κουρδιστεί, όπως για παράδειγμα το πιάνο ή το εκκλησιαστικό όργανο. Βέβαια, για πρακτικούς λόγους έχουμε ορίσει – αυθαίρετα είναι η αλήθεια – τη συχνότητα της νότας A_4 στα 440 Hz, αλλά αυτή είναι μια σχετικά πρόσφατη συνθήκη και επιπλέον, αφορά μόνο στη δυτική μουσική. Δεδομένης, λοιπόν, της χαμηλής προτεραιότητας για απόλυτες τιμές αναφοράς στην μουσική, είναι ασφαλές να πούμε πως η αντίληψη του μουσικού τονικού ύψους είναι περισσότερο σχετική παρά απόλυτη. Πράγματι, φαίνεται πως το μουσικό τονικό ύψος καθορίζεται από τα *διαστήματα* (intervals) μεταξύ των τόνων και όχι από τους τόνους καθεαυτούς. Τα διαστήματα βασίζονται στον λόγο συχνοτήτων των τόνων (f_2/f_1), ενώ ίσοι λόγοι παράγουν ίσα τονικά διαστήματα, τα οποία στην κατάλληλη σειρά προκαλούν την αίσθηση της μελωδίας. Σημειώνεται πως, τα διαστήματα της μουσικής κλίμακας διαφέρουν ανάμεσα στους πολιτισμούς, ωστόσο κάποια βασικά όπως η *οκτάβα* (λόγος 2:1) και η *πέμπτη καθαρή* (λόγος 3:2) συναντώνται αρκετά συχνά, μάλλον επειδή συμπίπτουν με τους λόγους των τριών πρώτων αρμονικών ενός σύνθετου περιοδικού ήχου.



Εικόνα 2.5 *Σχηματική αναπαράσταση των δύο διαστάσεων του τονικού ύψους. Η διάσταση που μεταβάλλεται κατά την περιστροφή του έλικα ονομάζεται τονικό χρώμα και αφορά στα σχετικά διαστήματα (ημιτόνια) της χρωματικής κλίμακας, ενώ η διάσταση που μεταβάλλεται κάθετα ονομάζεται τονικό ύψος και αφορά στη μονοτονική συσχέτιση του αντιληπτού ύψους με τη συχνότητα του τόνου*

2.3.1 Η Πολυδιάστατη Φύση του Τονικού Ύψους (Multidimensional Pitch)

Δυο τόνοι που απέχουν συχνοτικά μεταξύ τους μια οκτάβα (δηλαδή ο ένας έχει τη διπλάσια συχνότητα από τον άλλο), ακούγονται παρόμοιοι και για αυτό φέρουν το ίδιο όνομα σε μια μουσική κλίμακα (για παράδειγμα C_3 και C_4). Αυτή η αντιληπτή ομοιότητα, έχει οδηγήσει αρκετούς ερευνητές στην άποψη ότι το τονικό ύψος έχει παραπάνω από μια διαστάσεις. Η μια διάσταση σχετίζεται μονοτονικά με τη συχνότητα του τόνου και ονομάζεται *τονικό ύψος* (tone height), ενώ η άλλη σχετίζεται με την αντιληπτή συγγένεια που παρουσιάζουν οι τόνοι μεταξύ των οκτάβων και ονομάζεται *τονικό χρώμα* (tone chroma). Για παράδειγμα, δύο τόνοι με συχνότητες 440 και 880 Hz αντίστοιχα θα έχουν το ίδιο τονικό χρώμα αφού αντιστοιχούν στην ίδια νότα (ονομάζονται και οι δύο *A* στη μουσική κλίμακα), αλλά θα έχουν διαφορετικό τονικό ύψος αφού απέχουν μεταξύ τους μια οκτάβα. Για την περιγραφή της δισδιάστατης φύσης του τονικού ύψους, έχουν προταθεί διάφορα περίπλοκα γεωμετρικά μοντέλα όπως ο έλικας της εικόνας 2.5. Ο κάθετος άξονας στο σχήμα αντιπροσωπεύει την διάσταση του τονικού ύψους, η οποία μάλιστα σχετίζεται με τη κλίμακα των mel, ενώ η περιστροφή γύρω από τον έλικα αντιπροσωπεύει την διάσταση του τονικού χρώματος, η οποία αφορά στα δώδεκα ημιτόνια της χρωματικής κλίμακας.

2.3.2 Μουσικές Κλίμακες και Συγκερασμός (Musical Scales and Temperament)

Η μουσική κλίμακα αφορά στην καθορισμένη διαδοχή των τόνων σε ένα μουσικό σύστημα. Η πιο κοινή κλίμακα στη δυτική μουσική είναι η *χρωματική* (chromatic scale), η οποία περιέχει δώδεκα νότες χωριζόμενες με διαστήματα που ονομάζονται *ημιτόνια* (semitones). Δύο ημιτόνια συνιστούν έναν τόνο (tone) και η συγκεκριμένη διαδοχή τόνων και ημιτονίων σχηματίζει την *διατονική κλίμακα* (diatonic scale), η οποία αποτελείται από τις επτά γνωστές νότες C-D-E-F-G-A-B. Ο συγκερασμός αφορά στον καθορισμό του τονικού ύψους κάθε νότας σε μια μουσική κλίμακα, με βάση τους λόγους συχνοτήτων που προκύπτουν από την υποδιαίρεση της οκτάβας σε μικρότερα διαστήματα. Για παράδειγμα, για τον σχηματισμό της *Πυθαγόρειας κλίμακας* χρησιμοποιείται κυρίως ο λόγος 3:2 (κύκλος των πεμπτών), ενώ η *φυσική κλίμακα* (just temperament) βασίζεται κυρίως στους λόγους 4:5:6, ώστε να ενισχύεται η φυσική συμφωνία των αρμονικών των τόνων.

Το σύστημα συγκερασμού που έχει επικρατήσει στη σύγχρονη δυτική μουσική είναι το *ισοσυγκερασμένο* (equal temperament), σύμφωνα με το οποίο, όλες οι νότες μιας οκτάβας απέχουν λογαριθμικά ίσα διαστήματα μεταξύ τους. Έτσι, ο λόγος συχνοτήτων μεταξύ δύο διαδοχικών ημιτονίων ισούται με $2^{1/12}$:1 (ή 1,0595:1), που αντιστοιχεί σε μια συχνοτική αύξηση περίπου 6%. Κάθε ημιτόνιο στην ισοσυγκερασμένη κλίμακα, διαιρείται εκ νέου σε εκατό λογαριθμικά ίσα διαστήματα που ονομάζονται *μόρια* (cents). Αφού υπάρχουν 100 μόρια ανά ημιτόνιο και 12 ημιτόνια ανά οκτάβα, τότε μια οκτάβα περιέχει συνολικά 1200 μόρια και άρα η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μορίων ισούται με τον λόγο $2^{1/1200}$:1 (ή 1,00058:1), ο οποίος αντιστοιχεί σε μια αύξηση της συχνότητας λίγο μικρότερη από 0,06%. Αυτή η τιμή όμως, είναι αρκετά πιο χαμηλή από το 0,2% στο οποίο υπολογίζεται η ελάχιστη αντιληπτή διαφορά στη συχνότητα (frequency JND), με αποτέλεσμα να απαιτούνται αρκετά μόρια ώστε να γίνει αισθητή μια μεταβολή στο τονικό ύψος της νότας. Σύμφωνα με μια έρευνα των Hill και Summers πάνω στις αντιληπτές διαφορές στο κούρδισμα, ο ελάχιστος αυτός αριθμός ανέρχεται περίπου στα δέκα μόρια.[44]

Interval		Frequency ratio (f_2/f_1)		
From C to . . .	Name	Equal temperament	Just	Pythagorean
C (itself)	Unison	$2^0 = 1.0595$	$1/1 = 1.0000$	$1/1 = 1.0000$
C#	Minor second	$2^{1/12} = 1.0595$	$16/15 = 1.0667$	$256/243 = 1.0535$
D	Major second	$2^{2/12} = 1.1225$	$10/9 = 1.1111$	$9/8 = 1.1250$
D#	Minor third	$2^{3/12} = 1.1892$	$6/5 = 1.2000$	$32/27 = 1.1852$
E	Major third	$2^{4/12} = 1.2599$	$5/4 = 1.2500$	$81/64 = 1.2656$
F	Fourth	$2^{5/12} = 1.3348$	$4/3 = 1.3333$	$4/3 = 1.3333$
F#	Tritone	$2^{6/12} = 1.4142$	$45/32 = 1.4063$	$1024/729 = 1.4047$
G	Fifth	$2^{7/12} = 1.4983$	$3/2 = 1.5000$	$3/2 = 1.5000$
G#	Minor sixth	$2^{8/12} = 1.5874$	$8/5 = 1.6000$	$128/81 = 1.5802$
A	Major sixth	$2^{9/12} = 1.6818$	$5/3 = 1.6667$	$27/16 = 1.6875$
A#	Minor seventh	$2^{10/12} = 1.7818$	$7/4 = 1.7500$	$16/9 = 1.7778$
B	Major seventh	$2^{11/12} = 1.8877$	$15/8 = 1.8750$	$243/128 = 1.8984$
(Next) C	Octave	$2^{12/12} = 2.0000$	$2/1 = 2.0000$	$2/1 = 2.0000$

Interval		Cents		
From C to . . .	Name	Equal temperament	Just	Pythagorean
C (itself)	Unison	0	0	0
C#	Minor second	100	112	90
D	Major second	200	182	204
D#	Minor third	300	316	294
E	Major third	400	386	408
F	Fourth	500	498	498
F#	Tritone	600	590	588
G	Fifth	700	702	702
G#	Minor sixth	800	814	792
A	Major sixth	900	884	906
A#	Minor seventh	1000	969	996
B	Major seventh	1100	1088	1110
(Next) C	Octave	1200	1200	1200

Εικόνα 2.6 *Οι λόγοι συχνοτήτων (πάνω) και τα μόρια (κάτω) των μουσικών διαστημάτων, όπως αντιστοιχούν στην ισοσυγκερασμένη, φυσική και Πυθαγόρεια κλίμακα*

2.3.3 Μουσική Έκταση και Νευρολογικοί Μηχανισμοί

Η μουσική έκταση των οργάνων μιας ορχήστρας καταλαμβάνει περίπου επτά οκτάβες, από τα 41 Hz της πιο χαμηλής νότας ενός κοντραμπάσου έως τα 4500 Hz της πιο υψηλής νότας ενός πίκολο φλάουτου. Αν και οι αρμονικές των θεμελιωδών συχνοτήτων που αντιστοιχούν στις νότες μπορούν να φτάνουν μέχρι και τα 16 KHz, η αντίληψη του τονικού χρώματος φαίνεται πως περιορίζεται στις συχνότητες κάτω από τα 5 KHz. Πειράματα που έχουν διεξαχθεί, έχουν δείξει πως πάνω από αυτό το όριο η αίσθηση της μελωδίας εξασθενεί και η αντίληψη των μουσικών διαστημάτων γίνεται ασαφής. Για παράδειγμα, ο Ward[45] βρήκε ότι οι μουσικοί μπορούσαν να ρυθμίσουν την συχνότητα ενός τόνου ώστε να είναι μια οκτάβα πάνω από έναν άλλο τόνο, μόνο όταν και οι δύο τόνοι βρίσκονταν κάτω από τα 5500 Hz. Οι Atteave και Olson[46] βρήκαν ότι η ικανότητα μετατροπίας μιας αλληλουχίας τριών νοτών (δηλαδή μιας απλής μελωδίας) εξασθενεί για συχνότητες πάνω από τα 5000 Hz και τέλος, οι Ohgushi και Hatoh[47] βρήκαν ότι η ικανοποιητική αναγνώριση του τονικού χρώματος από ακροατές με *απόλυτη ακοή* (perfect pitch), φθίνει αισθητά για συχνότητες άνω των 4500 Hz. Για τους περισσότερους ερευνητές, αυτά τα αποτελέσματα αποτελούν ένδειξη ότι η αντίληψη του τονικού χρώματος σχετίζεται με το εύρος λειτουργίας του phase locking και κατ' επέκταση, με τον χρονικό μηχανισμό κωδικοποίησης της συχνότητας στο ακουστικό μας σύστημα. Έτσι, ενισχύεται η υπόθεση ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός κωδικοποίησης για τις χαμηλότερες συχνοτικές περιοχές είναι ο χρονικός (temporal), εν αντιθέσει με τις υψηλότερες περιοχές όπου φαίνεται να υπερισχύει ο χωρικός (place).

2.3.4 Σύμφωνα και Διάφωνα Διαστήματα (Consonance and Dissonance)

Η συμφωνία και η διαφωνία, είναι όροι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την ευχάριστη ή μη αίσθηση που προκαλείται από τη συνήχηση των τόνων. Για παράδειγμα, το διάστημα πέμπτης καθαρής θεωρείται σύμφωνο, σε αντιδιαστολή με το διάστημα της τετάρτης αυξημένης το οποίο αντιλαμβάνεται ως διάφωνο. Η συμφωνία ή η διαφωνία ενός ζεύγους τόνων προκύπτει από τη διαφορά των συχνοτήτων τους και κατά πόσο καλά αυτές αναλύονται από το ακουστικό σύστημα. Εάν οι συχνότητες απέχουν ελάχιστα μεταξύ τους, τότε αλληλεπιδρούν στο ίδιο ακουστικό φίλτρο, προκαλώντας ταχύτατα διακροτήματα τα οποία οδηγούν σε μια ενοχλητική αίσθηση τραχύτητας που γίνεται αντιληπτή ως διαφωνία. Αντιθέτως, εάν οι συχνότητες των τόνων απέχουν περισσότερο από το κρίσιμο εύρος ζώνης των φίλτρων, τότε δεν συντελούνται διακροτήματα και η αίσθηση είναι ευχάριστη, κάτι που εκλαμβάνεται ως συμφωνία. Τα διαστήματα που ηχούν σύμφωνα είναι αυτά που οι τόνοι τους σχετίζονται με απλούς (μικρούς) λόγους συχνοτήτων, όπως για παράδειγμα η οκτάβα (2:1), η πέμπτη καθαρή (3:2) και η τετάρτη καθαρή (4:3), ενώ διάφωνα θεωρούνται τα διαστήματα με σύνθετους (μεγάλους) λόγους συχνοτήτων, όπως είναι για παράδειγμα το τρίτονο (45:32). Η αντίληψη των συγχορδιών γίνεται λίγο πιο περίπλοκη όταν εμπλέκονται παραπάνω από δύο τόνοι ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, μια σύμφωνη συγχορδία τριών νοτών αντιλαμβάνεται ως σταθερή, όταν το διάστημα μεταξύ της χαμηλής και της μεσαίας νότας είναι διαφορετικό από το αντίστοιχο διάστημα της μεσαίας και της υψηλής νότας. Ωστόσο, στην περίπτωση που τα δύο αυτά διαστήματα είναι ίσα, προκαλείται μια συναισθηματική ένταση (tension) με αποτέλεσμα η συγχορδία να θεωρείται ασταθής, παρόλο που δεν προκύπτει διαφωνία μεταξύ των τόνων.

2.3.5 Απόλυτο Τονικό Ύψος (Absolute Pitch)

Το απόλυτο τονικό ύψος, γνωστό και ως απόλυτη ακοή, είναι μια εξαιρετικά σπάνια ικανότητα αναγνώρισης και αναπαραγωγής ενός μουσικού τόνου χωρίς τη χρήση κάποιου τόνου αναφοράς. Αυτή η ικανότητα συναντάται περίπου σε 1 στους 10000 ανθρώπους, αν και είναι πιο συχνή σε χώρες όπου η εντατική μουσική εκπαίδευση ξεκινάει από νεαρή ηλικία, όπως στην Ιαπωνία. Σύμφωνα με τον Levitin,[48] το απόλυτο τονικό ύψος συνίσταται από δύο ξεχωριστές ικανότητες: Πρώτον, την ικανότητα διατήρησης μιας σταθερής και μακροπρόθεσμης αναπαράστασης του ύψους συγκεκριμένων τόνων στη μνήμη (τονική απομνημόνευση) και δεύτερον, την ικανότητα αντιστοίχησης ετικετών σε αυτά τα ύψη, όπως για παράδειγμα «Α», «440 Hz» ή «λα» (τονική επισήμανση). Αν και η τονική μνήμη είναι αρκετά συνηθισμένη ανάμεσα στους ακροατές, η τονική επισήμανση θεωρείται αποκλειστικό χαρακτηριστικό των κατόχων απόλυτης ακοής. Ωστόσο, οι μουσικοί που ισχυρίζονται ότι ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία, δεν είναι απαραίτητα καλύτεροι από τους υπόλοιπους μουσικούς σε ότι αφορά τη διάκριση συχνότητας ή την αντίληψη μικρών συχνοτικών αποκλίσεων μιας νότας μέσα σε ένα μουσικό περιεχόμενο. Μάλιστα, ακόμη και όσοι υποστηρίζουν ότι έχουν απόλυτη ακοή, μπορεί να κάνουν σφάλματα οκτάβας στην αναγνώριση του τονικού ύψους και λάθη απόστασης ημιτονίου. Συνήθως πετυχαίνουν 50-100% σωστές απαντήσεις στις δοκιμασίες αναγνώρισης τονικού ύψους μεμονωμένων ήχων, αλλά ακόμα και οι μουσικοί που δεν υποστηρίζουν ότι έχουν απόλυτη ακοή, μπορεί να πετύχουν ένα 40% σωστών απαντήσεων στις ίδιες δοκιμασίες.[49]

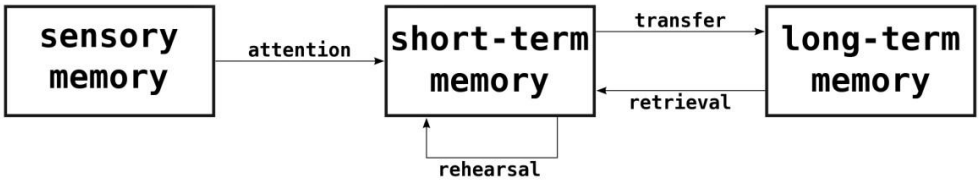
Αρκετές έρευνες υποστηρίζουν ότι η απόλυτη ακοή αποκτάται μέχρι την ηλικία των 9 ετών, οδηγώντας στην υπόθεση ότι η εμφάνισή της συντελείται πριν από την ανάπτυξη άλλων γνωστικών ικανοτήτων που μπορεί να την καταπιέσουν ή να την εξαλείψουν. Ωστόσο, δεν είναι ακόμα σαφές αν οφείλεται στην συστηματική μουσική εκπαίδευση από μικρή ηλικία ή στην ύπαρξη κάποιας γενετικής προδιάθεσης. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η κατανόηση τόσο της απόλυτης ακοής όσο και του γιατί αυτή εμφανίζεται μόνο σε μερικά άτομα και όχι σε όλα, μπορεί να μας δώσει περισσότερες πληροφορίες για την αλληλεπίδραση της αντίληψης και της γνωστικής ικανότητας στην επεξεργασία των μελωδιών και του τονικού ύψους από τους ανθρώπους.

2.4 Μνήμη Και Εκπαίδευση

Η αντίληψη ενός ηχητικού ερεθίσματος από τον εγκέφαλο δεν εξαρτάται μόνο από το σύστημα που κωδικοποιεί τις εισερχόμενες ακουστικές πληροφορίες, αλλά και από το σύστημα που τις διατηρεί μόλις φτάσουν. Αυτό συμβαίνει επειδή κάθε εισερχόμενος ήχος ακόμα και μετά την παύση του, αφήνει νευρωνικά ίχνη στον εγκέφαλο που επηρεάζουν την αντιληπτική ανάλυση τόσο του ίδιου, όσο και εκείνων που ακολουθούν. Έτσι λοιπόν, είναι βάσιμο να πούμε ότι τουλάχιστον όσον αφορά την ακοή, η μνήμη και η αντίληψη είναι τόσο βαθιά αλληλένδετες που δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ τους. Η άρρηκτη αυτή σχέση της ακουστικής αντίληψης με τη μνήμη, αποτελεί και τον βασικό λόγο που είναι εφικτή η εκπαίδευσή της μέσα από την συστηματική εξάσκηση ή την εμπειρία. Μάλιστα, ολοένα και περισσότερες έρευνες τα τελευταία χρόνια βρίσκουν εφαρμογή σε μεθόδους και προγράμματα εκπαίδευσης ακοής με βάση τον Η/Υ, που χρησιμοποιούνται κυρίως από τους νεαρούς μηχανικούς ήχου για την βελτίωση της ακουστικής τους ευαισθησίας.

2.4.1 Δομή της Μνήμης (Memory Structure)

Στην Ψυχολογία, η μνήμη είναι η διαδικασία κωδικοποίησης, αποθήκευσης και ανάκτησης των πληροφοριών. Οι περιοχές του εγκεφάλου που συμμετέχουν σε αυτή τη διαδικασία είναι μεταξύ άλλων η αμυγδαλή, ο ιππόκαμπος, η μαστία και ο θάλαμος. Η ανθρώπινη μνήμη μπορεί να χωριστεί σε τρεις βασικούς τύπους: στην *αισθητηριακή* (sensory), στη *βραχυπρόθεσμη* (short-term) και στη *μακροπρόθεσμη* (long-term) μνήμη. Η αισθητηριακή μνήμη είναι η πιο σύντομη μορφή μνήμης από τις τρεις και στην είσοδό της δέχεται τα δεδομένα από τις πέντε αισθήσεις, τα οποία και διατηρεί μετά την παύση του αρχικού ερεθίσματος έως ότου χρησιμοποιηθούν από ανώτερα εγκεφαλικά κέντρα ή διαγραφούν διά παντός. Η χρήση της είναι ασυνείδητη και η διάρκεια των αναπαραστάσεων κυμαίνεται από 500 msec έως 4 sec, ανάλογα με το είδος του ερεθίσματος.[50] Υποκατηγορίες αυτής της μνήμης περιλαμβάνουν την *εικονική* (iconic), την *ηχητική* (echoic) και την *απτική* (haptic) μνήμη. Η βραχυπρόθεσμη μνήμη αξιοποιείται ως το «σημειωματάριο» για την πρόσκαιρη αποθήκευση δεδομένων που τελούν υπό επεξεργασία. Για παράδειγμα, προκειμένου να γίνει κατανοητή αυτή η πρόταση, η αρχή της πρότασης θα πρέπει να κρατηθεί κατά νου για όσο χρειάζεται να διαβαστεί η υπόλοιπη. Η διάρκεια ζωής των πληροφοριών κυμαίνεται από 30 sec έως λίγα λεπτά και η χωρητικότητά της εκτιμάται σε 7 ± 2 στοιχεία.[51] Τέλος, η μακροπρόθεσμη μνήμη, όπως δηλώνει και το όνομά της, προορίζεται για την αποθήκευση δεδομένων για μεγάλες χρονικές περιόδους. Αυτός ο τύπος μνήμης φθίνει ελάχιστα με την πάροδο του χρόνου και σε αντίθεση με τη βραχυπρόθεσμη, μπορεί να αποθηκεύσει μια φαινομενικά απεριόριστη ποσότητα πληροφοριών, σχεδόν επ' αόριστον.

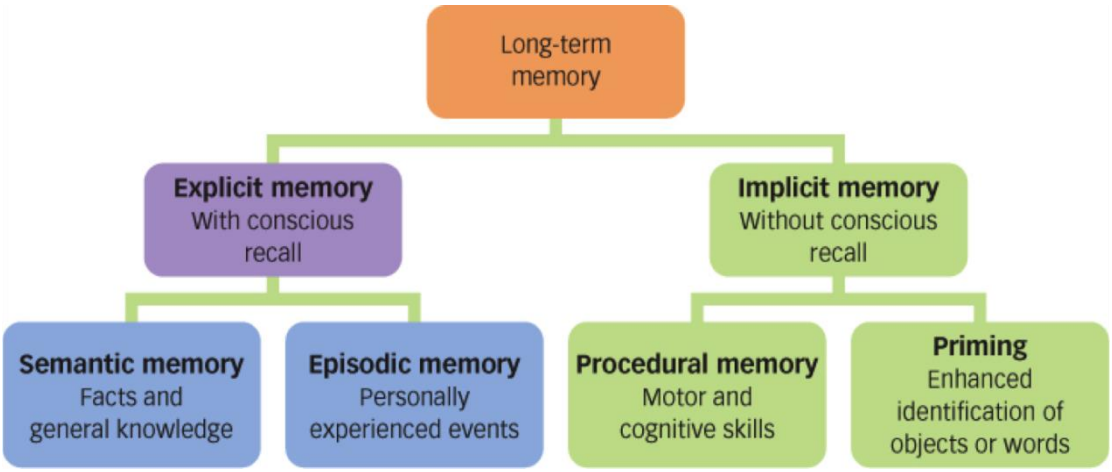


Εικόνα 2.7 *Οι τρεις βασικές κατηγορίες μνήμης*

Η μακροπρόθεσμη μνήμη μπορεί να διαιρεθεί περαιτέρω με βάση τον τρόπο αποθήκευσης και ανάκλησης των πληροφοριών στην *έκδηλη* (explicit) και στην *άδηλη* (implicit) μνήμη. Η έκδηλη μνήμη, που συχνά αποκαλείται και *δηλωτική* (declarative), αφορά πληροφορίες για τοποθεσίες, άτομα και αυτοβιογραφικά συμβάντα, καθώς και την τεκμηριωμένη γνώση. Ο σχηματισμός της εξαρτάται από γνωστικές διεργασίες όπως η εκτίμηση, η σύγκριση και η συνεπαγωγή, ενώ η ανάκλησή της γίνεται συνειδητά. Η άδηλη μνήμη από την άλλη, έχει αυτόματο ή αντανακλαστικό χαρακτήρα, ενώ ο σχηματισμός και η ανάκλησή της δεν εξαρτώνται απολύτως από την επίγνωση ή τις γνωστικές διεργασίες. Αυτή η μορφή μνήμης συσσωρεύεται βραδέως με τη πολλαπλή επανάληψη, είναι επιδεκτική στη βελτίωση και συνήθως δεν είναι δυνατόν να εκφραστεί με λέξεις.[52] Παραδείγματος χάριν, το να θυμηθούμε ένα συγκεκριμένο μάθημα οδήγησης οφείλεται στην έκδηλη μνήμη, ενώ η βελτίωση της ικανότητας οδήγησης ως αποτέλεσμα του μαθήματος οφείλεται στην άδηλη μνήμη.

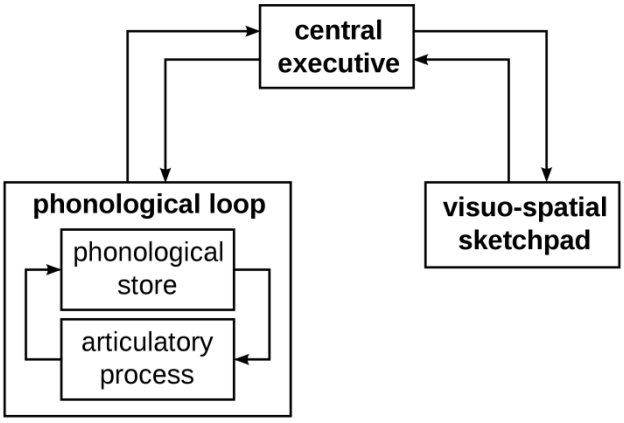
Η έκδηλη μνήμη μπορεί να διαιρεθεί εκ νέου, ανάλογα με τη φύση της πληροφορίας, στην *επεισοδιακή* (episodic) και στη *σημασιολογική* (semantic) μνήμη. Η επεισοδιακή μνήμη αφορά κυρίως σε αυτοβιογραφικά συμβάντα και περιλαμβάνει πληροφορίες στις οποίες μπορούμε να αναφερθούμε με σαφήνεια σχετικά με το χρόνο, τον τόπο και τα συνδεόμενα συναισθήματα παρελθοντικών προσωπικών εμπειριών. Αυτή είναι επίσης η μοναδική μορφή μνήμης που μας επιτρέπει ένα νοητικό ταξίδι στο χρόνο, να θυμηθούμε δηλαδή ένα συγκεκριμένο συμβάν που ζήσαμε στο παρελθόν και να το αναβιώσουμε.[53] Αντιθέτως, η σημασιολογική μνήμη αναφέρεται στην γενική γνώση που έχουμε αποκτήσει για τον κόσμο, όπως έννοιες, γεγονότα και πεποιθήσεις. Χαρακτηριστικό αυτής της μνήμης είναι ότι οι πληροφορίες μπορούν να ανακληθούν χωρίς απαραίτητα την αναφορά στις συνθήκες υπό τις οποίες είχαν αρχικά αποκτηθεί.[54] Για παράδειγμα, το να γνωρίζουμε ότι το Παρίσι είναι η πρωτεύουσα της Γαλλίας είναι προϊόν της σημασιολογικής μνήμης, αλλά η ανάμνηση από μια εκδρομή μας εκεί ανήκει στην επεισοδιακή μνήμη.

Ομοίως, η άδηλη μνήμη μπορεί να διαιρεθεί στη *διαδικαστική* (procedural) και στη μνήμη *προέγερσης* (priming). Η διαδικαστική μνήμη σχετίζεται με συνήθειες, συμπεριφορές και εμπειρίες. Αφορά στην ασυνείδητη ικανότητα να κάνουμε πράγματα όπως για παράδειγμα, να δένουμε τα κορδόνια μας, να παίζουμε κιθάρα ή να κάνουμε ποδήλατο. Αυτές οι μνήμες συνήθως αποκτώνται μέσω της επανάληψης και της εξάσκησης, ενώ αποτελούνται από αυτόματες κιναισθητικές συμπεριφορές οι οποίες είναι τόσο βαθιά ριζωμένες μέσα μας, που πλέον δεν τις αντιλαμβανόμαστε.[55] Η μνήμη προέγερσης αφορά στο φαινόμενο κατά το οποίο η έκθεση σε ένα αρχικό ερέθισμα, επηρεάζει ασυνείδητα την απόκρισή μας σε ένα μεταγενέστερο, με αποτέλεσμα την πιο άμεση αναγνώρισή του. Για παράδειγμα, η λέξη «νοσοκόμα» αναγνωρίζεται ταχύτερα αν προηγείται η λέξη «γιατρός», από ότι αν προηγείται η λέξη «ψωμί». Η προέγερση δεν συνδέεται απαραίτητα με τη σημασιολογική μνήμη, ενώ η επίδρασή της διαρκεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα που σε κάποιες περιπτώσεις μπορούν να φτάσουν ακόμα και τον ένα χρόνο.[56]



Εικόνα 2.8 *Ο διαχωρισμός της μακροπρόθεσμης μνήμης στις επιμέρους υποκατηγορίες*

Ένα πολύ κοινό μοντέλο μνήμης που συνήθως συγχέεται με τη βραχυπρόθεσμη μνήμη, είναι η *μνήμη εργασίας* (working memory), όπως προτάθηκε το 1974 από τους Baddeley και Hitch.[57] Η βασική τους διαφορά είναι ότι η βραχυπρόθεσμη μνήμη αντιπροσωπεύει την παθητική αποθήκευση πληροφοριών, ενώ η μνήμη εργασίας προβάλλεται ως μια νοητική λειτουργία που συνδυάζει την αποθήκευση, την επεξεργασία και τον εκτελεστικό έλεγχο της γνωστικής διεργασίας που συντελείται. Το μοντέλο αποτελείται από ένα *φωνολογικό κύκλωμα* (phonological loop), ένα *οπτικοχωρικό σημειωματάριο* (visuo-spatial sketchpad) και μια *κεντρική εκτελεστική μονάδα* (central executive) που είναι υπεύθυνη για τον συντονισμό τους. Το φωνολογικό κύκλωμα αποθηκεύει πρόσκαιρα τις πληροφορίες που έχουν να κάνουν με τον ήχο της γλώσσας, τις οποίες και διατηρεί για όσο χρειαστεί μέσω ενός εσωτερικού συστήματος επανάληψης. Το οπτικοχωρικό σημειωματάριο συνενώνει χωρικές, οπτικές και πιθανόν κιναισθητικές πληροφορίες σε μια ενιαία αναπαράσταση, η οποία μπορεί να αποθηκευτεί προσωρινά και να υποβληθεί σε επεξεργασία. Τέλος, η κεντρική εκτελεστική μονάδα είναι υπεύθυνη για την κατεύθυνση της προσοχής στις πληροφορίες που θεωρούνται σχετικές, καθώς επίσης και για τον συντονισμό των γνωστικών διεργασιών όταν παραπάνω από μια ενέργειες πρέπει να εκτελεστούν ταυτόχρονα.



Εικόνα 2.9 *Το μοντέλο της μνήμης εργασίας κατά τους Baddeley και Hitch*

2.4.2 Ακουστική Μνήμη (Auditory Memory)

Η ακουστική μνήμη είναι το σύστημα μνήμης που αφορά στην κωδικοποίηση, επεξεργασία και αποθήκευση των λεκτικών και μη λεκτικών ακουστικών πληροφοριών. Αν και πρόκειται για μια μορφή μνήμης που χρησιμοποιούμε καθημερινά, λίγα πράγματα είναι γνωστά με βεβαιότητα για τη φύση της. Σύμφωνα με το μοντέλο που επικρατεί, τα δεδομένα που φτάνουν αρχικά στην ηχητική αισθητηριακή μνήμη οργανώνονται σε κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά τους και στη συνέχεια ενεργοποιούν τις αντίστοιχες κατηγορίες που είναι αποθηκευμένες στη μακροπρόθεσμη μνήμη. Αυτές οι κατηγορίες, που είναι ως επί το πλείστον ασυνείδητες, περιλαμβάνουν τη γνώση που σχετίζεται με τα συμβάντα τα οποία τις ενεργοποιούν και επηρεάζουν την κατεύθυνση της προσοχής. Οι πληροφορίες που θα ενεργοποιήσουν αυτές τις κατηγορίες και που ίσως με αυτό τον τρόπο θα τις φέρουν στο συνειδητό, θα μεταφερθούν στη συνέχεια στη μνήμη εργασίας όπου, εάν δεν διατηρηθούν

μέσω της εσωτερικής επανάληψης, θα διαγραφούν ή θα αντικατασταθούν από τις καινούριες. Εάν η επανάληψη γίνεται συνειδητά ή οι πληροφορίες είναι καινοφανείς ή εντυπωσιακές, τότε μπορεί να μεταφερθούν πίσω στη μακροπρόθεσμη μνήμη, ώστε να προστεθούν ή να προκαλέσουν τροποποιήσεις στις ήδη υπάρχουσες σχετικές αναμνήσεις και να γίνουν με αυτόν τον τρόπο πλέον μόνιμες.[58]

Οι σύγχρονες νευροφυσιολογικές και συμπεριφορικές μελέτες εστιάζουν στη λειτουργία της ηχητικής αισθητηριακής μνήμης, η οποία θεωρείται υπεύθυνη για τη διαδικασία της οργάνωσης των εισερχόμενων νευρωνικών σημάτων σε κατηγορίες που αντιστοιχούν στις ιδιότητες του ερεθίσματος, όπως για παράδειγμα το τονικό ύψος, η ακουστότητα ή η θέση της πηγής στο χώρο. Αυτή η διαδικασία αποκαλείται *αντιληπτική κατηγοριοποίηση* (perceptual categorization) και πραγματοποιείται σε δύο φάσεις: η πρώτη διαρκεί περίπου 200-400 msec από την έναρξη του ήχου (onset) και ονομάζεται *εξαγωγή χαρακτηριστικών* (feature extraction), ενώ η δεύτερη έχει διάρκεια λίγων δευτερολέπτων και ονομάζεται *αντιληπτική σύνθεση* (perceptual binding).[59] Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, η συνεχής νευρωνική δραστηριότητα που μεταφέρει την ηχητική πληροφορία επεξεργάζεται από εξειδικευμένους νευρώνες που εξάγουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του ερεθίσματος, τα οποία κατά τη δεύτερη φάση, ομαδοποιούνται με βάση τη χρονική τους εγγύτητα και τη φασματική τους ομοιότητα σε μια ενιαία αναπαράσταση που ονομάζεται *ακουστικό συμβάν* (auditory event).[60] Τα ακουστικά συμβάντα αποτελούν τμηματικές νευρωνικές αναπαραστάσεις του αρχικού ερεθίσματος που μεταφέρουν τις πληροφορίες του τονικού ύψους, της ακουστότητας και της χροιάς, ταξινομημένες σε διακριτές κατηγορίες με ξεχωριστές αναπαραστάσεις στη μακροπρόθεσμη μνήμη.[61] Όταν αυτές οι κατηγορίες της μακροπρόθεσμης μνήμης ενεργοποιηθούν από τα ακουστικά συμβάντα, θα περάσουν στη μνήμη εργασίας όπου, μαζί άλλες συναφείς αισθητηριακές και λεκτικές αναπαραστάσεις, θα χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση του ηχητικού αντικειμένου.[62] Ωστόσο, δεν γίνονται όλες οι ενεργοποιημένες αναμνήσεις σε αυτό το στάδιο συνειδητές. Πολλές μπορούν να παραμείνουν ασυνείδητες, δημιουργώντας ένα λανθάνον κλίμα προσδοκιών για τα επερχόμενα συμβάντα που μπορεί να επηρεάσει την κατεύθυνση της προσοχής.[63]

Έρευνες έχουν δείξει ότι η κατηγορία της μακροπρόθεσμης μνήμης που αφορά ειδικά στο τονικό ύψος, είναι οργανωμένη τονοτοπικά στον πρωτογενή ακουστικό φλοιό με τον ίδιο τρόπο που είναι οργανωμένο το σύστημα που εκτελεί την αρχική ανάλυση του ήχου.[64] Με αυτό τον τρόπο, η τονική μνήμη μπορεί να αποθηκεύσει ξεχωριστές αναπαραστάσεις του ύψους μεμονωμένων καθαρών τόνων, τις οποίες αργότερα μπορεί να χρησιμοποιήσει για να συγκρίνει την αρμονική δομή ενός σύνθετου ερεθίσματος με σκοπό να καταλήξει στο τονικό του ύψος.[65] Επειδή η εκτίμηση του ύψους ενός ερεθίσματος από την περίοδό του απαιτεί χρόνο, ο McLachlan[66] υποστηρίζει ότι το τονικό ύψος καθορίζεται πρώτα από τη σύγκριση του μοτίβου της νευρωνικής διέγερσης με τις αποθηκευμένες αναπαραστάσεις της τονικής μνήμης και μετά βελτιώνεται από τη χρονική ανάλυση της κυματομορφής που προκύπτει έπειτα από πολλαπλές περιόδους του ερεθίσματος. Έρευνες έχουν δείξει επίσης ότι η τονική μνήμη δεν επηρεάζεται από την ακουστότητα ή τη χροιά του ερεθίσματος, ενώ έχει βρεθεί ότι είναι υπεύθυνη και για την διατήρηση των πληροφοριών που αφορούν στο τονικό ύψος των προφορικών λέξεων.[67]

2.4.3 Αντιληπτική Μάθηση (Perceptual Learning)

Η βελτίωση της ικανότητας διάκρισης των χαρακτηριστικών ενός ερεθίσματος μέσω της εξάσκησης ή της εμπειρίας αποκαλείται *αντιληπτική μάθηση*. Η αντιληπτική μάθηση συνδέεται με την εκτεταμένη εκπαίδευση στη διάκριση συγκεκριμένων παραμέτρων ενός ερεθίσματος, που έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή των λειτουργικών ιδιοτήτων των νευρώνων που σχετίζονται με την επεξεργασία (*πλαστικότητα*).[68] Ωστόσο, η βελτίωση της επίδοσης στα πλαίσια μιας ειδικής αντιληπτικής δοκιμασίας μπορεί να προέρχεται εν μέρει από την *διαδικαστική μάθηση*, η οποία αφορά στην εμπέδωση των απαιτήσεων της συγκεκριμένης δοκιμασίας. Αν και οι δύο αυτές μορφές μάθησης βασίζονται στην άδηλη μνήμη, υπάρχουν κάποιες σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Όπως υποστηρίζεται, η διαδικαστική μάθηση σχετίζεται με το αρχικό στάδιο ραγδαίας βελτίωσης στην επίδοση των συμμετεχόντων εξαιτίας της αφομοίωσης της διαδικασίας, ενώ η αντιληπτική μάθηση θεωρείται υπεύθυνη για το μεταγενέστερο και πιο αργό στάδιο κατά το οποίο η βελτίωση εκφράζεται κλιμακωτά σε βάθος χρόνου εξαιτίας της εκπαίδευσης.[69] Επομένως, για την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων από μια αντιληπτική δοκιμασία, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή ενός αριθμού προκαταρκτικών δοκιμαστικών ώστε οι συμμετέχοντες να προσεγγίσουν την ασυμπτωτική τους επίδοση.

Πρόσφατες έρευνες δείχνουν ότι, ενώ η αντιληπτική μάθηση παρουσιάζει μια εξειδίκευση (specificity) στις παραμέτρους του ερεθίσματος που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση, σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρείται μια γενίκευση και σε άλλα χαρακτηριστικά του ερεθίσματος. Για παράδειγμα, οι Karmarkar και Buonomano[70] βρήκαν ότι οι ακροατές που εκπαιδεύτηκαν στη διάκριση ενός διαστήματος των 100 ή 200 msec, παρουσίασαν βελτίωση στη επίδοσή τους για τα διαστήματα που έλαβαν εκπαίδευση, ανεξάρτητα από τη συχνότητα του ερεθίσματος. Ωστόσο, η βελτίωση δεν έδειξε να γενικεύεται σε διαστήματα στα οποία δεν εκπαιδεύτηκαν, καταλήγοντας έτσι στο συμπέρασμα ότι η αντιληπτική μάθηση μπορεί να γενικευτεί στις συχνότητες (φασματικό πεδίο) αλλά όχι στα χρονικά διαστήματα (χρονικό πεδίο). Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό της αντιληπτικής μάθησης είναι η σχέση της με την ποσότητα της εκπαίδευσης. Όπως παρατήρησαν οι Wright και Sabin,[71] η εκπαίδευση των ακροατών σε μια αντιληπτική δοκιμασία παραπάνω από μια κρίσιμη ποσότητα την ημέρα δεν αποφέρει επιπλέον βελτίωση στην επίδοσή τους, ενώ το όριο της καθημερινής εκπαίδευσης φαίνεται να εξαρτάται από τις απαιτήσεις και το είδος της δοκιμασίας.

2.4.4 Παραδείγματα Ακουστικής Εκπαίδευσης (Auditory Training Paradigms)

Η ακουστική εκπαίδευση συναντάται σε διάφορες έρευνες για τη μελέτη των ιδιοτήτων του ακουστικού συστήματος του ανθρώπου. Για παράδειγμα, στις ψυχοακουστικές μελέτες χρησιμοποιείται συνήθως για την επίτευξη της ασυμπτωτικής επίδοσης των ακροατών στη διάκριση των ζητούμενων χαρακτηριστικών ενός ερεθίσματος, ενώ στις νευροφυσιολογικές μελέτες χρησιμοποιείται κυρίως για τη μελέτη της πλαστικότητας των νευρώνων που χαρακτηρίζει την αντιληπτική μάθηση. Για να μπορέσει όμως να αξιολογηθεί η επίδραση της ακουστικής εκπαίδευσης στην αντιληπτική ικανότητα των ακροατών, ακολουθείται μια συγκεκριμένη μεθοδολογία που περιλαμβάνει το διαχωρισμό των συμμετεχόντων σε δύο ομάδες, εκ των οποίων η μία υποβάλλεται στην εκπαίδευση ενώ η άλλη χρησιμοποιείται ως

ομάδα ελέγχου. Αμφότερες οι ομάδες εξετάζονται πριν και μετά τη περίοδο εκπαίδευσης, η οποία μπορεί να διαρκέσει από μερικές μέρες έως μερικές εβδομάδες, ανάλογα με το είδος και τις απαιτήσεις της δοκιμασίας.

Για παράδειγμα, στην έρευνά του για τους νευρωνικούς μηχανισμούς αντίληψης του τονικού ύψους, ο Grimault κ.ά.[72] χρησιμοποίησε ένα δείγμα 12 συμμετεχόντων, από τους οποίους οι 8 εκπαιδεύτηκαν για τέσσερις εβδομάδες σε έξι σύνθετους τόνους διάρκειας 200 msec, ενώ οι υπόλοιποι χρησίμευσαν ως ομάδα ελέγχου. Το πρόγραμμα εκπαίδευσης περιελάμβανε δίωρες συνεδρίες για τρεις μέρες την εβδομάδα και η παρουσίαση των ερεθισμάτων γινόταν μέσω ακουστικών σε κατάλληλα ηχομονωμένο χώρο. Η Gaab κ.ά.,[73] για να μελετήσει τις περιοχές του εγκεφάλου που σχετίζονται με την ακουστική μνήμη, υπέβαλλε σε *λειτουργική απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού* (fMRI) 24 εθελοντές, εκ των οποίων οι 14 εκπαιδεύτηκαν για πέντε συνεχόμενες ημέρες σε μια ακολουθία καθαρών τόνων συνολικής διάρκειας 4,6 sec. Η διάρκεια της καθημερινής εκπαίδευσης ήταν μια ώρα, ενώ οι τόνοι παρουσιάζονταν στους ακροατές αμφιωτικά. Τέλος, ο Alain κ.ά.[74] θέλοντας να μελετήσει τις νευροπλαστικές αλλαγές στον αισθητηριακό φλοιό που προκαλούνται από την αντιληπτική μάθηση, σχεδίασε δύο πειράματα στα οποία έλαβαν μέρος συνολικά 32 άτομα. Τα ερεθίσματα στα οποία υποβλήθηκαν οι συμμετέχοντες ήταν πέντε συνθετικά αγγλικά φωνήεντα διάρκειας 200 msec σε έξι διαφορετικές θεμελιώδεις συχνότητες το καθένα, τα οποία τους παρουσιάζονταν σε τυχαία ζεύγη που καλούνταν να αναγνωρίσουν. Στο πρώτο πείραμα συμμετείχαν 16 ακροατές, από τους οποίους οι μισοί εκπαιδεύτηκαν στην παραπάνω δοκιμασία επί 35 λεπτά για τέσσερις ημέρες, ενώ οι υπόλοιποι αποτέλεσαν την ομάδα ελέγχου που δεν έλαβε καμία εκπαίδευση. Στο δεύτερο πείραμα συμμετείχαν οι υπόλοιποι 16 ακροατές, οι οποίοι υποβλήθηκαν στα ίδια ερεθίσματα, όμως αυτή τη φορά τους ζητήθηκε κατά τη διάρκεια της συνεδρίας να παρακολουθούν μια υποτιτλισμένη ταινία της αρεσκείας τους (χωρίς ήχο), ώστε να διαπιστωθεί εάν η παθητική ακρόαση αρκεί για να επιφέρει ανάλογες νευροπλαστικές αλλαγές στη δομή του αισθητηριακού φλοιού.

2.4.5 Προγράμματα Εκπαίδευσης Ακοής (Ear Training Programs)

Παράλληλα με τη ραγδαία εξέλιξη της μουσικής τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί αρκετά προγράμματα εκπαίδευσης ακοής με βάση τον Η/Υ που έχουν ως στόχο τη βελτίωση της ακουστικής ευαισθησίας των επαγγελματιών του ήχου. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το πρόγραμμα εκπαίδευσης ακοής που σχεδιάστηκε στο Kyushu Institute of Design της Ιαπωνίας, για χρήση από τους πρωτοετείς σπουδαστές του τμήματος Ηχητικού Σχεδιασμού.[75] Το πρόγραμμα χωρίζεται σε δύο τάξεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα δυσκολίας. Στην πρώτη τάξη, οι σπουδαστές συμμετέχουν σε απλές δοκιμασίες διάκρισης τονικού ύψους, ακουστότητας και χροιάς, ώστε να βελτιώσουν την ευαισθησία τους στις βασικές ιδιότητες του ήχου. Στη δεύτερη τάξη, οι ίδιες δοκιμασίες γίνονται πιο απαιτητικές, ενώ εισάγονται κάποιες επιπλέον όπως η αναγνώριση της συχνότητας αποκοπής ενός φίλτρου, η εκτίμηση της κλίσης της περιβάλλουσας, η αναγνώριση του χρόνου αντήχησης και η διάκριση της αρμονικής παραμόρφωσης. Όλες οι δοκιμασίες πραγματοποιούνται σε ένα ηχομονωμένο δωμάτιο με ένα μικρό control room, ενώ η βάση του προγράμματος είναι ένας Η/Υ στον οποίο είναι συνδεδεμένα τα PDA

τερματικά που χρησιμοποιούνται από τους συμμετέχοντες για την καταχώριση των απαντήσεων και τον άμεσο έλεγχο της επίδοσής τους.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το πρόγραμμα εξατομικευμένης εκπαίδευσης ακοής που σχεδίασαν ερευνητές του Πανεπιστημίου της Tsukuba σε συνεργασία με τη Yamaha Corporation.[76] Το πρόγραμμα περιλαμβάνει μια σειρά από δοκιμασίες αναγνώρισης της κεντρικής συχνότητας μιας τροποποιημένης περιοχής του φάσματος, με απώτερο σκοπό τη δημιουργία μιας μακροπρόθεσμης μνήμης αναφοράς στην οποία μπορούν να βασίζονται οι εκπαιδευόμενοι για μελλοντικές συχνοτικές συγκρίσεις. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του προγράμματος είναι ότι διατηρεί ένα ιστορικό των προηγούμενων επιδόσεων του χρήστη, βάσει του οποίου υπολογίζει τα αδύνατα σημεία του και προσαρμόζει τη σειρά των ασκήσεων αναλόγως, ώστε ο εκπαιδευόμενος να επικεντρωθεί σε αυτά χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία κάποιου εκπαιδευτή.

Τέλος, αξίζει να γίνει αναφορά στο *Golden Ears*,[77] το πιο διαδεδομένο ίσως πρόγραμμα εκπαίδευσης ακοής για μηχανικούς ήχου που κυκλοφορεί στο εμπόριο. Πρόκειται για μια συλλογή που αποτελείται από οκτώ audio CD, χωρισμένα σε τρεις βασικές κατηγορίες ασκήσεων: Συχνότητες, Επεξεργασία Σήματος και Εφφέ Χρονικού Πεδίου (Delay - Reverb). Κάθε CD περιέχει ένα πλήθος ηχητικών δειγμάτων που παρουσιάζονται πρώτα στην αρχική και εν συνεχεία στην επεξεργασμένη τους μορφή, με τον εκπαιδευόμενο να καλείται να αναγνωρίσει το είδος και την ποσότητα της εκάστοτε επεξεργασίας. Μαζί με τις ασκήσεις παρέχονται και μερικά ηχητικά παραδείγματα για την κατανόηση της διαδικασίας, ενώ το πρόγραμμα συνοδεύεται από ένα εγχειρίδιο χρήσης το οποίο περιλαμβάνει τις οδηγίες και τις απαντήσεις των ασκήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πειραματική Διαδικασία

Γενικά

Με μια απλή αναζήτηση στο διαδίκτυο, ο καθένας μπορεί να συναντήσει ένα πλήθος από προγράμματα και μεθόδους εκπαίδευσης ακοής που υπόσχονται ταχεία βελτίωση στην αντίληψη του ήχου. Βέβαια, τα περισσότερα εξ αυτών αφορούν στη μουσική εκπαίδευση, όμως υπάρχουν και μερικά που στοχεύουν ειδικά στην βελτίωση της κριτικής ακοής ενός μηχανικού ήχου. Στο προηγούμενο κεφάλαιο δόθηκαν μερικά τέτοια παραδείγματα, ωστόσο η έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο παραμένει μέχρι και σήμερα αρκετά περιορισμένη. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία ευελπιστεί να συνεισφέρει στην προσπάθεια διεύρυνσης των γνώσεών μας, προτείνοντας ένα ψυχοακουστικό πείραμα που έχει ως στόχο να εξετάσει την επίδραση της συστηματικής ακουστικής εκπαίδευσης στην αντίληψη του τονικού ύψους. Η βασική ιδέα του πειράματος είναι να προσομοιωθούν οι συνθήκες υπό τις οποίες ένας επαγγελματίας του ήχου επιδιώκει να βελτιώσει την ευαισθησία του στην αναγνώριση συχνότητας μέσω της καθημερινής εκπαίδευσης στον προσωπικό του χώρο, με τον εξοπλισμό που ήδη διαθέτει και που είναι εξοικειωμένος με την απόκρισή του. Άλλωστε, με αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιεί κανείς και τα προγράμματα εκπαίδευσης ακοής που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο. Βάσει λοιπόν των παραπάνω, σχεδιάσαμε ένα ψυχοακουστικό πείραμα με το οποίο θέλουμε να ελέγξουμε εάν μπορεί να βελτιωθεί η αναγνώριση της συχνότητας ενός ερεθίσματος, μέσα από την συστηματική εκπαίδευση του ακροατή με τα ηχητικά δείγματα που δημιουργήσαμε για το σκοπό αυτό. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, παρουσιάζονται αναλυτικά ο σχεδιασμός και τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος.



Εικόνα 3.1 *Στιγμιότυπο από την τελική δοκιμασία του πειράματος*

3.1 Μεθοδολογία

Η υπόθεση που θέλουμε να ελέγξουμε μέσω του πειράματος είναι εάν μπορεί να βελτιωθεί η ικανότητα αναγνώρισης συχνότητας των εκπαιδευόμενων ηχοληπτών μέσα από την καθημερινή εξάσκηση με καθαρούς τόνους. Οι καθαροί τόνοι προτιμήθηκαν για την διαδικασία της εκπαίδευσης επειδή αποτελούν την πιο απλή μορφή ήχου που μπορεί να προκαλέσει την αίσθηση του ύψους και ως εκ τούτου, θεωρήθηκαν οι πλέον κατάλληλοι για τον σχηματισμό της απαιτούμενης μακροπρόθεσμης μνήμης αναφοράς στην οποία οι συμμετέχοντες θα βασίζονται για τις εκτιμήσεις τους. Ωστόσο, για την διαδικασία της εξέτασης προτιμήθηκε η χρήση ροζ θορύβου, ο οποίος εξαιτίας των χαρακτηριστικών του αποτελεί την πιο ενδεδειγμένη προσομοίωση των πραγματικών ηχητικών συνθηκών που οι συμμετέχοντες θα κληθούν να αντιμετωπίσουν αργότερα ως επαγγελματίες. Ο ροζ θόρυβος σύμφωνα με τον ορισμό του ΕΛΟΤ (263.1/1.204), είναι ο θόρυβος που έχει συνεχές ηχητικό φάσμα με σταθερή ηχητική ισχύ σε κάθε φασματική ζώνη μεταβλητού ζωνικού εύρους. Το χαρακτηριστικό αυτού του τύπου θορύβου είναι ότι όταν το φάσμα του ληφθεί μέσω φίλτρων μεταβλητού εύρους (π.χ. φίλτρα οκτάβας, τριτοκτάβας κλπ.), οι τιμές των ζωνικών σταθμών παραμένουν σταθερές, λόγω του ότι το εύρος των φίλτρων αυξάνει με τη συχνότητα με ρυθμό αντίστροφο από ότι ελαττώνεται το τετράγωνο της RMS πίεσης.[78]

Το σετ συχνοτήτων που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι οι τριτοκτάβες, δηλαδή οι συχνότητες που προκύπτουν από την υποδιαίρεση του ακουστικού φάσματος σε 31 ζώνες με βήμα 1/3 της οκτάβας, όπως αυτές ορίζονται σύμφωνα με τα πρότυπα ISO και ANSI.[79] Οι τριτοκτάβες προτιμήθηκαν επειδή προσφέρουν μια αρκετά στενή ανάλυση του φάσματος, η οποία στην παρούσα φάση μας βοηθάει να εκτιμήσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια την επίδοση των συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας, που είναι και το ζητούμενο του πειράματος.

Η διάρκεια της εκπαίδευσης ορίστηκε στις δύο εβδομάδες, διάστημα που θεωρείται αρκετό για την εδραίωση (consolidation) μιας μακροπρόθεσμης μνήμης στον νεοφλοιό μέσω των νευροπλαστικών αλλαγών που προκαλούνται από την αντιληπτική μάθηση.[80] Αναλόγως, η διάρκεια της καθημερινής εξάσκησης ορίστηκε στα δέκα λεπτά, βάσει μιας πρόσφατης έρευνας της Molloy κ.ά.[81] που υποστηρίζει ότι σύντομες συνεδρίες (των περίπου οκτώ λεπτών) μεγιστοποιούν το αποτέλεσμα της μάθησης στα πρώτα στάδια της εκπαίδευσης.

Η επιλογή του δείγματος των συμμετεχόντων έγινε από το Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, επειδή θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικό του πληθυσμού στον οποίο θέλουμε να γενικεύσουμε τα αποτελέσματά μας. Ο τύπος του πειράματος που επιλέχθηκε να εφαρμοστεί είναι *μεταξύ των συμμετεχόντων* (within subjects), δηλαδή η λήψη δεδομένων από τα ίδια άτομα πριν και μετά την εκπαίδευση. Με αυτόν τον τρόπο, έχουμε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε άμεσα τυχόν μεταβολές στην επίδοση των συμμετεχόντων μέσω της σύγκρισης των αρχικών και των τελικών τους αποτελεσμάτων. Ωστόσο, θεωρήθηκε πιο ασφαλές να υπάρξει και μια ομάδα που δεν θα λάβει καθόλου εκπαίδευση, ώστε να χρησιμοποιηθεί ως αναφορά (reference) για την αντικειμενικότητα της σύγκρισης. Έτσι, αποφασίσαμε να χωρίσουμε το δείγμα των συμμετεχόντων σε δύο ομάδες, με τη μια να ορίζεται ως *πειραματική* (experimental group) και την άλλη ως *ελέγχου* (control group).

Τόσο η αρχική, όσο και η τελική εξέταση και των δύο ομάδων, αποφασίστηκε να διεξαχθεί στο στούντιο ηχοληψίας του τμήματος, λόγω της ηχομόνωσης του χώρου και της παροχής του απαραίτητου εξοπλισμού. Αντιθέτως, η εκπαίδευση της πειραματικής ομάδας αποφασίστηκε να λάβει χώρα στον προσωπικό χώρο του κάθε συμμετέχοντα με τη χρήση του δικού του εξοπλισμού. Επίσης, η παρουσίαση όλων των ηχητικών δειγμάτων ορίστηκε να γίνει με ακουστικά, προς αποφυγή της παρεμβολής των στοιχείων του χώρου στην ακουστική αντίληψη.

Τέλος, για τη συλλογή των δεδομένων προτιμήθηκε η χρήση ερωτηματολογίου με τη μορφή πολλαπλής επιλογής, στο οποίο οι συμμετέχοντες επιλέγουν τη συχνότητα που εκτιμούν ότι τους παρουσιάζεται κάθε φορά, με τις πιθανές απαντήσεις για κάθε δείγμα να είναι το σύνολο των τριτοκτάβων. Με αυτόν τον τρόπο αποκτάμε μια πιο σφαιρική άποψη για την επίδοσή τους, καθώς είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε ακόμα και την απόκλιση που μπορούν να παρουσιάσουν από τη σωστή απάντηση.

3.2 Συμμετέχοντες

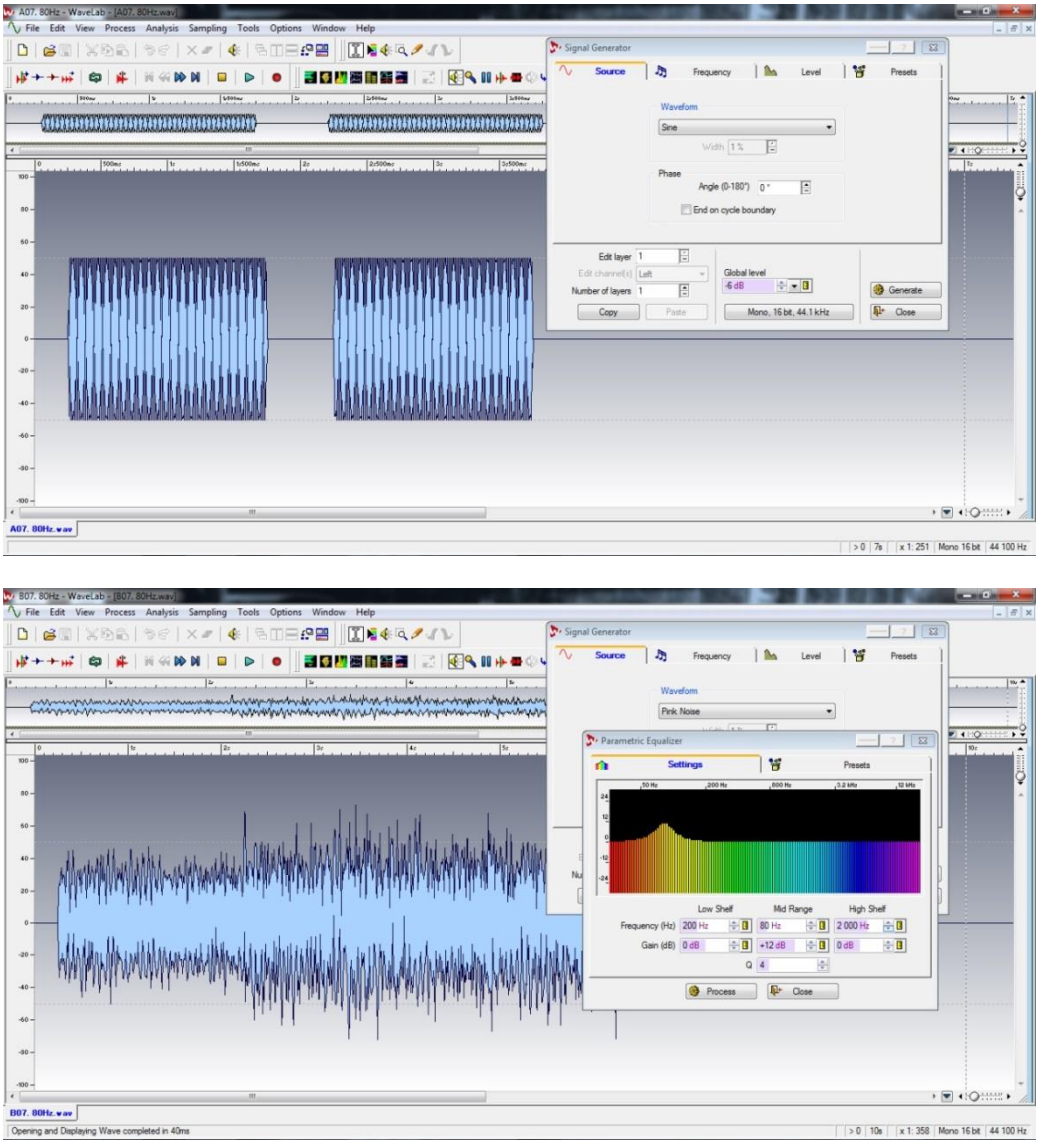
Δέκα σπουδαστές του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, ηλικίας από 22 έως 32 ετών (μ.ό. 27), έλαβαν μέρος στο πείραμα αφιλοκερδώς. Εξ αυτών, οι οκτώ ήταν άνδρες και οι δύο γυναίκες. Οι υποψήφιοι συγκεντρώθηκαν μέσω σχετικών ανακοινώσεων στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, ενώ τους έγινε προφορική ενημέρωση για το χρονοδιάγραμμα και τη διαδικασία του πειράματος πριν τους ζητηθεί να συμμετάσχουν. Η τελική επιλογή του δείγματος έγινε με κριτήριο τη διαθεσιμότητα και την επαγγελματική κλίση των ενδιαφερομένων. Όπως προκύπτει από τις ερωτήσεις που τους ζητήθηκε να απαντήσουν κατά τη συμπλήρωση της δήλωσης συμμετοχής, πέντε έχουν συμμετάσχει ξανά σε ψυχοακουστικό πείραμα, όλοι έχουν φυσιολογική ακοή, πέντε έχουν λάβει έστω ένα χρόνο μουσικής εκπαίδευσης εκτός σχολείου, κανείς δεν υποστηρίζει ότι έχει απόλυτη ακοή και τέσσερις έχουν χρησιμοποιήσει κάποιο πρόγραμμα εκπαίδευσης ακοής για ηχολήπτες στο παρελθόν.

3.3 Ηχητικά Δείγματα

Όλα τα ηχητικά δείγματα που χρησιμοποιήσαμε στο πείραμα δημιουργήθηκαν μέσω του προγράμματος *WaveLab* και είχαν τη μορφή μονοφωνικών αρχείων wav με 16 bit βάθος και 44,1 kHz συχνότητα δειγματοληψίας. Η στάθμη τους ορίστηκε στα -6 dB_{FS} για την αποφυγή παραμορφώσεων, ενώ οι συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000 και 20000 Hz. Για την εκπαίδευση της πειραματικής ομάδας δημιουργήθηκαν 31 ξεχωριστά αρχεία διάρκειας 7 sec το καθένα, τα οποία περιείχαν έναν καθαρό τόνο διάρκειας 1,5 sec της εκάστοτε συχνότητας που επαναλαμβανόταν μετά από ένα κενό των 500 msec. Αυτή η επανάληψη σύμφωνα με την Deutsch,[82] οδηγεί στην ενίσχυση του νευρωνικού ίχνους που αφήνει ένα ερέθισμα στην ακουστική μνήμη με αποτέλεσμα την διευκόλυνση της αναγνώρισής του. Σε όλα τα δείγματα προστέθηκε ένα κενό των 250 msec στην αρχή και ένα των 3,25 sec στο τέλος του κάθε αρχείου ώστε να γίνει ευκολότερη η ενσωμάτωσή τους σε λίστα αναπαραγωγής, ενώ

στους τόνους εφαρμόστηκε fade in και fade out των 10 msec για την εξομάλυνση της περιβάλλουσας.

Για την εξέταση των συμμετεχόντων δημιουργήθηκαν 32 ξεχωριστά αρχεία διάρκειας 10 sec το καθένα. Το πρώτο δείγμα ήταν ένα αρχείο με ροζ θόρυβο χωρίς καμία επέμβαση στο φάσμα του, από το οποίο στη συνέχεια δημιουργήθηκαν τα υπόλοιπα 31 με την εφαρμογή ενός παραμετρικού ισοσταθμιστή με Q=4 για την ενίσχυση κατά 12 dB της κεντρικής συχνότητας της εκάστοτε φασματικής ζώνης. Η διάρκεια του ερεθίσματος ήταν 6 sec, όπου στα πρώτα δύο ο θόρυβος παρουσιαζόταν ανεπεξέργαστος και στα υπόλοιπα τέσσερα με την ενίσχυση, ώστε να δίνεται η δυνατότητα στον ακροατή να αντιληφθεί τη μεταξύ τους διαφορά. Τέλος, όπως και στα δείγματα εκπαίδευσης, προστέθηκαν 250 msec σιωπής στην αρχή και 3,75 sec στο τέλος κάθε αρχείου για την ευκολότερη ενσωμάτωσή τους σε λίστα αναπαραγωγής στα πλαίσια της εξέτασης.



Εικόνα 3.2 *Στιγμιότυπο από τη δημιουργία των ηχητικών δειγμάτων. Πάνω απεικονίζεται το δείγμα εκπαίδευσης και κάτω το δείγμα εξέτασης για τη συχνότητα των 80 Hz*

3.4 Διαδικασία

Ζητήσαμε από τους εθελοντές να παρευρεθούν στις εγκαταστάσεις του Ιδρύματος μια ώρα πριν από την προγραμματισμένη έναρξη της αρχικής δοκιμασίας, ώστε να τους γίνει μια σχετική ενημέρωση για τον σκοπό, τη μεθοδολογία και τις απαιτήσεις του πειράματος στο οποίο δέχτηκαν να συμμετάσχουν. Αυτός ο χρόνος χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την ψυχολογική τους προσαρμογή στην πειραματική δοκιμασία που θα ακολουθούσε, μέσω της εξοικείωσης με τον χώρο, τη διαδικασία και τους υπόλοιπους εθελοντές. Παράλληλα, τους ζητήθηκε να φέρουν μαζί και τα ακουστικά που διέθετε ο καθένας, τα οποία θα διατηρούσαν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος για την ακρόαση των ηχητικών δειγμάτων.

Η αντιληπτική δοκιμασία χωρίστηκε σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, το οποίο διήρκεσε τριάντα λεπτά, προχωρήσαμε στην διεξαγωγή ενός αριθμού προκαταρκτικών δοκιμαστικών ώστε οι συμμετέχοντες να προσεγγίσουν την ασυμπτωτική τους επίδοση μέσα από τη διαδικαστική μάθηση. Σε αυτή τη φάση, τα ηχητικά δείγματα τους παρουσιάστηκαν με αύξουσα συχνοτική σειρά, ξεκινώντας από το δείγμα με τον ανεπεξέργαστο ροζ θόρυβο. Μετά το πέρας της προκαταρκτικής διαδικασίας προχωρήσαμε σε ένα διάλειμμα πέντε λεπτών και στη συνέχεια στο δεύτερο μέρος της δοκιμασίας το οποίο περιελάμβανε την εξέταση. Σε αυτή τη φάση, τους παρουσιάστηκαν άπαξ και σε τυχαία σειρά τα 30 από τα 32 συνολικά δείγματα που δημιουργήσαμε, τα οποία κλήθηκαν να αναγνωρίσουν και να σημειώσουν στα ειδικά ερωτηματολόγια που είχαν μπροστά τους. Οι συχνότητες που αποκλείστηκαν ήταν ο ανεπεξέργαστος θόρυβος και μια εκ των 20 και 20000 Hz για κάθε εξέταση.

Μετά το τέλος της εξέτασης, οι συμμετέχοντες χωρίστηκαν με κλήρωση στις δύο ομάδες του πειράματος. Οι εθελοντές που ανατέθηκαν στην ομάδα ελέγχου αποχώρησαν, ενώ οι εθελοντές που ανατέθηκαν στην πειραματική ομάδα παρέμειναν για περίπου δέκα λεπτά επιπλέον, ώστε να τους δοθούν οι απαραίτητες οδηγίες χρήσης των ηχητικών δειγμάτων εκπαίδευσης που θα έπαιρναν μαζί τους με τη μορφή CD. Η οδηγία που τους δόθηκε για την πρώτη εβδομάδα ήταν να προβούν στην ακρόαση των δειγμάτων με τη σειρά και παράλληλα να αντιστοιχίζουν το αντιλαμβανόμενο ερέθισμα με τη συχνότητα που αναγράφεται στο όνομα του κάθε αρχείου. Για τη δεύτερη εβδομάδα τους συστήθηκε να γίνει η ακρόαση των δειγμάτων με τυχαία σειρά και, πραγματοποιώντας *τυφλά τεστ*, να επιχειρούν την αναγνώρισή τους. Στους συμμετέχοντες τονίστηκε επίσης η ανάγκη να τηρούν αυστηρά την καθημερινή τους εκπαίδευση για το προβλεπόμενο χρονικό διάστημα, όπως και να αποφεύγουν την εξάσκηση πολύ νωρίς ή πολύ αργά μέσα στην ημέρα.

Δύο εβδομάδες αργότερα, καλέσαμε όλους τους συμμετέχοντες να επαναλάβουν την ίδια αντιληπτική δοκιμασία, στον ίδιο χώρο και με τον ίδιο εξοπλισμό, ώστε να καταγράψουμε την τελική τους επίδοση. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν πανομοιότυπη με την αρχική, εκτός από τη σειρά παρουσίασης των δειγμάτων εξέτασης που ήταν πάλι τυχαία, αλλά διαφορετική από την προηγούμενη φορά. Οι συμμετέχοντες διατήρησαν επίσης το ίδιο ζευγάρι ακουστικών για την αντικειμενικότητα της μέτρησης.

3.5 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος περιελάμβανε το CD player *CDR830 BurnIT Plus* της HHB για την αναπαραγωγή των ηχητικών δειγμάτων και τον προενισχυτή ακουστικών *PowerPlay PRO-XL HA4700* της Behringer για την διανομή του σήματος. Τα ακουστικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τέσσερα ζευγάρια BeyerDynamic *DT 770 Pro* (250 Ω), ένα BeyerDynamic *DT 291* (80 Ω), ένα Audio Technica *ATH-Pro 700 MK2* (68 Ω), ένα Stanton *Dj PRO 2000* (64 Ω), ένα AKG *K701* (62 Ω), ένα AKG *K77 Perception* (32 Ω) και ένα Sennheiser *HD205* (32 Ω).

3.6 Αποτελέσματα

Στην παράγραφο που ακολουθεί, παρουσιάζονται οπτικοποιημένα τα αποτελέσματα των συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας, όπως αυτά προέκυψαν από την αρχική (*pre-test*) και τελική (*post-test*) δοκιμασία στην οποία υποβλήθηκαν. Για την καλύτερη αποτίμηση της επίδοσής τους, τα αποτελέσματα χωρίστηκαν σε πέντε κατηγορίες: ακριβής αναγνώριση συχνότητας (*perfect match*), αναγνώριση με απόκλιση 1/3 της οκτάβας (*± 1/3 octave*), αναγνώριση με απόκλιση 2/3 της οκτάβας (*± 2/3 octave*), αναγνώριση με απόκλιση οκτάβας (*± octave*) και αποτυχία αναγνώρισης εντός οκτάβας (*fail*). Αντί των ονομάτων των εθελοντών που δεν αναγράφονται στους πίνακες για ευνόητους λόγους, χρησιμοποιείται ο όρος *subject* ακολουθούμενος από έναν αριθμό από το 1 έως το 10. Οι πέντε πρώτοι εθελοντές (subject 1, 2, 3, 4 και 5) αντιστοιχούν στην πειραματική ομάδα, ενώ οι πέντε τελευταίοι (subject 6, 7, 8, 9 και 10) αντιστοιχούν στην ομάδα ελέγχου.

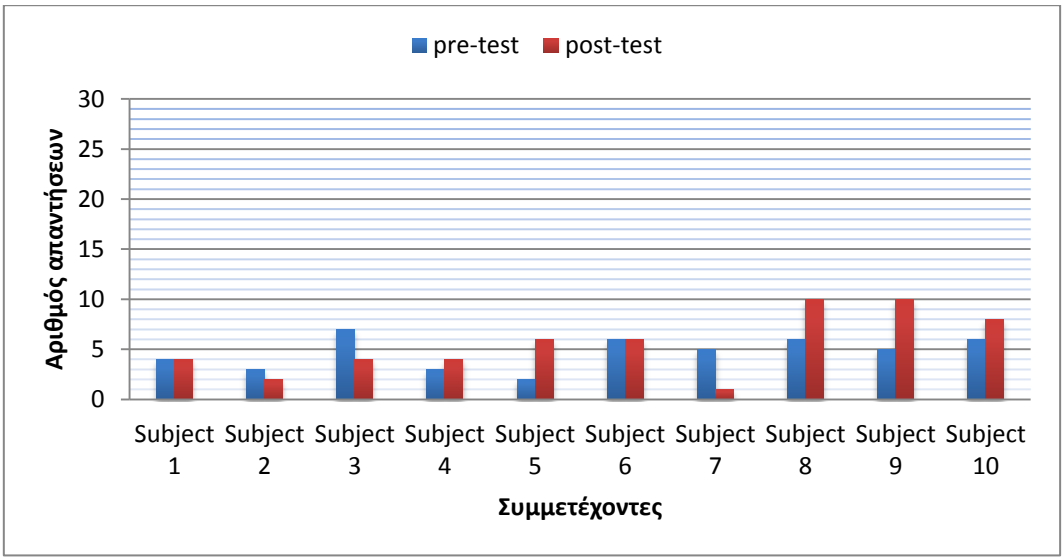
3.6.1 Επίδοση Συμμετεχόντων στην Ακριβή Αναγνώριση Συχνότητας

Η ακριβής αναγνώριση συχνότητας αναφέρεται στον αριθμό επιτυχημένων απαντήσεων των εθελοντών. Αυτό που παρατηρείται τόσο από την αρχική όσο και από την τελική δοκιμασία, είναι πως η πειραματική ομάδα εμφανίζει μικρότερα ποσοστά επιτυχιών σε σχέση με την ομάδα ελέγχου, όπως φαίνεται και από τον μέσο όρο της κάθε ομάδας. Η υψηλότερη επίδοση που σημειώνεται και από τις δύο ομάδες στην αρχική δοκιμασία είναι 7/30, η χαμηλότερη είναι 2/30 και η επικρατούσα είναι 6/30. Η υψηλότερη επίδοση στην τελική δοκιμασία είναι 10/30, η χαμηλότερη είναι 1/30 και η επικρατούσα είναι 4/30. Δύο άτομα της πειραματικής ομάδας παρουσίασαν βελτίωση μετά την εκπαίδευση, δύο παρουσίασαν επιδείνωση και ένας διατηρήθηκε στάσιμος. Ομοίως, τρεις εθελοντές της ομάδας ελέγχου παρουσίασαν βελτίωση, ένας επιδείνωση και ένας παρέμεινε αμετάβλητος. Ο μέσος όρος της επίδοσης της πειραματικής ομάδας αυξήθηκε κατά 5,3 %, ενώ της ομάδας ελέγχου κατά 25 %.

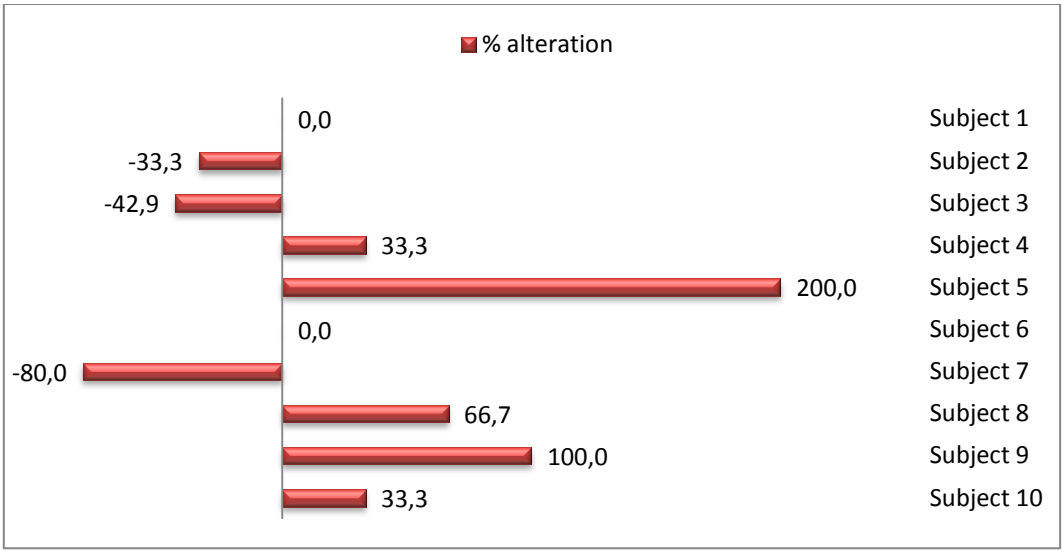
Πίνακας 1 *Αποτελέσματα συμμετεχόντων στην ακριβή αναγνώριση συχνότητας*

	subject 1	subject 2	subject 3	subject 4	subject 5	subject 6	subject 7	subject 8	subject 9	subject 10	exp grp mean	cntl grp mean
pre-test	4	3	7	3	2	6	5	6	5	6	3.8	5.6
post-test	4	2	4	4	6	6	1	10	10	8	4.0	7.0

Γραφική παράσταση 1.1 *Επίδοση συμμετεχόντων στην ακριβή αναγνώριση συχνότητας*



Γραφική παράσταση 1.2 *Ποσοστό μεταβολής της επίδοσης των συμμετεχόντων στην ακριβή αναγνώριση συχνότητας*



3.6.2 Επίδοση Συμμετεχόντων με Απόκλιση ± 1/3 της Οκτάβας

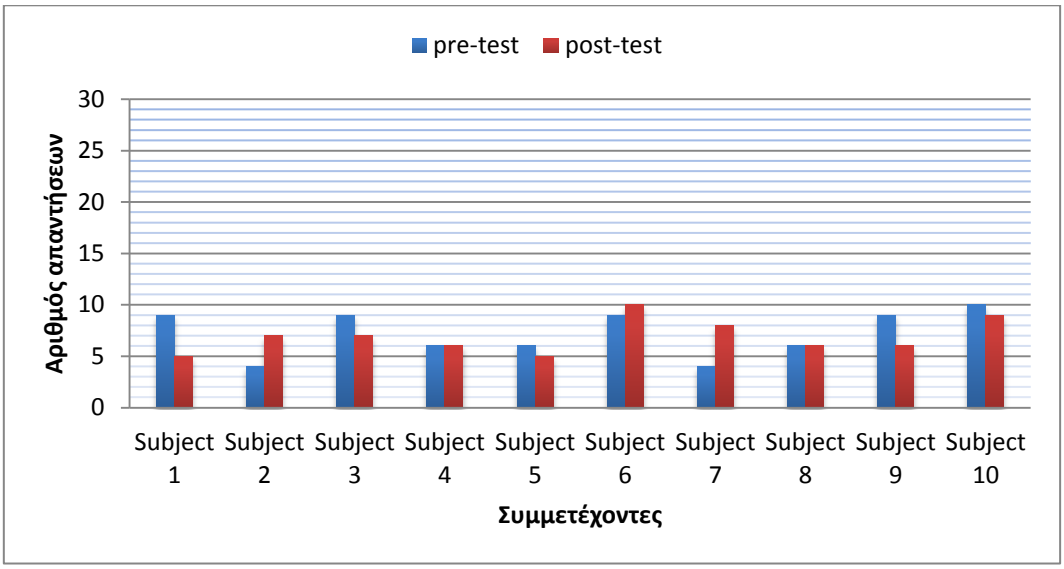
Αυτή η κατηγορία συγκεντρώνει τις απαντήσεις των συμμετεχόντων που είχαν απόκλιση ± 1/3 της οκτάβας από την συχνότητα που τους παρουσιάστηκε. Σε αυτή τη κατηγορία καταγράφεται ο υψηλότερος μέσος όρος των εθελοντών και των δύο ομάδων. Η καλύτερη επίδοση στην αρχική δοκιμασία από όλους τους συμμετέχοντες είναι 10/30, η χαμηλότερη είναι 4/30 και η επικρατούσα είναι 9/30. Αντιστοίχως, η καλύτερη επίδοση στην τελική δοκιμασία είναι 10/30, η χαμηλότερη είναι 5/30 και η επικρατούσα είναι 7/30. Ένας εθελοντής από την πειραματική ομάδα παρουσίασε βελτίωση σε αυτή τη κατηγορία, τρεις επιδεινώθηκαν και ένας παρέμεινε αμετάβλητος. Για την ομάδα ελέγχου, δύο βελτιώθηκαν,

δύο επιδεινώθηκαν και ένας δεν παρουσίασε μεταβολή. Ο μέσος όρος της πειραματικής ομάδας μειώθηκε κατά 11,8 %, ενώ της ομάδας ελέγχου αυξήθηκε κατά 2,6 %.

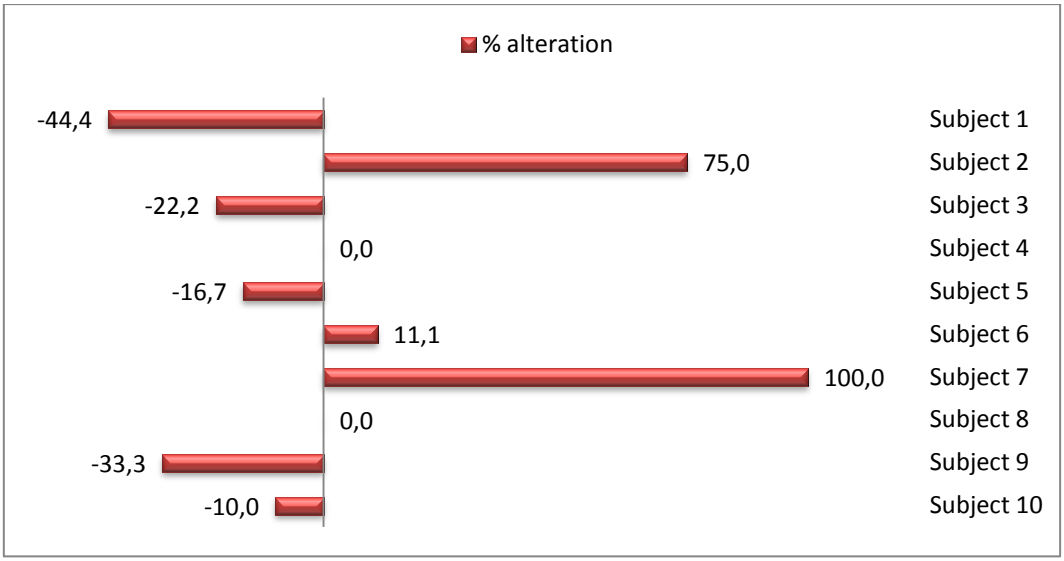
Πίνακας 2 *Αποτελέσματα συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 1/3 της οκτάβας*

	subject 1	subject 2	subject 3	subject 4	subject 5	subject 6	subject 7	subject 8	subject 9	subject 10	exp grp mean	cntl grp mean
pre-test	9	4	9	6	6	9	4	6	9	10	6.8	7.6
post-test	5	7	7	6	5	10	8	6	6	9	6.0	7.8

Γραφική παράσταση 2.1 *Επίδοση συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 1/3 της οκτάβας*



Γραφική παράσταση 2.2 *Ποσοστό μεταβολής της επίδοσης των συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 1/3 της οκτάβας*



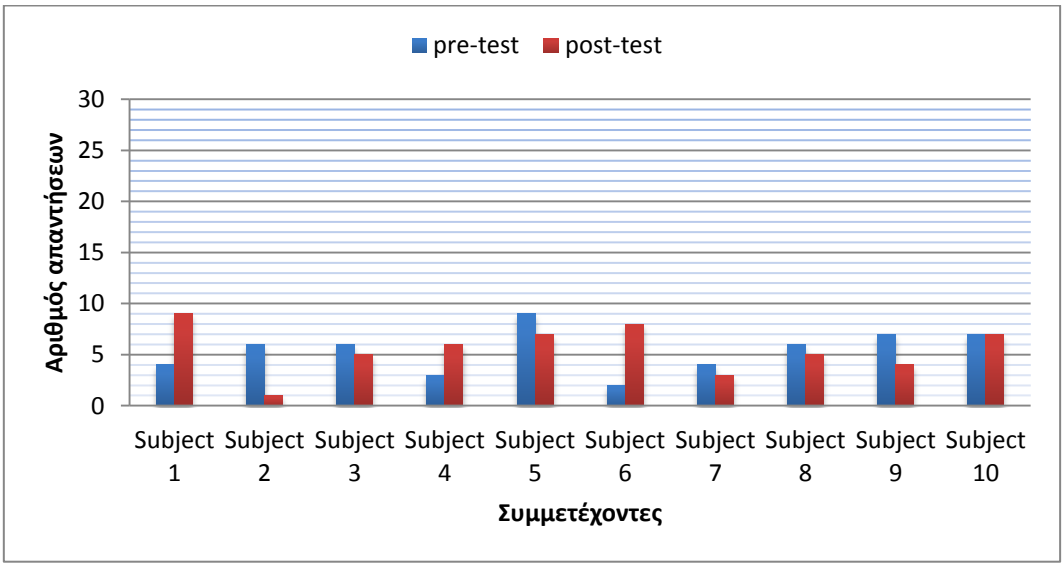
3.6.3 Επίδοση Συμμετεχόντων με Απόκλιση ± 2/3 της Οκτάβας

Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συμμετεχόντων που είχαν απόκλιση ± 2/3 της οκτάβας από την σωστή απάντηση. Αυτή η κατηγορία συγκεντρώνει το δεύτερο υψηλότερο μέσο όρο επιτυχιών και για τις δύο ομάδες. Η καλύτερη επίδοση που καταγράφεται στην αρχική δοκιμασία είναι 9/30, η χειρότερη είναι 2/30 και η επικρατούσα είναι 6/30. Ομοίως, η καλύτερη επίδοση στην τελική δοκιμασία είναι 9/30, η χειρότερη είναι 1/30, ενώ οι επικρατούσες τιμές είναι 5/30 και 7/30. Από την πειραματική ομάδα, δύο βελτιώθηκαν και τρεις επιδεινώθηκαν, ενώ από την ομάδα ελέγχου ένας βελτιώθηκε, τρεις επιδεινώθηκαν και ένας διατηρήθηκε στάσιμος. Ο μέσος όρος της πειραματικής ομάδας σε αυτή τη κατηγορία δεν μεταβλήθηκε, ενώ ο αντίστοιχος της ομάδας ελέγχου αυξήθηκε κατά 3,8 %.

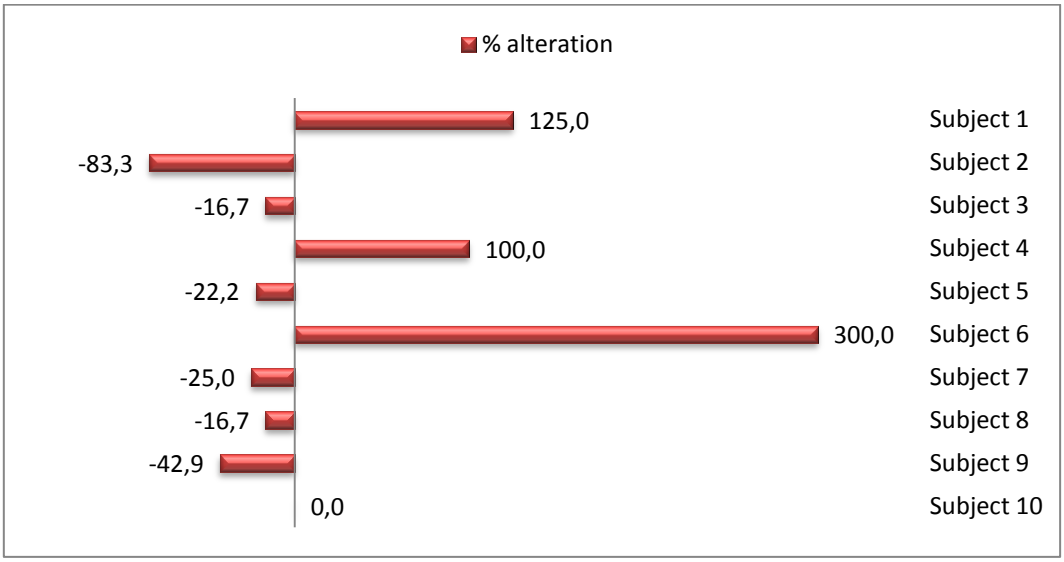
Πίνακας 3 *Αποτελέσματα συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 2/3 της οκτάβας*

	subject 1	subject 2	subject 3	subject 4	subject 5	subject 6	subject 7	subject 8	subject 9	subject 10	exp grp mean	cntl grp mean
pre-test	4	6	6	3	9	2	4	6	7	7	5.6	5.2
post-test	9	1	5	6	7	8	3	5	4	7	5.6	5.4

Γραφική παράσταση 3.1 *Επίδοση συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 2/3 της οκτάβας*



Γραφική παράσταση 3.2 *Ποσοστό μεταβολής της επίδοσης των συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 2/3 της οκτάβας*



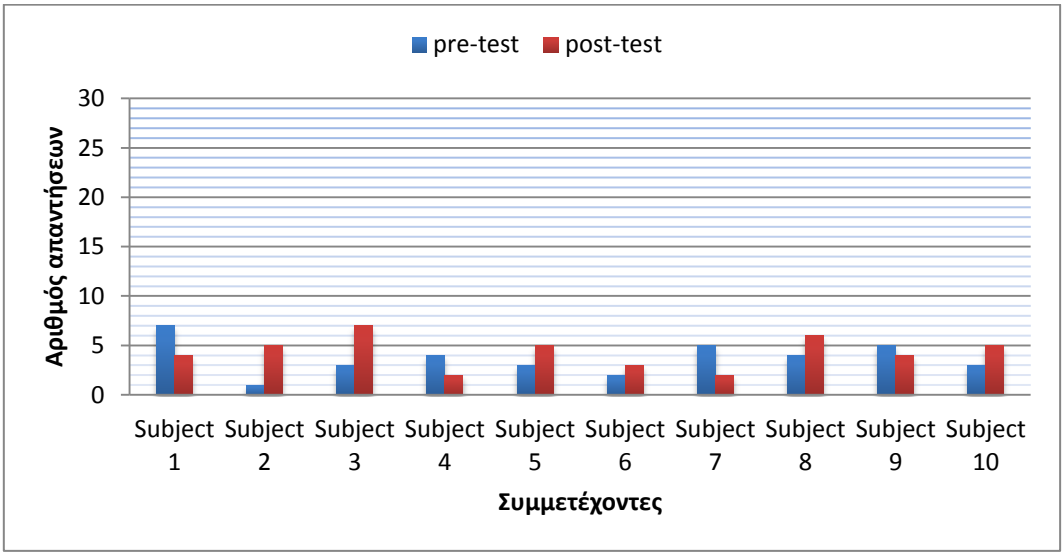
3.6.4 Επίδοση Συμμετεχόντων με Απόκλιση ± Οκτάβας

Σε αυτή τη κατηγορία συγκαταλέγονται όλες οι εκτιμήσεις των συμμετεχόντων που έπεσαν έξω κατά ± μια οκτάβα. Όπως παρατηρείται, η επίδοση των συμμετεχόντων και των δύο ομάδων κυμάνθηκε στα ίδια περίπου επίπεδα. Η υψηλότερη τιμή που καταγράφεται στην αρχική δοκιμασία είναι 7/30 ενώ η χαμηλότερη είναι 1/30, με την επικρατούσα να είναι 3/30. Αντίστοιχα, στην τελική δοκιμασία η υψηλότερη τιμή είναι 7/30, η χαμηλότερη είναι 2/30 και η επικρατούσα είναι 5/30. Τρεις εθελοντές από κάθε ομάδα βελτιώθηκαν και δύο επιδεινώθηκαν, με το μέσο όρο της πειραματικής να αυξάνεται κατά 27,8 % και της ελέγχου κατά 5,3 %.

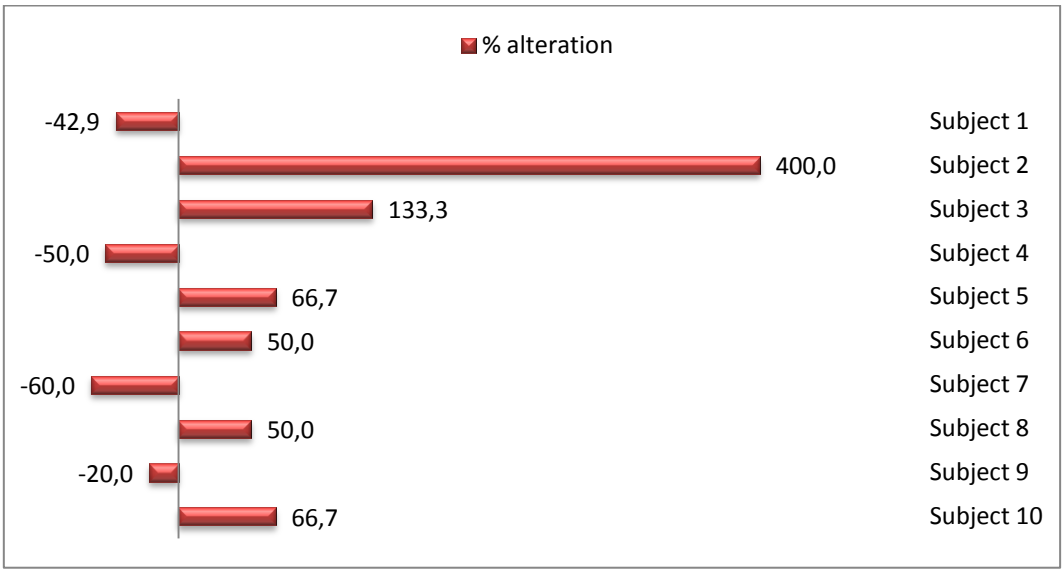
Πίνακας 4 *Αποτελέσματα συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± οκτάβας*

	subject 1	subject 2	subject 3	subject 4	subject 5	subject 6	subject 7	subject 8	subject 9	subject 10	exp grp mean	cntl grp mean
pre-test	7	1	3	4	3	2	5	4	5	3	3.6	3.8
post-test	4	5	7	2	5	3	2	6	4	5	4.6	4.0

Γραφική παράσταση 4.1 *Επίδοση συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± οκτάβας*



Γραφική παράσταση 4.2 *Ποσοστό μεταβολής της επίδοσης των συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± οκτάβας*



3.6.5 Αποτυχία Αναγνώρισης Συχνοτήτων Εντός Οκτάβας

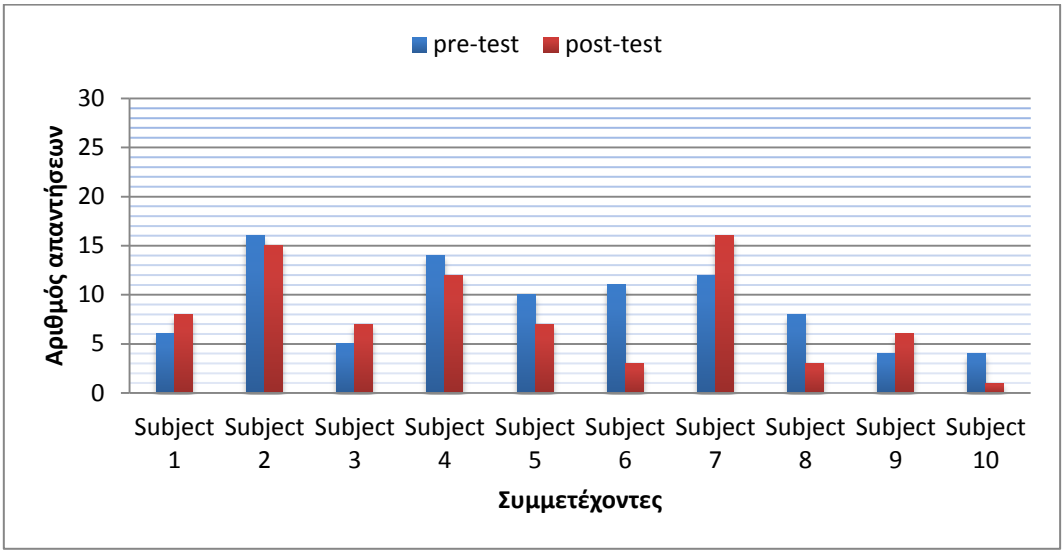
Στην πέμπτη και τελευταία κατηγορία, συγκαταλέγονται όλες οι απαντήσεις των εθελοντών που βρίσκονται περισσότερο από μια οκτάβα μακριά από τη συχνότητα που τους παρουσιάστηκε. Ουσιαστικά, αυτή η κατηγορία καλύπτει το υπόλοιπο των απαντήσεων που δεν αντιστοιχούν σε κάποια από τις προηγούμενες κατηγορίες και λειτουργεί συμπληρωματικά ως προς αυτές. Το υψηλότερο ποσοστό αποτυχίας που εμφανίζεται στην αρχική δοκιμασία είναι 16/30 ενώ το χαμηλότερο είναι 4/30, το οποίο αποτελεί και την επικρατούσα τιμή. Αντιστοίχως, στην τελική δοκιμασία το υψηλότερο ποσοστό αποτυχίας είναι 16/30, το χαμηλότερο είναι 1/30, ενώ από δύο φορές εμφανίζονται τα 3/30 και 7/30.

Το ποσοστό αποτυχίας για δύο άτομα από κάθε ομάδα αυξήθηκε, ενώ για τρία μειώθηκε. Η συνολική μεταβολή ήταν -3,9 % για την πειραματική ομάδα και -25,6 % για την ομάδα ελέγχου.

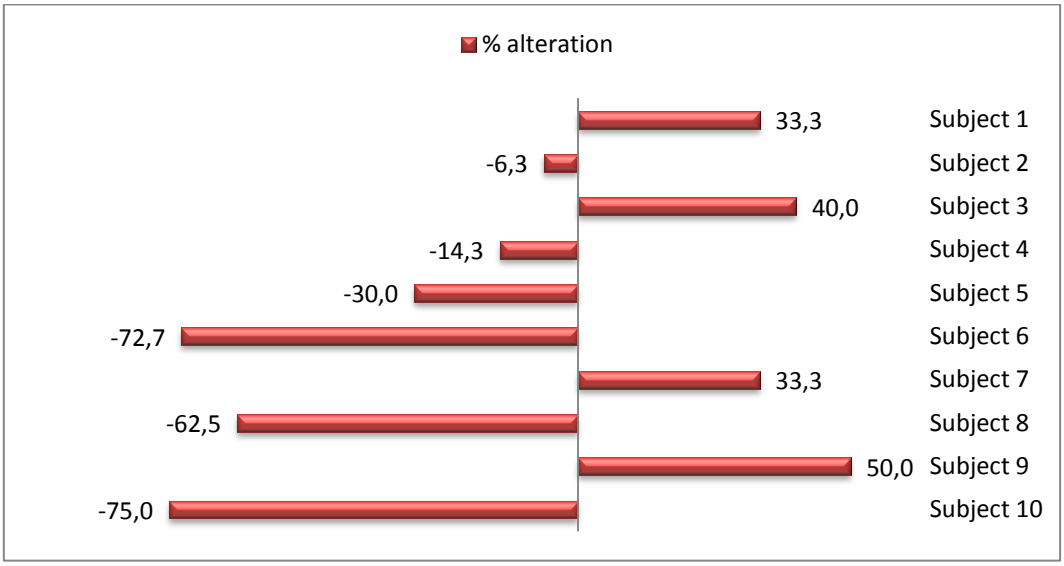
Πίνακας 5 *Αποτελέσματα συμμετεχόντων στην αποτυχία αναγνώρισης συχνότητας εντός οκτάβας*

	subject 1	subject 2	subject 3	subject 4	subject 5	subject 6	subject 7	subject 8	subject 9	subject 10	exp grp mean	cntl grp mean
pre-test	6	16	5	14	10	11	12	8	4	4	10.2	7.8
post-test	8	15	7	12	7	3	16	3	6	1	9.8	5.8

Γραφική παράσταση 5.1 *Επίδοση συμμετεχόντων στην αποτυχία αναγνώρισης συχνότητας εντός οκτάβας*



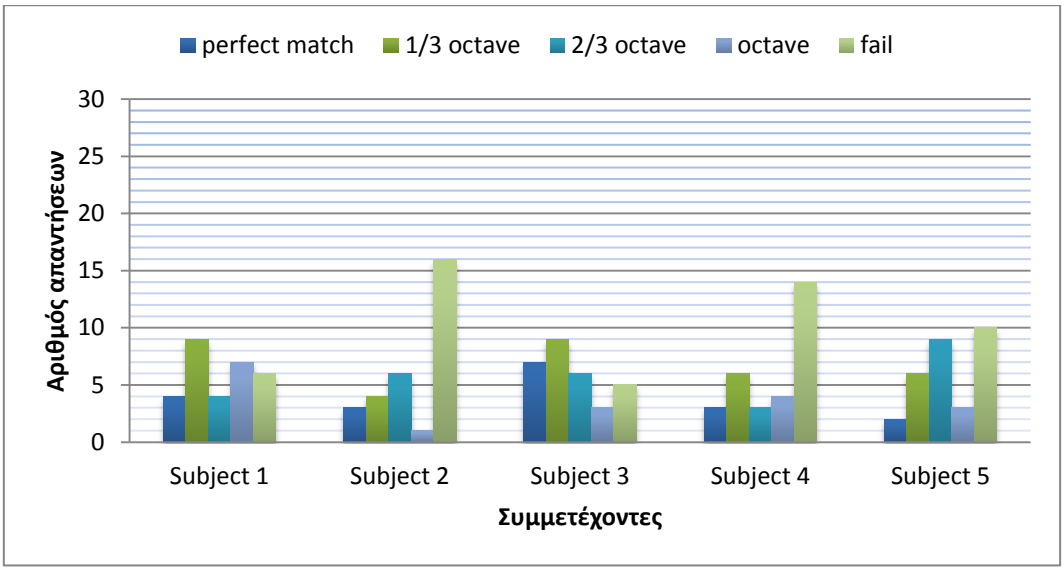
Γραφική παράσταση 5.2 *Ποσοστό μεταβολής της αποτυχίας των συμμετεχόντων στην αναγνώριση συχνότητας εντός οκτάβας*

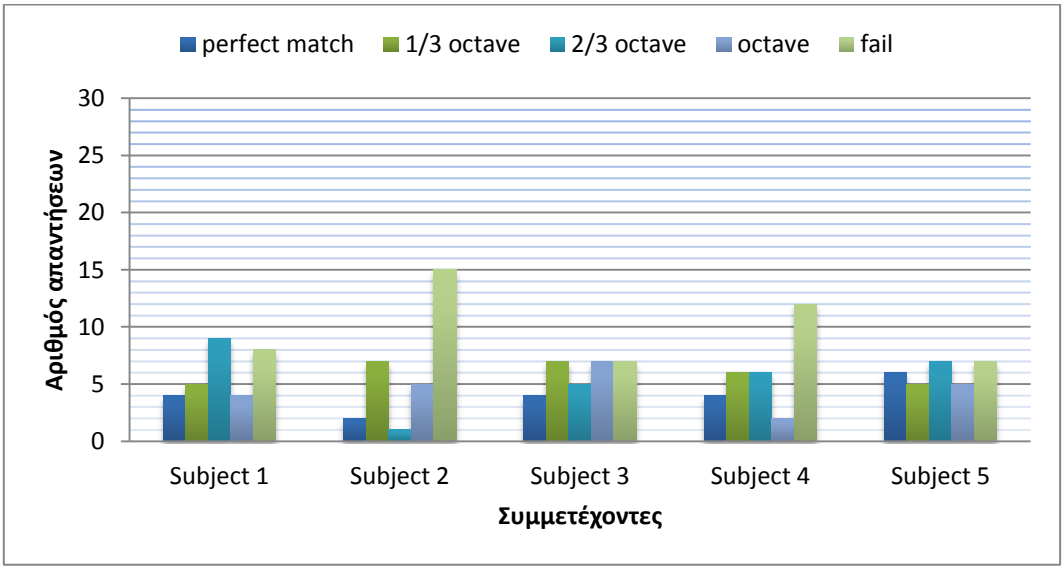


3.6.6 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

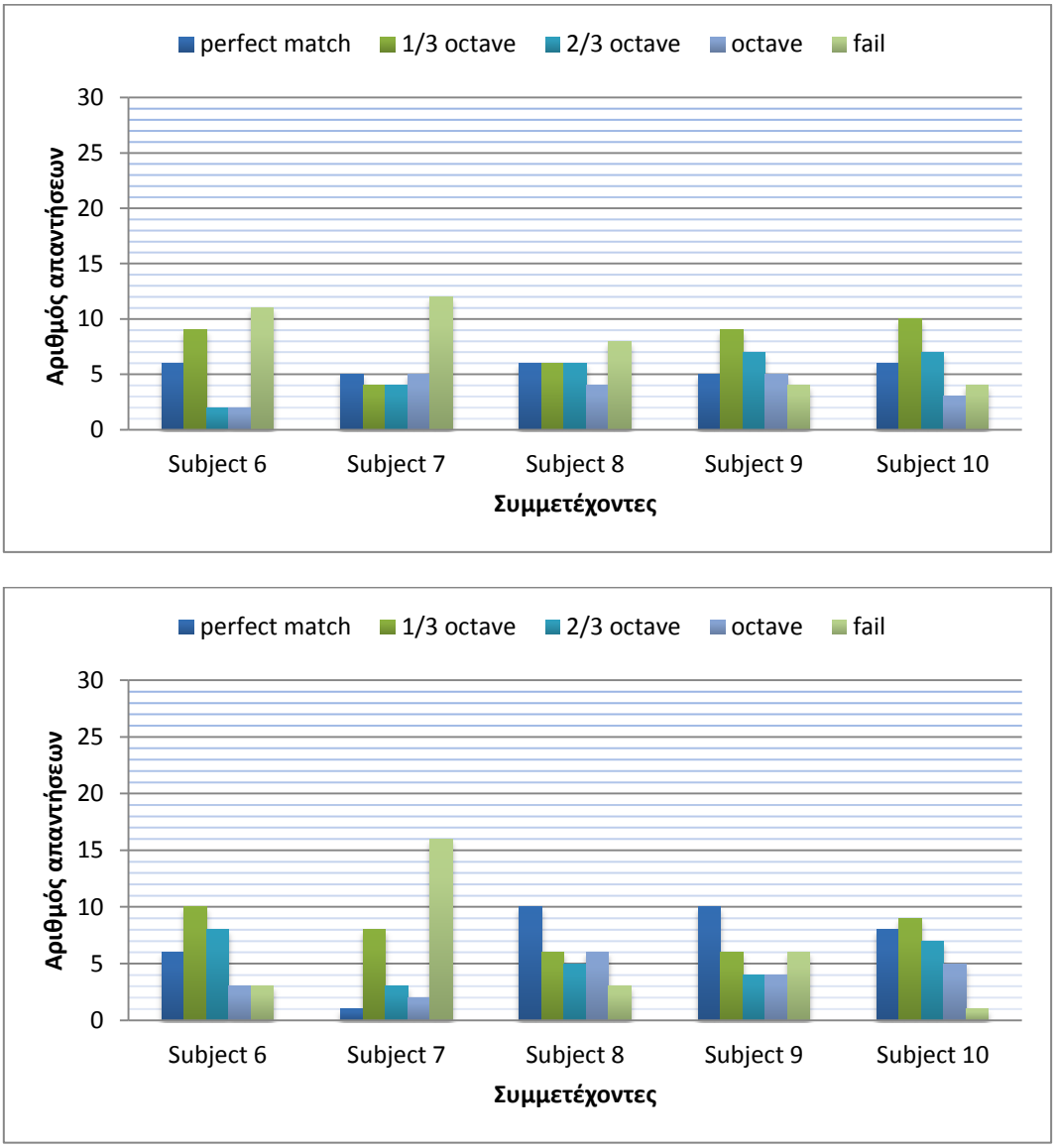
Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα όλων των κατηγοριών ανά συμμετέχοντα, χωρισμένα στην αρχική και στην τελική δοκιμασία. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εμφανής η όποια μεταβολή στην συνολική επίδοση των εθελοντών εξαιτίας της εκπαίδευσης, ενώ στο τέλος της παραγράφου παρουσιάζεται και η διακύμανση του μέσου όρου κάθε κατηγορίας για την εκτίμηση του μεγέθους της μεταβολής της.

Γραφική παράσταση 6.1 *Κατανομή των απαντήσεων της πειραματικής ομάδας κατά την αρχική (πάνω) και τελική (κάτω) δοκιμασία*

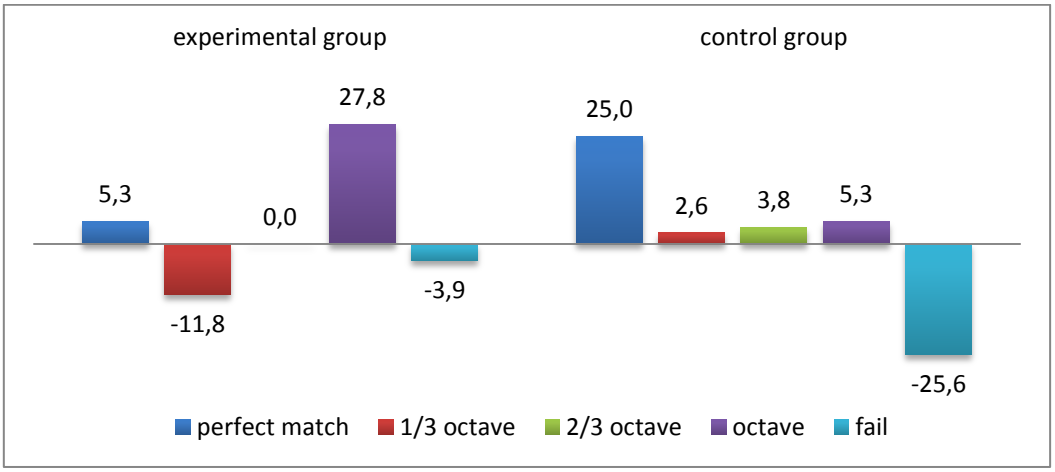




Γραφική παράσταση 6.2 *Κατανομή των απαντήσεων της ομάδας ελέγχου κατά την αρχική (πάνω) και τελική (κάτω) δοκιμασία*



Γραφική παράσταση 6.3 *Ποσοστό μεταβολής (%) του μέσου όρου κάθε ομάδας για την εκάστοτε κατηγορία*



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Από τα αποτελέσματα του πειράματος παρατηρούμε ότι α) η επίδοση και των δύο ομάδων στην ακριβή αναγνώριση συχνότητας κυμάνθηκε γενικά σε αρκετά χαμηλά επίπεδα, β) η επίδοση της πειραματικής ομάδας τόσο πριν, όσο και μετά την εκπαίδευση παρέμεινε χαμηλότερη από την αντίστοιχη της ομάδας ελέγχου, γ) η ομάδα ελέγχου για την ίδια κατηγορία παρουσίασε εμφανή βελτίωση στα αποτελέσματά της αν και δεν έλαβε καθόλου εκπαίδευση, και δ) όλοι οι συμμετέχοντες παρουσίασαν μια τάση λανθασμένης εκτίμησης της συχνότητας κατά ± 1/3 της οκτάβας, με το δεύτερο σε συχνότητα λάθος να είναι ± 2/3 της οκτάβας. Κρίνοντας από τον μέσο όρο της εκάστοτε κατηγορίας, η πειραματική ομάδα δεν παρουσίασε κάποια αξιόλογη μεταβολή στην ακριβή αναγνώριση συχνότητας μετά την εκπαίδευση, ενώ καθόλου δεν διαφοροποιήθηκε το ποσοστό αναγνώρισης συχνότητας με απόκλιση ± 2/3 της οκτάβας. Ωστόσο, καταγράφηκε μείωση στην αναγνώριση συχνότητας με απόκλιση ± 1/3 της οκτάβας και αισθητή αύξηση στην αναγνώριση με σφάλμα ± μιας οκτάβας. Το ποσοστό των απαντήσεων εκτός οκτάβας μειώθηκε ελάχιστα, παραμένοντας ωστόσο το υψηλότερο από όλα. Αντιθέτως, η ομάδα ελέγχου εμφανίζει μια σημαντική αύξηση της επίδοσης στην ακριβή αναγνώριση συχνότητας και μια σημαντική μείωση στην αποτυχία αναγνώρισης συχνότητας εντός οκτάβας, με τις υπόλοιπες κατηγορίες να καταγράφουν μια μικρή αύξηση.

Η γενικότερη χαμηλή επίδοση των συμμετεχόντων στην ακριβή αναγνώριση συχνότητας δηλώνει ξεκάθαρα την αδυναμία τους να εκτιμήσουν με σχετική ακρίβεια την κεντρική συχνότητα μιας στενής φασματικής ζώνης ενός σύνθετου ερεθίσματος. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της αρχικής και της τελικής δοκιμασίας, μπορούμε να πούμε ότι τουλάχιστον για την πειραματική ομάδα, η εκπαίδευση δεν έδειξε να συνδράμει σημαντικά στη βελτίωση της εν λόγω επίδοσής τους. Ωστόσο, η αντίστοιχη βελτίωση που κατέγραψε η ομάδα ελέγχου η οποία δεν έλαβε καθόλου εκπαίδευση, είναι πολύ πιθανόν να οφείλεται στην επίδραση της διαδικαστικής μάθησης. Ενθαρρυντικό είναι το γεγονός ότι τα ποσοστά αναγνώρισης με απόκλιση ± 1/3 της οκτάβας είναι αρκετά υψηλά για όλους τους εθελοντές πριν και μετά την εκπαίδευση, κάτι που σημαίνει ότι οι εκτιμήσεις τους είναι αρκετά κοντά στην πραγματική συχνότητα που τους παρουσιάστηκε. Το επόμενο σε συχνότητα εμφάνισης σφάλμα εκτίμησης είναι ± 2/3 της οκτάβας και μετά ακολουθεί η απόκλιση ± οκτάβας, της οποίας το ποσοστό είναι άμεσα συγκρίσιμο με το αντίστοιχο της ακριβούς αναγνώρισης συχνότητας. Ωστόσο, η ευρύτερη κατανομή των αποτελεσμάτων της αρχικής και της τελικής δοκιμασίας στις παραπάνω κατηγορίες, δεν μας επιτρέπει την εξαγωγή ενός ασφαλούς συμπεράσματος όσον αφορά την επίδραση της εκπαίδευσης στην επίδοση της πειραματικής ομάδας, ενώ η άποψη αυτή ενισχύεται και από την επίδοση της ομάδας ελέγχου, η οποία όπως φαίνεται παρουσιάζει μια μετατόπιση του ποσοστού αποτυχημένης αναγνώρισης εντός οκτάβας προς την ακριβή αναγνώριση συχνοτήτων παρά την απουσία εκπαίδευσης.

Για τον στατιστικό έλεγχο της υπόθεσης τους πειράματός μας, προχωρήσαμε στη σύγκριση των μέσων τιμών της επίδοσης των συμμετεχόντων με τη μέθοδο *Student's t test*, μέσω δίπλευρου ελέγχου (two tailed) για ζευγαρωτές (paired) τιμές δεδομένων. Το Student's t

test είναι μια πολύ συνηθισμένη μέθοδος στατιστικής επεξεργασίας που ακολουθείται σε ανάλογες έρευνες και ενδείκνυται για τις περιπτώσεις όπου έχουμε ένα μικρό δείγμα συμμετεχόντων, του οποίου τα αποτελέσματα θέλουμε να γενικεύσουμε στον ευρύτερο πληθυσμό λαμβάνοντας υπόψιν και τα τυχαία σφάλματα που μπορεί να επηρεάζουν τις μετρήσεις μας. Η μέθοδος βασίζεται στην αποδοχή ή την απόρριψη της *μηδενικής υπόθεσης* (null hypothesis), η οποία εξ ορισμού υποθέτει ότι οι δύο παράμετροι προς σύγκριση δεν διαφέρουν μεταξύ τους, ως προς το ποσοτικό μέγεθος, περισσότερο από όσο επιτρέπει η τυχαία δειγματοληψία. Στην περίπτωσή μας, η αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης θα οδηγούσε στο συμπέρασμα πως δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στην επίδοση των συμμετεχόντων μετά την εκπαίδευση. Εάν απορριφθεί η μηδενική υπόθεση, τότε αποδεχόμαστε την *εναλλακτική υπόθεση* (alternative hypothesis), η οποία στην περίπτωσή μας θα επιβεβαίωνε ότι η εκπαίδευση των εθελοντών οδήγησε στη μεταβολή της επίδοσής τους. Η απόφαση για την αποδοχή ή απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης γίνεται βάσει πιθανοτήτων και καθορίζεται από την *τιμή p* (p value) που μας δείχνει πόσες πιθανότητες υπάρχουν να λάβουμε μια τιμή τόσο ακραία ή περισσότερο ακραία από την πραγματική τιμή, όταν η μηδενική υπόθεση είναι αληθής. Η τιμή p προκύπτει από τον μετασχηματισμό του αποτελέσματος της συνάρτησης t, η οποία συνυπολογίζει την τυπική απόκλιση των τιμών και το μέγεθος του δείγματος.

Από τον στατιστικό έλεγχο των δεδομένων, προκύπτει ότι ο μέσος όρος της επίδοσης της πειραματικής ομάδας σε όλες τις κατηγορίες πριν και μετά την εκπαίδευση δεν παρουσιάζει στατιστικά σημαντική μεταβολή (*ακριβής αναγνώριση*: t=-0,173, df=4, p=0,871, *± 1/3 οκτάβας*: t=0,691, df=4, p=0,528, *± 2/3 οκτάβας*: t=0,000, df=4, p=1,000, *± οκτάβας*: t=-0,674, df=4, p=0,537, *αποτυχία αναγνώρισης*: t=0,389, df=4, p=0,717). Το ίδιο επίσης ισχύει και για τα αποτελέσματα της ομάδας ελέγχου (*ακριβής αναγνώριση*: t=-0,875, df=4, p=0,431, *± 1/3 οκτάβας*: t=-0,173, df=4, p=0,871, *± 2/3 οκτάβας*: t=-0,131, df=4, p=0,902, *± οκτάβας*: t=-0,206, df=4, p=0,847, *αποτυχία αναγνώρισης*: t=0,904, df=4, p=0,417). Βάσει λοιπόν των παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχουν αρκετές ενδείξεις για την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης.

Ωστόσο, οφείλουμε να λάβουμε υπόψη μας και τους παράγοντες που ενδεχομένως να επηρέασαν τα αποτελέσματά μας. Ένας από τους βασικότερους είναι και το μέγεθος του δείγματος, το οποίο είναι σαφώς μικρότερο από το ελάχιστο προτεινόμενο (n≥30). Ο κίνδυνος που παρουσιάζει η εξέταση ενός μικρού δείγματος σε μια αντιληπτική δοκιμασία είναι η αύξηση του στατιστικού σφάλματος των μετρήσεων και κατά συνέπεια, η εξαγωγή μη αξιόπιστων συμπερασμάτων. Σημαντικό ρόλο επίσης έπαιξε η ακαταλληλότητα των εγκαταστάσεων του Ιδρύματος για ψυχοακουστικά πειράματα. Λόγω της απουσίας εξειδικευμένου εξοπλισμού, διάφοροι παράγοντες όπως η απόδοση των ακουστικών ή η ένταση του ήχου κατά την παρουσίαση, πιθανόν να αλλοίωσαν την αντιληπτική ικανότητα των συμμετεχόντων. Ένας ακόμα παράγοντας που πρέπει να συνεκτιμήσουμε στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μας, είναι η αυτοπειθαρχία των εθελοντών στην εκτέλεση της εκπαιδευτικής διαδικασίας με τον τρόπο που τους συστήθηκε να πραγματοποιηθεί. Όπως προκύπτει από σχετικές ερωτήσεις μετά το πέρας της τελικής δοκιμασίας, όλοι οι συμμετέχοντες της πειραματικής ομάδας έχασαν από τουλάχιστον μια μέρα εκπαίδευσης στο σπίτι, με το μέγιστο για έναν εθελοντή να είναι οκτώ μέρες. Κάτι τέτοιο, όπως είναι φυσικό, καθιστά την όλη διαδικασία εκπαίδευσης διαβλητή. Άλλες πιθανές αιτίες που

μπορεί να συντέλεσαν στον επηρεασμό των αποτελεσμάτων συμπεριλαμβάνουν τις προδιαγραφές των ακουστικών που χρησιμοποιήθηκαν από τους συμμετέχοντες για την ακρόαση των ηχητικών δειγμάτων, τα οποία εξαιτίας της μέτριας συχνοτικής τους απόκρισης δεν ενδείκνυνται για αυτή τη χρήση, καθώς επίσης και το προσωπικό ενδιαφέρον που επέδειξαν οι εθελοντές, το οποίο μπορεί να τους έκανε να μην αποδώσουν σύμφωνα με τις πραγματικές τους δυνατότητες, είτε λόγω αδιαφορίας, είτε λόγω άγχους για την επίτευξη υψηλής βαθμολογίας. Έτσι λοιπόν, μετά και από τους περιορισμούς της έρευνας που αναφέρθηκαν πιο πάνω, το γενικό συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε είναι ότι, βάσει της ένδειξης που έχουμε από το δείγμα μας, δεν μπορούμε να απορρίψουμε τη μηδενική υπόθεση αλλά ούτε και να την αποδεχτούμε.

Τα παραπάνω προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν, θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη στο ενδεχόμενο μελλοντικής επανάληψης του πειράματος για πιο ακριβή αποτελέσματα. Η πρόταση που κάνουμε είναι να επανεκτιμηθεί ο πειραματικός σχεδιασμός ώστε να προβλέπει περισσότερους συμμετέχοντες, για περισσότερο χρόνο, σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις και με απόλυτο έλεγχο της διαδικασίας εκπαίδευσης, με σκοπό να περιοριστούν κατά το δυνατόν οι αστάθμητοι παράγοντες που μπορούν να αλλοιώσουν τα αποτελέσματα του πειράματος. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει το ενδεχόμενο να συμπεριληφθούν ενδιάμεσες δοκιμασίες ώστε να είμαστε σε θέση να κρίνουμε την πρόοδο των συμμετεχόντων σε βάθος χρόνου, όπως και το να εξετασθεί εάν παρουσιάζει διαφορά η εκπαίδευση με τη χρήση καθαρών τόνων ή δειγμάτων ροζ θορύβου παρόμοιων με αυτών που χρησιμοποιήθηκαν για την εξέτασή τους. Σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, η παρούσα έρευνα θα μπορούσε να επεκταθεί και στα υπόλοιπα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου όπως η ακουστότητα και η χροιά, διερευνώντας το εφικτό της εκπαίδευσής τους μέσω μιας παρεμφερούς διαδικασίας. Τέλος, πιστεύουμε ότι το αντικείμενο αυτής της εργασίας θα μπορούσε να εξελιχθεί κάλλιστα σε μια εφαρμογή προγραμματιστικού περιβάλλοντος για την εκπαίδευση ακοής των εκπαιδευομένων μηχανικών ήχου, κάτι που προτείνουμε ως θέμα πτυχιακής εργασίας προς μελλοντική ανάθεση.

Κλείνοντας αυτή την εργασία, ευελπιστούμε πως τα όσα παρουσιάσαμε μέχρι τώρα θα αποτελέσουν ένα κίνητρο για την περαιτέρω ενασχόληση των ενδιαφερομένων με τη μελέτη της ακουστικής αντίληψης, παρά το γεγονός ότι η έρευνα πάνω στο αντικείμενο παραμένει μέχρι και σήμερα περιορισμένη. Ωστόσο, πιστεύουμε πως η ολοένα αυξανόμενη πρόοδος της Ψυχοακουστικής και της Γνωσιακής Επιστήμης θα μας αποκαλύψει σύντομα τα μυστικά που κρύβει ο ανθρώπινος εγκέφαλος σχετικά με τους μηχανισμούς που εμπλέκονται στην κωδικοποίηση, την επεξεργασία και την αποθήκευση μιας ηχητικής πληροφορίας, δημιουργώντας έτσι το κατάλληλο υπόβαθρο για την ανάπτυξη νέων μεθόδων και προγραμμάτων εκπαίδευσης που θα έχουν άμεση επίδραση στο σημαντικότερο εργαλείο που έχει ένας ηχολήπτης στη δουλειά του: την ακοή του.

ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

[1] http://en.wikibooks.org/wiki/Engineering_Acoustics/Conductive_Mechanisms_of_Hearing#Pinna (ανακτήθηκε: 26/07/2013)

[2] http://en.wikibooks.org/wiki/Sensory_Systems/Auditory_System#Sound_reception_at_the_pinna (ανακτήθηκε: 26/07/2013)

[3] Νίκος Παπαδάκης, *Στοιχεία Ψυχοακουστικής (5η έκδοση)*, ΤΕΙ Κρήτης: Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, 2009, σελ. 10

[4] http://en.wikibooks.org/wiki/Engineering_Acoustics/Conductive_Mechanisms_of_Hearing#Tympanic_membrane (ανακτήθηκε: 26/07/2013)

[5] http://en.wikibooks.org/wiki/Engineering_Acoustics/Conductive_Mechanisms_of_Hearing#Ossicular_Chain (ανακτήθηκε: 26/07/2013)

[6] F. Alton Everest, Ken C. Pohlmann, *Master Handbook of Acoustics (5th edition)*, McGraw-Hill, 2009, p. 43

[7] Arthur C. Guyton, John E. Hall, *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology (11th edition)*, Elsevier, 2006, p. 652

[8] Yehoash Raphael, Richard A. Altschuler, "Structure and Innervation of the Cochlea", *Brain Res Bull 60(5-6):397-422*, Elsevier, 2003

[9] Νίκος Παπαδάκης, *Στοιχεία Ψυχοακουστικής (5η έκδοση)*, ΤΕΙ Κρήτης: Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, 2009, σελ. 42

[10] Christopher J. Plack, Robert P. Carlyon, "Loudness Perception and Intensity Coding". In: Brian C. J. Moore (Ed), *Hearing: Handbook of Perception and Cognition (2nd edition)*, Academic Press, 1995, p. 135

[11] Birger Kollmeier, Thomas Brand, Bernd Meyer, "Perception of Speech and Sound". In: Jacob Benesty, M. Mohan Sondhi, Yiteng Huang (Eds), *Springer Handbook of Speech Processing*, Springer, 2008, p. 63

[12] Jan Schnupp, Israel Nelken, Andrew J. King, *Auditory Neuroscience: Making Sense of Sound*, MIT Press, 2011, p. 103

[13] Hugo Fastl, Eberhard Zwicker, *Psychoacoustics: Facts and Models (3rd edition)*, Springer, 2007, p. 186

[14] Brian C. J. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing (6th edition)*, Koninklijke Brill NV, 2013, p. 196

[15] ANSI S3.20-1973, *American National Standard Psychoacoustical Terminology*, American National Standards Institute

[16] Adrianus J. M. Houtsma, "Pitch Perception". In: Brian C. J. Moore (Ed), *Hearing: Handbook of Perception and Cognition (2nd edition)*, Academic Press, 1995, p. 269

[17] ANSI S1.1-1994, *American National Standard Acoustical Terminology*, American National Standards Institute

[18] Brian C. J. Moore, *An Introduction to the Psychology of Hearing (6th edition)*, Koninklijke Brill NV, 2013, p. 285

[19] Stanley A. Gelfand, *Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics (5th edition)*, Informa Healthcare, 2010, p. 227

[20] Brian C. J. Moore, "Psychoacoustics". In: Thomas D. Rossing (Ed), *Springer Handbook of Acoustics*, Springer, 2007, p. 477

[21] Christopher J. Plack, Andrew J. Oxenham, "The Psychophysics of Pitch". In: Christopher J. Plack, Andrew J. Oxenham, Richard R. Fay, Arthur N. Popper (Eds), *Pitch: Neural Coding and Perception*, Springer, 2005, p. 11

[22] Christopher J. Plack, *The Sense of Hearing*, Psychology Press, 2005, p. 142

[23] Huanping Dai, "On the Relative Influence of Individual Harmonics on Pitch Judgment", *J Acoust Soc Am 107(2):953-959*, Acoustical Society of America, 2000

[24] Hugo Fastl, Eberhard Zwicker, *Psychoacoustics: Facts and Models (3rd edition)*, Springer, 2007, p. 120

[25] Andrew J. Oxenham, Christophe Micheyl, Michael V. Keebler, Adam Loper, Sébastien Santurette, "Pitch Perception Beyond the Traditional Existence Region of Pitch" *Proc Natl Acad Sci 108(18):7629-7634*, National Academy of Sciences USA, 2011

[26] Shihab Shamma, David Klein, "The Case of the Missing Pitch Templates: How Harmonic Templates Emerge in the Early Auditory System", *J Acoust Soc Am 107(5):2631-2644*, Acoustical Society of America, 2000

[27] Julius L. Goldstein, "An Optimum Processor Theory for the Central Formation of the Pitch of Complex Tones", *J Acoust Soc Am 54(6):1496-1516*, Acoustical Society of America, 1973

[28] Joseph C. R. Licklider, "A Duplex Theory of Pitch Perception", *Experientia 7(4):128-134*, Birkhäuser / Springer, 1951

[29] Adrianus J. M. Houtsma**,** Julius L. Goldstein, **"**The Central Origin of the Pitch of Complex Tones: Evidence from Musical Interval Recognition", *J Acoust Soc Am 51(2B):520-529*, Acoustical Society of America, 1972

[30] I-Hui Hsieh, Kourosh Saberi, "Temporal Integration in Absolute Identification of Musical Pitch", *Hearing Research 233(1-2):108-116*, Elsevier, 2007

[31] Johanna G. Barry, Benjamin Weiss, Beate Sabisch, "Psychophysical Estimates of Frequency Discrimination: More Than Just Limitations of Auditory Processing", *Brain Sci 3(3):1023-1042*, MDPI Publications, 2013

[32] Samuel Robert Mathias, *Individual Differences in Pitch Perception*, PhD dissertation, University of York: Department of Psychology, 2010, p. 1

[33] Andrew J. Oxenham, "Pitch Perception and Auditory Stream Segregation: Implications for Hearing Loss and Cochlear Implants", *Trends Amplif 12(4):316-331*, SAGE Publications, 2008

[34] Lynne W. Olsho, Elizabeth G. Koch, Elizabeth A. Carter, Christopher F. Halpin, Nancy B. Spetner, "Pure-tone Sensitivity of Human Infants", *J Acoust Soc Am 84(4):1316-1324*, Acoustical Society of America, 1988

[35] Rickye Heffman, Henry Heffman, Bruce Masterton, "Behavioral Measurements of Absolute and Frequency Difference Thresholds in Guinea Pig", *J Acoust Soc Am 49(6):1888-1895*, Acoustical Society of America, 1970

[36] Alexander Cohen, "Further Investigation of the Effects of Intensity Upon the Pitch of Pure Tones", *J Acoust Soc Am 33(10):1363-1376*, Acoustical Society of America, 1961

[37] Νίκος Παπαδάκης, *Στοιχεία Ψυχοακουστικής (5η έκδοση)*, ΤΕΙ Κρήτης: Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, 2009, σελ. 88

[38] J.M. Doughty, W.R. Garner, "Pitch Characteristics of Short Tones II: Pitch as a Function of Duration", *J Exp Psychol 38(4):478-494*, American Psychological Association, 1948

[39] William M. Hartman, "The Effect of Amplitude Envelope on the Pitch of Sine Wave Tones", *J Acoust Soc Am 63(4):1105-1113*, Acoustical Society of America, 1978

[40] Thomas D. Rossing, Adrianus J. M. Houtsma, "Effects of Signal Envelope on the Pitch of Short Sinusoidal Tones", *J Acoust Soc Am 79(6):1926-1933*, Acoustical Society of America, 1986

[41] Hugo Fastl, Eberhard Zwicker, *Psychoacoustics: Facts and Models (3rd edition)*, Springer, 2007, p. 114

[42] Adrianus J. M. Houtsma, "Pitch Perception". In: Brian C. J. Moore (Ed), *Hearing: Handbook of Perception and Cognition (2nd edition)*, Academic Press, 1995, p. 270

[43] Samuel Robert Mathias, *Individual Differences in Pitch Perception*, PhD dissertation, University of York: Department of Psychology, 2010, p. 16

[44] Stanley A. Gelfand, *Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics (5th edition)*, Informa Healthcare, 2010, pp. 222-223

[45] W. Dixon Ward, "Subjective Musical Pitch", *J Acoust Soc Am 26(3):369-380*, Acoustical Society of America, 1954

[46] Fred Attneave, Richard K. Olson, "Pitch as a Medium: A New Approach to Psychophysical Scaling", *Am J Psychol 84(2):147-166*, University of Illinois Press, 1971

[47] Kengo Ohgushi, Tadasu Hatoh, "The Musical Pitch of High Frequency Tones". In: Yves Cazals, Kathleen C. Horner, Laurent Demany (Eds), *Auditory Physiology and Perception: Proceedings of the 9th International Symposium on Hearing*, Pergamon Press, 1992, pp. 207-212

[48] Daniel J. Levitin, "Absolute Memory for Musical Pitch: Evidence from the Production of Learned Melodies", *Percept Psychophys 56(4):414-423*, Psychonomic Society, 1994

[49] Δήμητρα Κόνιαρη, "Απόλυτη Ακοή: Σύντομη Ανασκόπηση στο Μύθο και την Πραγματικότητα", *Μουσικοπαιδαγωγικά 2:42-49*, Ελληνική Ένωση για τη Μουσική Εκπαίδευση, 2005

[50] Michael W. Eysenck, Mark T. Keane, *Cognitive Psychology: A Student's Handbook (6th edition)*, Psychology Press, 2010, p. 206

[51] George A. Miller, "The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information", *Psychological Review 63(2):81-97*, American Psychological Association, 1956

[52] Eric R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell, *Νευροεπιστήμη και Συμπεριφορά (ελληνική μετάφραση)*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2011, σελ. 687-688

[53] Daniel L. Schacter, Daniel T. Gilbert, Daniel M. Wegner, *Psychology*, Worth Publishers, 2009, p. 185

[54] Eiling Yee, Evangelia G. Chrysikou, Sharon L. Thompson-Schill, "The Cognitive Neuroscience of Semantic Memory". In: Kevin Ochsner, Stephen Kosslyn (Eds), *Oxford Handbook of Cognitive Neuroscience*, Oxford University Press, 2014, p. 353

[55] http://www.human-memory.net/types_declarative.html (ανακτήθηκε: 14/07/2014)

[56] Endel Tulving, Daniel L. Schacter, "Priming and Memory Systems". In: Barry H. Smith, George Adelman (Eds), *Neuroscience Year: Supplement 2 to the Encyclopedia of Neuroscience*, Birkhäuser / Springer, 1992, p. 131

[57] Alan D. Baddeley, Graham Hitch, "Working Memory". In: Gordon H. Bower (Ed), *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory Volume 8*, Academic Press, 1974, pp. 47-89

[58] Bob Snyder, *Music and Memory: An Introduction*, MIT Press, 2000, pp. 4-5

[59] Nelson Cowan, "On Short and Long Auditory Stores", *Psychol Bull 96(2):341-370*, American Psychological Association, 1984

[60] Risto Näätänen, István Winkler, "The Concept of Auditory Stimulus Representation in Cognitive Neuroscience", *Psychol Bull 125(6):826-859*, American Psychological Association, 1999

[61] Diana Deutsch, "The Processing of Pitch Combinations". In: Diana Deutsch (Ed), *The Psychology of Music (3rd edition)*, Academic Press, 2013, p. 284

[62] Neil McLachlan, Sarah Wilson, "The Central Role of Recognition in Auditory Perception: A Neurobiological Model", *Psychological Review 117(1):175-196*, American Psychological Association, 2010

[63] Bob Snyder, *Music and Memory: An Introduction*, MIT Press, 2000, p. 5

[64] Joel S. Snyder, Melissa K. Gregg, "Memory for Sound, With an Ear Toward Hearing in Complex Auditory Scenes", *Atten Percept Psychophys 73(7):1999-2007*, Psychonomic Society, 2011

[65] Laurent Demany, Catherine Semal, "The Role of Memory in Auditory Perception". In: William A. Yost, Arthur N. Popper, Richard R. Fay (Eds), *Auditory Perception of Sound Sources*, Springer, 2008, p. 100

[66] Neil McLachlan, "A Computational Model of Human Pitch Strength and Height Judgments", *Hearing Research 249(1-2):23-35*, Elsevier, 2009

[67] Diana Deutsch, "The Processing of Pitch Combinations". In: Diana Deutsch (Ed), *The Psychology of Music (3rd edition)*, Academic Press, 2013, p. 287

[68] Sibylle C. Herholz, Robert J. Zatorre, "Musical Training as a Framework for Brain Plasticity: Behavior, Function and Structure", *Neuron 76(3):486-502*, Elsevier, 2012

[69] Dexter Irvine, Mel Brown, Russell Martin, Valerie Park, "Auditory Perceptual Learning and Cortical Plasticity". In: Peter Heil, Henning Scheich, Eike Budinger, Reinhard Konig (Eds), *The Auditory Cortex: A Synthesis of Human and Animal Research*, Lawrence Erlbaum Associates, 2005, p. 410

[70] Uma R. Karmarkar, Dean V. Buonomano, "Temporal Specificity of Perceptual Learning in an Auditory Discrimination Task", *Learn Mem 10(2):141-147*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2003

[71] Beverly A. Wright, Andrew T. Sabin, "Perceptual Learning: How Much Daily Training is Enough?", *Exp Brain Res 180(4):727-736*, Springer, 2007

[72] Nicolas Grimault, Christophe Micheyl, Robert C. Carlyon, Lionel Collet, "Evidence For Two Pitch Encoding Mechanisms Using a Selective Auditory Training Paradigm", *Percept Psychophys 64(2):189-197*, Psychonomic Society, 2002

[73] Nadine Gaab, Christian Gaser, Gottfried Schlaug, "Improvement-related Functional Plasticity Following Pitch Memory Training", *NeuroImage 31(1):255-263*, Elsevier, 2006

[74] Claude Alain, Joel S. Snyder, Yu He, Karen S. Reinke, "Changes in Auditory Cortex Parallel Rapid Perceptual Learning", *Cereb Cortex 17(5):1074-1084*, Oxford University Press, 2007

[75] Shin-ichiro Iwamiya, Yoshitaka Nakajima, Kazuo Ueda, Kazuhiko Kawahara, Masayuki Takada, "Technical Listening Training: Improvement of Sound Sensitivity for Acoustic Engineers and Sound Designers", *Acoust Sci & Tech 24(1):27-31*, Acoustical Society of Japan, 2003

[76] Teruaki Kaniwa, Sungyoung Kim, Hiroko Terasawa, Masahiro Ikeda, Takeshi Yamada, Shoji Makino, "Towards A Personalized Technical Ear Training Program: An Investigation of the Effect of Adaptive Feedback", *Proceedings of the SMC 2011: 8th Sound and Music Computing Conference*, 2011, pp. 439-443

[77] Dave Moulton, *Golden Ears Audio Eartraining Program*, Audio CD published by KIQ Productions

[78] Δημήτρης Σκαρλάτος, *Εφαρμοσμένη Ακουστική (3η έκδοση)*, Εκδόσεις Gotsis, 2008, σελ. 106

[79] ANSI S1.11 -2004, *Specification for Octave Band and Fractional Octave Band Analog and Digital Filters*, American National Standards Institute

[80] http://en.wikipedia.org/wiki/Memory_consolidation

[81] Katharine Molloy, David R. Moore, Ediz Sohoglu, Sygal Amitay, "Less Is More: Latent Learning Is Maximized by Shorter Training Sessions in Auditory Perceptual Learning", *PLoS ONE 7(5): e36929*, Public Library of Science, 2012

[82] Diana Deutsch, "Effect of Repetition of Standard and Comparison Tones on Recognition Memory for Pitch", *J Exp Psychol 93(1):156-162*, American Psychological Association, 1972

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Deutsch, D. (Ed). *The Psychology of Music (3rd edition)*. San Diego, CA: Academic Press, 2013

Fastl, H. & Zwicker, E. *Psychoacoustics: Facts and Models (3rd edition)*. Berlin: Springer-Verlag, 2007

Gelfand, S.A. *Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics (5th edition)*. London: Informa Healthcare, 2010

Mathias, S.R. *Individual Differences in Pitch Perception*. PhD dissertation, University of York: Department of Psychology, 2010

Moore, B.C.J. *An Introduction to the Psychology of Hearing (6th edition)*. Leiden: Koninklijke Brill NV, 2013

Moore, B.C.J. (Ed). *Hearing: Handbook of Perception and Cognition (2nd edition)*. San Diego, CA: Academic Press, 1995

Plack, C.J., Oxenham, A.J., Fay, R.R. & Popper, A.N. (Eds). *Pitch: Neural Coding and Perception*. New York: Springer, 2005

Rossing, T.D. (Ed). *Springer Handbook of Acoustics*. New York: Springer, 2007

Snyder, B. *Music and Memory: An Introduction*. Cambridge, MA: MIT Press, 2000

Yost, W.A., Popper, A.N. & Fay, R.R. (Eds). *Auditory Perception of Sound Sources*. New York: Springer, 2008