



ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

## ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάπτυξη εφαρμογής κινητού τηλεφώνου για την απτική εμπειρία της μουσικής σε πραγματικό χρόνο»



**Φοιτητής:**

**Λιόνης Βασίλειος**

**Αριθμός Μητρώου: 2020081**

**Επιβλέπων:**

**Κοκκώνης Γεώργιος**

**Επίκουρος Καθηγητής**

**Θεσσαλονίκη 2026**

Ανάπτυξη εφαρμογής κινητού για την μετατροπή μουσικής σε απτική δόνηση από αρχείο και μέσω μικροφώνου σε πραγματικό χρόνο με δυνατότητες παραμετροποίησης της δόνησης.

Κωδικός: 25316

Όνοματεπώνυμο φοιτήτριας: Λιόνης Βασίλειος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Κοκκώνης Γεώργιος

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε.: 04-10-2025

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε.: 23-01-2026

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε είναι παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Λιόνη Βασιλείου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας της συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση της συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων της συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με στόχο να διερευνηθεί πώς οι σύγχρονες τεχνολογίες μπορούν να αξιοποιηθούν ώστε να ενισχύσουν την καθημερινότητα και την κοινωνική συμμετοχή των ατόμων με προβλήματα ακοής, δίνοντάς τους εναλλακτικούς τρόπους πρόσβασης σε εμπειρίες που παραδοσιακά βασίζονται στον ήχο. Η εργασία επικεντρώνεται ειδικότερα στη μουσική, ως ένα σύνθετο και ιδιαίτερα εκφραστικό πεδίο, και στην προσπάθεια μεταφοράς βασικών μουσικών χαρακτηριστικών μέσω της αφής και της όρασης. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε εφαρμογή για συσκευές Android η οποία μετατρέπει τη μουσική σε δονήσεις (haptic feedback) με σκοπό την ενίσχυση της αντίληψης και της εμπειρίας του χρήστη. Η σχεδίαση και υλοποίηση της εφαρμογής στηρίχθηκε σε αρχές επεξεργασίας σήματος και audio-to-tactile αντιστοίχισης, ενώ δόθηκε έμφαση στην πρακτική λειτουργία σε πραγματικό χρόνο, καθώς και στην εμπειρία χρήσης (UI/UX). Η εργασία ολοκληρώνεται με αξιολόγηση της εφαρμογής, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη χρηστικότητα, την αποτελεσματικότητα και τη συμβολή του συνδυασμού απτικών και οπτικών τεχνολογιών στην προσβασιμότητα και την πρόσβαση στην πολιτισμική δημιουργία.

## Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνήσει πώς μπορούν να αξιοποιηθούν σύγχρονες τεχνολογίες για τη βελτίωση της καθημερινότητας ατόμων με προβλήματα ακοής, με έμφαση στην πρόσβαση στη μουσική μέσω εναλλακτικών καναλιών αντίληψης. Η εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας εφαρμογής για Android που μετατρέπει τη μουσική σε δονήσεις, προσφέροντας μια εναλλακτική μορφή «ακουστικής» εμπειρίας μέσω απτικής αλληλεπίδρασης. Η υλοποίηση έγινε με στόχο την χρήση της σε συσκευές με λειτουργικό Android και αξιολογήθηκε, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τη χρηστικότητα, την αποτελεσματικότητα, καθώς και για τον αντίκτυπο που μπορεί να έχει ο συνδυασμός απτικών και οπτικών τεχνολογιών στην κοινωνική ένταξη και την πρόσβαση στην πολιτισμική δημιουργία.

# « Development of a mobile phone application for the real-time haptic experience of music»

Lionis Vasileios

## **Abstract**

The aim of this diploma thesis is to explore how modern technologies can be leveraged to improve the everyday lives of people with hearing impairments, with an emphasis on access to music through alternative perceptual channels. The work focuses on the development of an Android application that converts music into vibrations, offering an alternative form of “auditory” experience through haptic interaction. The implementation targets devices running the Android operating system and was evaluated in order to draw conclusions regarding usability, effectiveness, and the potential impact of combining haptic and visual technologies on social inclusion and access to cultural participation.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα από όλα τον Θεό που κατάφερα να ολοκληρώσω αυτή την εργασία, έπειτα τον κύριο Κοκκώνη Γεώργιο για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την στήριξη του από την αρχή ως τέλος της. Επίσης θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου τη κοπέλα μου και τους φίλους μου που με στηρίζουν όλον αυτόν τον καιρό.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	2
Περίληψη .....	3
Abstract .....	4
Ευχαριστίες .....	5
Κατάλογος εικόνων .....	11
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή .....	1
1.1 Σκοπός και Περιγραφή Εφαρμογής .....	1
1.2 Κίνητρο και Σημασία .....	1
1.3 Ερευνητικά ερωτήματα και υποθέσεις .....	2
1.4 Μεθοδολογία σε πολύ γενικές γραμμές .....	2
1.5 Δομή του κειμένου.....	3
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο Ήχου .....	4
2.1 Βασικές έννοιες ακουστικής.....	4
2.1.1 Ιδιότητες μετάδοσης και φάσματος .....	4
2.1.2 Ψυχοακουστικές παράμετροι: ύψος, ένταση, διάρκεια .....	5
2.1.3 Ηχόχρωμα και φασματική δομή .....	5
2.2 Ψηφιακή επεξεργασία σήματος.....	5
2.2.1 Αναπαράσταση και ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας .....	6
2.2.2 Ψυχοακουστικά μοντέλα και ηχηρότητα .....	7
2.2.3 DSP στον ήχο και σχέση με audio-to-haptics.....	8
2.3 Φίλτρα (low/high/band-pass, weighting filters A/C/Z, equal-loudness).....	8
2.3.1 Φίλτρα στάθμησης (weighting filters A, C, Z) .....	9
2.4 Ρυθμός, beat και χρονικές δομές στη μουσική .....	10
2.4.1 Beat και tempo.....	10
2.4.2 Μέτρο και ρυθμός.....	11
2.4.3 Σχέση με DSP και audio-to-haptics.....	11
Κεφάλαιο 3ο: Απτική αντίληψη και Audio–Tactile Mapping.....	12
3.1 Φυσιολογία της αφής και αντίληψη δόνησης.....	12
3.2 Μοντελοποίηση δονητικών ενεργοποιητών .....	12
3.2.1 Παροδική απόκριση (Overshoot & Settling).....	14
3.2.2 ERM (Eccentric Rotating Mass): δύναμη ανισορροπίας .....	14
3.2.3 LRA (Linear Resonant Actuator): συντονισμένη λειτουργία.....	15
3.2.4 Πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές: constitutive equations και μετατόπιση .....	16
3.2.5 Ενέργεια, κατανάλωση και φαινόμενο “loading” στα smartphones .....	17
3.3 Ευαισθησία σε συχνότητες δόνησης, όρια αντίληψης και άνεση.....	17
3.4 Συνδυασμός ακοής–αφής (audio–tactile integration) .....	18

3.5 Τεχνικές mapping ήχου → δονήσεων .....	19
Κεφάλαιο 4ο: Άτομα με προβλήματα ακοής και βοηθητικές τεχνολογίες.....	20
4.1 Τύποι και βαθμοί απώλειας ακοής .....	20
4.2 Προκλήσεις στην πρόσβαση στη μουσική και στον περιβάλλοντα ήχο .....	21
4.3 Επιπτώσεις της απώλειας ακοής στην καθημερινή ζωή και στην ποιότητα ζωής .....	21
4.3.1 Επικοινωνία και κοινωνική συμμετοχή .....	22
4.3.2 Συναισθηματικές και ψυχικές επιπτώσεις .....	22
4.3.3 Εκπαίδευση και επαγγελματική λειτουργικότητα .....	22
4.3.4 Ασφάλεια και σωματική υγεία .....	22
4.3.5 Επιπτώσεις στην καθημερινή αυτονομία.....	22
4.3.6 Ποιότητα ζωής και πρόσβαση σε ψυχαγωγία .....	23
4.3.7 Συνολική θεώρηση και ανάγκη παρεμβάσεων.....	23
Κεφάλαιο 5ο: Συναφείς εργασίες και συνεισφορά της παρούσας εργασίας.....	24
5.1 Ανασκοπήσεις σε audio-tactile rendering και haptic συσκευές .....	24
5.2 Συστήματα για μουσική εμπειρία σε άτομα με προβλήματα ακοής.....	24
5.3 Μελέτες για vibrotactile enhancement και audio-tactile congruence .....	25
5.4 Βιομηχανικές προσεγγίσεις και πατέντες .....	25
5.5 Κενά στη βιβλιογραφία και συνεισφορά της παρούσας εργασίας .....	25
5.5.1 Παραμετροποίηση με φίλτρα και passbands .....	26
5.5.2 Έμφαση σε real-time congruence .....	26
Κεφάλαιο 6ο: Ανάλυση Απαιτήσεων και Σχεδίαση Συστήματος .....	27
6.1 Σενάρια χρήσης (με/χωρίς προβλήματα ακοής, μουσική, περιβάλλον, mic mode) .....	27
6.1.2 Σενάριο Α: Ακρόαση μουσικής από αρχείο (τυπικός χρήστης) .....	27
6.1.2 Σενάριο Β: Χρήση από άτομα με απώλεια ακοής (προσαρμογή απτικής απόκρισης) .....	28
6.1.3 Σενάριο Γ: Live Mic (περιβάλλον ή ζωντανός ήχος) .....	29
6.2 Λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις.....	29
6.2.1 Λειτουργικές απαιτήσεις .....	29
6.2.2 Μη λειτουργικές απαιτήσεις .....	29
6.3 Αρχιτεκτονική συστήματος (διαγράμματα block / UML).....	30
6.4 Σχεδίαση διεπαφής χρήστη (οθόνες, ροή, επιλογές φίλτρων και passband, info icons).....	30
6.5 Απαιτήσεις προσβασιμότητας .....	32
Κεφάλαιο 7ο: Τεχνική Υλοποίηση της Εφαρμογής.....	33
7.1 Πλατφόρμα Android, Kotlin, δομή έργου.....	33
7.1.1 Πλατφόρμα Android: δυνατότητες και περιορισμοί .....	33
7.1.2 Kotlin: λόγοι επιλογής και γλωσσικά χαρακτηριστικά .....	33
7.1.3 Αρχιτεκτονική επεξεργασίας και κύριες ροές.....	33
7.1.4 Δομή έργου (modules και ρόλοι).....	34
7.2 Audio Pipeline .....	34
7.2.1 Γενική περιγραφή pipeline .....	34

7.2.2 Είσοδος από αρχείο (file playback).....	34
7.2.3 Έλεγχος αναπαραγωγής και χρονική βάση .....	35
7.2.7 Είσοδος από μικρόφωνο (real-time).....	37
7.2.8 Κοινός κορμός ανάλυσης (band splitting, envelopes, rhythm) .....	39
7.2.9 Decoder σε PCM frames .....	43
7.2.10 Συγχρονισμός χρόνου, seek και restart.....	43
7.2.11 Band splitting, envelopes και ρυθμός .....	44
7.2.12 Watchdog και ανάκαμψη pipeline.....	46
7.2.13 Παράμετροι και ρυθμίσεις audio pipeline .....	48
7.3 Haptic Pipeline .....	49
7.3.1 Επίπεδο συσκευής: HapticEngine και waveform έξοδος .....	49
7.3.2 Βασική μονάδα χρόνου: frames και packetization .....	50
7.3.3 Παραγωγή amplitudes σε playback mode (MainActivity).....	50
7.3.4 Παραγωγή amplitudes σε live mode (MicHapticsStreamer) .....	52
7.3.4 Envelope shaping: ADSR και σταθερά επίπεδα .....	53
7.3.5 Strong beats: Primitives και fallback .....	54
7.3.6 Δρομολόγηση εξόδου: κινητό vs εξωτερικός actuator .....	55
7.3.7 Προ-πύλες και καταστολές .....	56
7.3.8 Απόφαση γεγονότος (beat/section/melody gate) .....	58
7.3.9 Επιλογή “ηγέτη” και τύπου pattern .....	58
7.3.10 Σύνθεση παλμών και bufferization .....	59
7.4 Ζητήματα απόδοσης και latency.....	62
7.4.1 Πηγές latency (ενδογενείς καθυστερήσεις) .....	62
7.4.2 Αιτίες latency .....	63
7.4.3 Παράγοντες απόδοσης (CPU/allocations/locks).....	63
7.4.4 Μετριάσμοι και trade-offs (σχεδιαστικές επιλογές).....	63
7.4.5 Μεθοδολογία αξιολόγησης latency .....	64
7.5 Κενά στη βιβλιογραφία και συνεισφορά της παρούσας εργασίας .....	64
7.5.1 Ένταση: κβάντωση, κορεσμός, υποστήριξη amplitude control.....	64
7.5.2 Μη υποστήριξη amplitude: duty-cycle ως υποκατάστατο envelope.....	64
7.5.3 Δυναμική μοτέρ (ERM/LRA): χρόνοι ανόδου/παύσης και πιστότητα σε γρήγορα μοτίβα.....	64
7.5.4 Ετερογένεια συσκευών και επίπεδα API: συμπεριφορά cancel και routing vibrator .....	64
7.5.5 Κατανάλωση ενέργειας και θερμοικοί/λειτουργικοί περιορισμοί (έμμεσες επιπτώσεις) .....	65
Κεφάλαιο 8ο: Πειραματικός Σχεδιασμός και Ερωτηματολόγιο.....	66
8.1 Στόχοι αξιολόγησης.....	66
8.2 Περιγραφή δείγματος (πληθυσμός, κριτήρια ένταξης, ομάδες) .....	66
8.3 Διαδικασία πειραματισμού .....	66
8.4 Ερωτηματολόγιο .....	67
Δημογραφικά στοιχεία:.....	67

Αξιολόγηση της εφαρμογής: .....	68
Αξιολόγηση φίλτρων δόνησης:.....	70
Αξιολόγηση Passband: .....	71
Αξιολόγηση real-time καταγραφής και μετατροπής του ήχου σε δόνηση μέσω μικροφώνου:.....	71
8.5 Μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων .....	73
Κεφάλαιο 9ο: Αποτέλεσμα .....	74
9.1 Περιγραφή δείγματος (Πίνακες/Διαγράμματα) .....	74
9.1.1 Φύλο .....	74
9.1.2 Ηλικιακή ομάδα .....	74
9.1.3 Επίπεδο σπουδών .....	75
9.1.4 Εμπειρία με παρόμοιες εφαρμογές .....	75
9.2 Αποτελέσματα για τη συνολική εφαρμογή .....	76
9.2.1 Ερώτημα 1 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Βαρετή – Συναρπαστική” (Γράφημα 1) .....	76
9.2.2 Ερώτημα 2 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Αδιάφορη - Ενδιαφέρουσα” (Γράφημα 2) .....	77
9.2.3 Ερώτημα 3 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Συμβατική - Εφευρετική” (Γράφημα 3) .....	77
9.2.4 Ερώτημα 4 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Παρελκυστική - Υποστηρικτική” (Γράφημα 4).....	78
9.2.5 Ερώτημα 5 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Περίπλοκη - Εύκολη” (Γράφημα 5) .....	78
9.2.6 Ερώτημα 6 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Συνηθισμένη - Πρωτοπόρα” (Γράφημα 6) .....	79
9.2.7 Ερώτημα 7 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Ανεπαρκής - Επαρκής” (Γράφημα 7).....	79
9.2.8 Ερώτημα 8 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Μπερδεμένη - Σαφής” (Γράφημα 8).....	80
9.3 Αποτελέσματα για φίλτρα δόνησης.....	81
9.3.1 Καθαρότητα ρυθμού – Flat (χωρίς φίλτρο) .....	81
9.3.2 Καθαρότητα ρυθμού – A-weight .....	81
9.3.3 Καθαρότητα ρυθμού – C-weight.....	82
9.3.4 Καθαρότητα ρυθμού – Z-weight.....	83
9.3.4 Συνολικά καλύτερο φίλτρο .....	83
9.3.5 Ενδεικτικά σχόλια και συμπεράσματα.....	84
9.4 Αποτελέσματα για passband .....	84
9.4.1 Ευχάριστο κατά τη χρήση .....	84
9.4.2 Καθαρότητα του ρυθμού.....	84
9.4.3 Άνεση σε παρατεταμένη χρήση .....	85
9.4.4 Ποιοτική περιγραφή αίσθησης.....	86
9.4.5 Σύνομη ερμηνεία.....	86
9.5 Αποτελέσματα για λειτουργία μικροφώνου (Live/real-time) .....	86
9.5.1 Ευκολία ενεργοποίησης/χρήσης.....	86
9.5.2 Χρονικός συγχρονισμός δόνησης-ήχου.....	87
9.5.3 Γενική χρησιμότητα.....	87
9.5.4 Είδη ήχων που χρησιμοποιήθηκαν (πολλαπλή επιλογή).....	88
9.5.5 Πρόθεση επαναχρήσης (Live) .....	88

9.5.5 Σχόλια χρηστών.....	89
9.6 Συσχετίσεις του δείγματος με τα αποτελέσματα .....	89
9.6.1 Συσχετίσεις με Βαθμολογίες (Κλίμακες Likert).....	89
9.6.2 Συσχετίσεις με Κατηγορικές Επιλογές (Φίλτρα, Passband, Real-Time) .....	90
Κεφάλαιο 10ο: Συζήτηση .....	94
10.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων σε σχέση με βιβλιογραφία .....	94
10.1.1 Ρυθμός ως “πυρήνας” της απτικής μουσικής.....	94
10.1.2 Επιλογή φίλτρου δόνησης (A-weight vs Flat κ.ά.).....	94
10.1.3 Passband και αντιληπτική άνεση .....	94
10.1.4 Real-time μικρόφωνο: χρηστικότητα, συγχρονισμός, πρόθεση χρήσης .....	95
10.1.5 Εξατομίκευση και “νοηματοδότηση” του mapping .....	95
10.1.6 Ενοποιημένη ερμηνεία.....	95
10.1.7 Real-time (μικρόφωνο) ως κριτήριο εμπειρίας .....	95
10.2 Επιπτώσεις για προσβασιμότητα και εμπειρία μουσικής σε ΔΗΗ άτομα (εκτεταμένη ανάπτυξη) .....	96
10.2.1 Προσβασιμότητα ως “πρόσβαση” (availability) .....	96
10.2.2 Προσβασιμότητα ως “κατανόηση” και νοηματοδότηση (meaning-making) .....	96
10.2.3 Προσβασιμότητα ως ποιότητα εμπειρίας (enjoyment, βιωσιμότητα, συμμετοχή) .....	97
10.2.3 Ψυχοφυσικοί περιορισμοί της αφής και συνέπειες για το mapping.....	97
10.2.4 Ρυθμός, χρονισμός και συγχρονισμός ως κριτήρια επιτυχίας .....	98
10.2.5 Ένταση, άνεση, κόπωση και ατομικές διαφορές .....	98
10.2.6 Επιπτώσεις για UI/UX και πρακτικές επιλογές υλοποίησης.....	99
10.2.7 Κοινωνική και πολιτισμική διάσταση της προσβασιμότητας.....	99
10.2.8 Συνολική ερμηνεία των αποτελεσμάτων του Κεφαλαίου 9.....	100
10.3 Τεχνικοί και Μεθοδολογικοί περιορισμοί .....	100
10.3.1 Τεχνικοί περιορισμοί.....	100
10.3.2 Μεθοδολογικοί περιορισμοί .....	102
10.4 Προτάσεις βελτίωσης και μελλοντική έρευνα.....	105
Κεφάλαιο 11ο: Συμπεράσματα .....	107
11.1 Σύνοψη Εργασίας.....	107
11.2 Κύρια συμπεράσματα .....	108
11.3 Δυνατότητες επέκτασης της εφαρμογής.....	109
Βιβλιογραφία .....	111

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1: Equal Loudness contours.....	7
Εικόνα 2.2: Low-pass filter .....	8
Εικόνα 2.3: High-pass filter .....	9
Εικόνα 2.4: Low-pass filter .....	9
Εικόνα 2.5: Καμπύλες απόκρισης συχνότητας A,C,Z .....	10
Εικόνα 3.1: Μηχανισμός SDOF .....	13
Εικόνα 3.2 ERM(Eccentric Rotating Mass).....	15
Εικόνα 3.3 LRA(Linear Resonant Actuators) .....	15
Εικόνα 3.4 Piezoelectric.....	17
Εικόνα 4.1 Ανατομία του αυτιού .....	20
Εικόνα 6.1 txtSong label .....	27
Εικόνα 6.2 Αρχική Οθόνη .....	27
Εικόνα 6.3: Αρχική Οθόνη κατά την αναπαραγωγή .....	28
Εικόνα 6.4: Κουμπί επιλογής φίλτρου .....	28
Εικόνα 6.5: Αρχική Οθόνη κατά τη διάρκεια της real-time λειτουργίας .....	29
Εικόνα 6.6: Διάγραμμα block.....	30
Εικόνα 6.7: Οθόνη ρυθμίσεων passband.....	30
Εικόνα 6.8: Dialog επιλογής φίλτρου .....	31
Εικόνα 6.9: Info dialog.....	31
Εικόνα 7.1 file picker.....	34
Εικόνα 7.2 συναρτήσεις pickAudioLauncher(...) και getDisplayName(...) .....	34
Εικόνα 7.3: togglePlayPause .....	35
Εικόνα 7.4 progressUpdater(...).....	35
Εικόνα 7.5: συνάρτηση seekTo(...).....	36
Εικόνα 7.6: Permission Request .....	36
Εικόνα 7.7: MainActivity.startMicMode(...).....	37
Εικόνα 7.8: MicHapticsStreamer.start() με AudioRecord.Builder .....	37
Εικόνα 7.9: MicHapticsStreamer.onMicFrame(...)με RMS και gating. ....	38
Εικόνα 7.10: pcmWeighting, BandSplitter και post mode .....	39
Εικόνα 7.11: aSosByCh, cLiByCh μεταβλητές .....	41
Εικόνα 7.12: Συνάρτηση freqzMag(...).....	42
Εικόνα 7.13: BandSplitter.bandsRms(...).....	42
Εικόνα 7.14: HapticFilters.apply(...).....	42
Εικόνα 7.15: Ο ορισμός startDecoderAt(...) και η κλήση DirectDecoder.decode(...).....	43
Εικόνα 7.16: Απόσπασμα togglePlayPause/seekTo/onPcmFrame .....	44
Εικόνα 7.17: Απόσπασμα onPcmFrame ή onMicFrame με κλήσεις BandSplitter.bandsRms, HapticFilters.apply και υπολογισμό lowEnv/midEnv/highEnv και shares .....	45
Εικόνα 7.18: Κώδικας rhythm.onFrame(...), pulseDurations(...) και SectionDetector.onFrame(...) .....	46
Εικόνα 7.19: startWatchdog(...).....	47
Εικόνα 7.20: Απόσπασμα onPcmFrame.....	47
Εικόνα 7.21: Τμήμα updateTactileWindow(...).....	48
Εικόνα 7.22: Σταθερές frameMsCfg, packetFramesCfg, silenceShareThCfg στην MainActivity .....	49
Εικόνα 7.23: HapticEngine.playWaveform(...) .....	50
Εικόνα 7.24: Η χρήση των frameMsCfg, packetFramesCfg στο startDecoderAt(...).....	50
Εικόνα 7.25: appendAmp(...) και flushIfNeeded(...) στη MainActivity .....	51

Εικόνα 7.26: Σημείο του onPcmFrame(...) 1 .....	52
Εικόνα 7.27: Σημείο του onPcmFrame(...) 2.....	53
Εικόνα 7.28: Κλήση haptic.playWaveform(...). .....	53
Εικόνα 7.29 EnvelopeHaptics.writeAdsrInto(...). .....	54
Εικόνα 7.30: HapticsPrimitives.areStrongPrimitivesSupported(...) και buildStrongDownbeat(...). .....	55
Εικόνα 7.31: ExternalActuatorκαιHapticOutputRouter .....	56
Εικόνα 7.32 Pre-gates .....	57
Εικόνα 7.33: To branch silenceShareThreshold .....	58
Εικόνα 7.34: Block isBeat, beatMs, sectionRise και ορισμός melodyOpen/gateAllows .....	58
Εικόνα 7.35: Leader selection και branch “non-beat tick” .....	59
Εικόνα 7.36 Strong beat branch.....	60
Εικόνα 7.37 Normal beat branch .....	60
Εικόνα 7.38 writeHapticPulseForBand(...) .....	61
Εικόνα 7.39 Διαδικασία “Hard stop” .....	61
Εικόνα 7.40 flushIfNeeded(...) .....	62
Εικόνα 9.1: Διάγραμμα φύλου .....	74
Εικόνα 9.2: Διάγραμμα ηλικιακής ομάδας.....	75
Εικόνα 9.3: Διάγραμμα επιπέδου σπουδών .....	75
Εικόνα 9.4 Διάγραμμα χρήσης παρόμοιων εφαρμογών.....	76
Εικόνα 9.5: Διάγραμμα Ερωτήματος 1 .....	76
Εικόνα 9.6: Διάγραμμα Ερωτήματος 2 .....	77
Εικόνα 9.7: Διάγραμμα Ερωτήματος 3 .....	77
Εικόνα 9.8: Διάγραμμα Ερωτήματος 4 .....	78
Εικόνα 9.9: Διάγραμμα Ερωτήματος 5 .....	78
Εικόνα 9.10: Διάγραμμα Ερωτήματος 6.....	79
Εικόνα 9.11: Διάγραμμα Ερωτήματος 7 .....	79
Εικόνα 9.12: Διάγραμμα Ερωτήματος 8 .....	80
Εικόνα 9.13: Διάγραμμα καθαρότητας ρυθμού Flat.....	81
Εικόνα 9.14: Διάγραμμα καθαρότητας ρυθμού A-weight .....	82
Εικόνα 9.15: Διάγραμμα καθαρότητας ρυθμού C-weight.....	82
Εικόνα 9.16: Διάγραμμα καθαρότητας ρυθμού Z-weight.....	83
Εικόνα 9.17: Διάγραμμα συνολικά καλύτερου φίλτρου .....	83
Εικόνα 9.18: Διάγραμμα πιο ευχάριστου passband .....	84
Εικόνα 9.19: Διάγραμμα πιο καθαρού passband στον ρυθμό .....	85
Εικόνα 9.20: Διάγραμμα πιο άνετου passband .....	85
Εικόνα 9.21: Διάγραμμα ευκολίας ενεργοποίησης και χρήσης της real time λειτουργίας.....	86
Εικόνα 9.22: Διάγραμμα ποσοστού ταύτισης δόνησης με ήχου από το μικρόφωνο .....	87
Εικόνα 9.23 Διάγραμμα χρησιμότητας της real time λειτουργίας.....	87
Εικόνα 9.24: Διάγραμμα ειδών ήχου χρήσης της real-time λειτουργίας.....	88
Εικόνα 9.25: Διάγραμμα πιθανότητας επαναχρησιμοποίησης της real-time λειτουργίας .....	88
Εικόνα 9.26: Πίνακας Συσχετίσεων 1 .....	89
Εικόνα 9.27: Πίνακας Συσχετίσεων 2.....	90
Εικόνα 9.28: Πίνακας Συσχετίσεων 3 .....	91
Εικόνα 9.29: Πίνακας Συσχετίσεων 4.....	92
Εικόνα 9.30: Πίνακας Συσχετίσεων 5.....	93

# Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός και Περιγραφή Εφαρμογής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη, υλοποίηση και αξιολόγηση μιας εφαρμογής για συσκευές Android, η οποία στοχεύει στην μετατροπή της μουσικής, της ομιλίας, των περιβαλλοντικών ήχων και οποιασδήποτε άλλης μορφής ήχου σε απτική ανάδραση (δόνηση). Αυτό επιτυγχάνεται και σε πραγματικό χρόνο με την χρήση του μικροφώνου που διαθέτει η κινητή συσκευή. Στόχος της, είναι βελτίωση της επαφής με τον ήχο και την μουσική σε άτομα όπου πάσχουν από ολική ή μερική απώλεια ακοής. Ταυτοχρόνως, μπορεί να φανεί χρήσιμη και σε όσους έχουν πλήρη ακουστική ικανότητα, διότι προσφέρει μια πρόσθετη διάσταση στη μουσική εμπειρία.

Στη συνέχεια διερευνάται κατά πόσο η δόνηση, όταν σχεδιάζεται με κατάλληλο audio-to-tactile mapping (φίλτρα, passband, ρυθμός), μπορεί να μεταφέρει πληροφορίες όπως ο ρυθμός, η ένταση και η δομή ενός μουσικού σήματος με τρόπο ευχάριστο και κατανοητό. Επιμέρους στόχοι της εργασίας είναι:

- Η μελέτη και επιλογή κατάλληλων τεχνικών επεξεργασίας ήχου και σχεδιασμού δόνησης για χρήση σε φορητές συσκευές.
- Η σχεδίαση και υλοποίηση μιας φιλικής προς τον χρήστη εφαρμογής που επιτρέπει την προσαρμογή φίλτρων δόνησης και passband συχνοτήτων.
- Η αξιολόγηση της εφαρμογής από πραγματικούς χρήστες, συμπεριλαμβανομένων ατόμων με δυσκολίες ακοής, για την ευχρηστία, την αντιληπτή ποιότητα δόνησης και την χρησιμότητα στην καθημερινή χρήση.

## 1.2 Κίνητρο και Σημασία

Στην καθημερινότητα μας ερχόμαστε σε επαφή με διάφορα είδη ήχων(μουσική, ομιλία, περιβαλλοντικός ήχος) με σκοπό την ψυχαγωγία, τη συναισθηματική έκφραση και την κοινωνική αλληλεπίδραση. Από την άλλη μεριά, υπάρχουν άτομα όπου αντιμετωπίζουν προβλήματα ακοής και δεν διαθέτουν ολοκληρωμένη πρόσβαση σε αυτή τη διάσταση εμπειρίας. Οπότε, πολλοί λόγω αυτού του περιορισμού καταφεύγουν στην αξιοποίηση εξειδικευμένων βοηθητικών τεχνολογιών, οι οποίες δεν είναι πάντα οικονομικά προσιτές ή εύχρηστες.

Ταυτόχρονα, παρατηρείται ότι όλο ένα και περισσότερο, οι σύγχρονες έξυπνες συσκευές διαθέτουν ισχυρές δυνατότητες επεξεργασίας ήχου και προηγμένα συστήματα δόνησης για την επίτευξη μιας καλύτερης εμπειρίας χρήσης. Η αξιοποίηση αυτού του υπάρχοντος hardware σηματοδότησε τη δημιουργία ενός μετατροπέα όπου ένα οποιοδήποτε ηχητικό σήμα θα αποδίδεται σε απτική ανάδραση. Μια τέτοια τεχνολογία μπορεί να αποτελέσει μια χαμηλού κόστους, ευρέως διαθέσιμη λύση για την ενίσχυση της προσβασιμότητας. Μόνος περιορισμός αποτελεί η κινητή συσκευή να διαθέτει απτικό μοτέρ δόνησης. Η ανάπτυξη μιας εφαρμογής που επιτρέπει σε χρήστες με απώλεια ακοής να «νιώθουν» τον ρυθμό και τις δυναμικές της μουσικής, αλλά και να αντιλαμβάνονται συμβάντα του περιβάλλοντος μέσω δόνησης, έχει τόσο κοινωνική όσο και ερευνητική αξία. Παράλληλα, ανοίγει δρόμους για νέες μορφές πολυαισθητηριακής αλληλεπίδρασης και καλλιτεχνικής έκφρασης.

### 1.3 Ερευνητικά ερωτήματα και υποθέσεις

Με βάση τα παραπάνω, η εργασία διατυπώνει ενδεικτικά τα ακόλουθα βασικά ερευνητικά ερωτήματα:

- Σε ποιο βαθμό οι χρήστες μπορούν να αντιληφθούν τον ρυθμό και τις βασικές δυναμικές ενός μουσικού σήματος μέσω δονήσεων που παράγονται από φορητή συσκευή;
- Πώς επηρεάζουν διαφορετικά φίλτρα δόνησης (π.χ. A-weight, C-weight, equal-loudness) την υποκειμενική αίσθηση ευχαρίστησης, καθαρότητας και άνεσης της δόνησης;
- Πώς επηρεάζουν διαφορετικά passband συχνοτήτων την αντιληπτή ποιότητα της απτικής ανάδρασης;
- Πόσο χρήσιμη και εύχρηστη θεωρείται η λειτουργία real time καταγραφής του ήχου μέσω μικροφώνου για καθημερινά σενάρια χρήσης;

Αντίστοιχα, διατυπώνονται ενδεικτικά οι ακόλουθες υποθέσεις:

- Μέσω της χρήσης κατάλληλων φίλτρων και passband θα βελτιώνεται η υποκειμενική ποιότητα της δόνησης σε σχέση με μια απλή, «αφιλτράριστη» μετατροπή ήχου σε δόνηση.
- Οι χρήστες θα μπορούν να αναγνωρίζουν τον ρυθμό και τις αλλαγές έντασης της μουσικής μέσω της απτικής ανάδρασης με ικανοποιητική ακρίβεια.
- Η λειτουργία real time καταγραφής του ήχου μέσω μικροφώνου θα θεωρηθεί ιδιαίτερα χρήσιμη από άτομα με προβλήματα ακοής, καθώς επιτρέπει την άμεση απτική πρόσβαση σε ομιλία, «ζωντανή» μουσική και περιβαλλοντικούς ήχους.

### 1.4 Μεθοδολογία σε πολύ γενικές γραμμές

Η μεθοδολογία που ακολουθείται στην παρούσα εργασία βασίζεται σε μια διαδοχική διαδικασία, όπως συνηθίζεται σε διπλωματικές που αφορούν σχεδίαση και ανάπτυξη εφαρμογών Android. Στόχος είναι να υπάρξει τόσο στέρεο θεωρητικό υπόβαθρο όσο και τεκμηριωμένη πειραματική αξιολόγηση της προτεινόμενης λύσης.

Αρχικά πραγματοποιείται εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση σε θέματα ακουστικής, απτικής αντίληψης, ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, βοηθητικών τεχνολογιών για άτομα με προβλήματα ακοής και υφιστάμενων συστημάτων audio-to-tactile. Σκοπός του σταδίου αυτού είναι να αποτυπωθούν οι βασικές θεωρητικές έννοιες, τα όρια και οι δυνατότητες της τεχνολογίας, καθώς και το ερευνητικό κενό που έρχεται να καλύψει η εφαρμογή.

Έπειτα ακολουθεί η ανάλυση απαιτήσεων και η σχεδίαση του συστήματος. Χρειάζεται να προσδιοριστούν τα βασικά σενάρια χρήσης (αναπαραγωγή μουσικής, λειτουργία μικροφώνου, προσαρμογή φίλτρων και passband), οι λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις (ευχρηστία, χαμηλή καθυστέρηση, άνεση δόνησης) και σχεδιάζεται η αρχιτεκτονική της εφαρμογής σε επίπεδο ενοτήτων (audio pipeline, haptic engine, διεπαφή χρήστη). Παράλληλα συγκροτείται το user interface της εφαρμογής και οι ροές αλληλεπίδρασης με έμφαση στην προσβασιμότητα.

Ακολουθεί το στάδιο της υλοποίησης, όπου η εφαρμογή αναπτύσσεται σε περιβάλλον Android, με γλώσσα Kotlin και αξιοποίηση των διαθέσιμων APIs για ήχο και δόνηση στο ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (ide), Android Studio. Στο στάδιο αυτό υλοποιούνται οι αλγόριθμοι ανάλυσης ήχου (band splitting, υπολογισμός ενέργειας, ρυθμός), οι μηχανισμοί mapping σε μοτίβα δόνησης και η γραφική διεπαφή. Πραγματοποιούνται επαναληπτικές δοκιμές και βελτιστοποιήσεις, τόσο ως προς την απόδοση όσο και ως προς την υποκειμενική ποιότητα της απτικής ανάδρασης.

Στη συνέχεια σχεδιάζεται και υλοποιείται η πειραματική αξιολόγηση με χρήστες. Ορίζεται το δείγμα (ακούοντες και άτομα με προβλήματα ακοής), καταρτίζεται αναλυτικό πρωτόκολλο δοκιμών (σενάρια χρήσης, σειρά παρουσίασης φίλτρων και passband, χρήση λειτουργίας μικροφώνου) και κατασκευάζεται ερωτηματολόγιο με κλίμακες τύπου Likert, ερωτήσεις πολλαπλών επιλογών και ανοικτές ερωτήσεις. Τα δεδομένα που συλλέγονται αναλύονται με ποσοτικές μεθόδους (βασικά στατιστικά, συγκρίσεις μέσω τιμών) και ποιοτικές τεχνικές (θεματική κατηγοριοποίηση σχολίων), έτσι ώστε να αξιοποιηθούν τα συμπεράσματα για την ευχρηστία, τη χρησιμότητα και την εμπειρία χρήσης της εφαρμογής.

Τέλος, τα αποτελέσματα συντίθενται και ερμηνεύονται σε συνάρτηση με το θεωρητικό πλαίσιο, οδηγώντας στη διαμόρφωση συμπερασμάτων και προτάσεων για μελλοντική έρευνα και βελτίωση της εφαρμογής. Με αυτόν τον τρόπο, η μεθοδολογία εξασφαλίζει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση συνδυάζοντας θεωρία, τεχνολογική ανάπτυξη και εμπειρική αξιολόγηση.

## 1.5 Δομή του κειμένου

Το κείμενο οργανώνεται σε δέκα κεφάλαια ώστε να συνδυάζει θεωρητικό υπόβαθρο, τεχνική υλοποίηση και εμπειρική αξιολόγηση. Προτάσσονται επίσης τυπικές προλογικές ενότητες (Περίληψη, Abstract, Ευχαριστίες) και ακολουθούν Βιβλιογραφία και Παραρτήματα.

- Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή. Παρουσιάζει το πρόβλημα, τον σκοπό, τα ερευνητικά ερωτήματα, τη συνοπτική μεθοδολογία και τον οδηγό ανάγνωσης της εργασίας.
- Κεφάλαιο 2: Θεωρία Ήχου και Επεξεργασία. Συνοψίζει βασικές έννοιες ακουστικής, ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και φίλτρων που αξιοποιούνται στην υλοποίηση.
- Κεφάλαιο 3: Απτική Αντίληψη και Audio-Tactile Mapping. Περιγράφει τη φυσιολογία της αφής και τις αρχές μεταφοράς χαρακτηριστικών ήχου σε δονήσεις.
- Κεφάλαιο 4: Προσβασιμότητα για άτομα με προβλήματα ακοής. Χαρτογραφεί ανάγκες, υφιστάμενες λύσεις και το κενό που καλύπτει η προτεινόμενη εφαρμογή.
- Κεφάλαιο 5: Απαιτήσεις και Σχεδίαση Συστήματος. Τεκμηριώνει σενάρια χρήσης, λειτουργικές/μη λειτουργικές απαιτήσεις, αρχιτεκτονική και σχεδίαση UI/UX.
- Κεφάλαιο 6: Τεχνική Υλοποίηση. Αναλύει το audio pipeline, το haptic engine, τους αλγόριθμους και τις τεχνικές επιλογές/βελτιστοποιήσεις.
- Κεφάλαιο 7: Μεθοδολογία Αξιολόγησης. Περιγράφει δείγμα, πρωτόκολλο δοκιμών, ερωτηματολόγιο (φίλτρα, passband, mic mode) και μετρικές.
- Κεφάλαιο 8: Αποτελέσματα. Παρουσιάζει ποσοτικά ευρήματα (πίνακες/διαγράμματα) και ποιοτικές παρατηρήσεις χρηστών.
- Κεφάλαιο 9: Συζήτηση. Ερμηνεύει τα ευρήματα σε σχέση με τη βιβλιογραφία, καταγράφει περιορισμούς και επιπτώσεις για προσβασιμότητα.
- Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία. Συνοψίζει τη συνεισφορά και προτείνει κατευθύνσεις βελτίωσης/έρευνας.

Στο τέλος παρατίθενται η Βιβλιογραφία (σύμφωνα με το πρότυπο της σχολής) και Παραρτήματα με το πλήρες ερωτηματολόγιο, πρόσθετα διαγράμματα, στιγμιότυπα οθόνης και τεχνικές λεπτομέρειες.

# Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο Ήχου

## 2.1 Βασικές έννοιες ακουστικής

Ο ήχος είναι μια μηχανική διαταραχή που διαδίδεται σε ελαστικό μέσο (αέρας, υγρά, στερεά) υπό μορφή διαμήκων κυμάτων πίεσης. Τα βασικά φυσικά μεγέθη που τον περιγράφουν είναι η συχνότητα, το πλάτος, ο χρόνος και το φάσμα, τα οποία αντιστοιχούν σε αντιληπτές παραμέτρους όπως ύψος, ένταση, διάρκεια και ηχόχρωμα. Η συχνότητα μετριέται σε Hz και εκφράζει τον αριθμό επαναλήψεων της περιοδικής ταλάντωσης ανά δευτερόλεπτο, ενώ το πλάτος σχετίζεται με τη διακύμανση της ηχητικής πίεσης σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση ηρεμίας.[4]

Η ένταση του ήχου εκφράζεται συνήθως ως στάθμη ηχητικής πίεσης σε dB SPL, σε λογαριθμική κλίμακα ως προς μια τιμή αναφοράς. Αύξηση κατά 10 dB αντιστοιχεί σε δεκαπλασιασμό της φυσικής ισχύος του σήματος, αλλά γίνεται αντιληπτή περίπου ως διπλασιασμός της υποκειμενικής έντασης, γεγονός που καταδεικνύει την μη γραμμική απόκριση του ακουστικού συστήματος. Σημαντική είναι και η έννοια του κατωφλίου ακοής, δηλαδή της ελάχιστης στάθμης πίεσης που μπορεί να ανιχνεύσει ένας τυπικός ακροατής για κάθε συχνότητα, η οποία χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς σε πρότυπα καμπυλών ίσης ακουστότητας όπως το ISO 226.[4],[3]

### 2.1.1 Ιδιότητες μετάδοσης και φάσματος

Η διάδοση του ήχου στο χώρο επηρεάζεται από την απορρόφηση, τη σκέδαση και τις ανακλάσεις στις επιφάνειες, οδηγώντας σε σύνθετα πεδία ήχου με άμεση και ανακλώμενη συνιστώσα. Σε κλειστούς χώρους, ο χρόνος αντήχησης και το φασματικό περιεχόμενο των ανακλάσεων επηρεάζουν καθοριστικά τόσο την ευκρίνεια του σήματος όσο και την υποκειμενική αίσθηση «ζωντάνιας» ή «περιβάλλοντος» (envelopment). Η φασματική ανάλυση μέσω διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT/FFT) επιτρέπει την αναπαράσταση ενός χρονικού σήματος ως άθροισμα αρμονικών συνιστωσών, και αποτελεί βασικό εργαλείο στην ανάλυση και επεξεργασία ψηφιακού ήχου. Ο Μετασχηματισμός Fourier γράφεται ως εξής:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

Όπου:

- $X(f)$  είναι το φάσμα του σήματος  $x(t)$ , δηλαδή η αναπαράσταση του σήματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα.
- $t$  είναι ο χρόνος.
- $f$  είναι η συχνότητα. [1],[54]

**Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT):**

$$x[k] = \sum_{n=0}^{N-1} \chi[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.2)$$

- $\mathbf{x[n]}$ : η είσοδος του σήματος στον χρόνο ή δείγμα  $n$ , για  $n = 0, 1, \dots, N-1$ . Πρόκειται για τα διακριτά δεδομένα που θέλουμε να αναλύσουμε.
- $\mathbf{x[k]}$ : η έξοδος του DFT στο δείγμα συχνότητας  $k$ . Αντιπροσωπεύει την ποσότητα (πλάτος και φάση) της συχνότητας  $k$  που περιέχεται στο σήμα  $x[n]$ .
- $\mathbf{N}$ : ο συνολικός αριθμός δειγμάτων του σήματος.
- $\mathbf{j}$ : η μονάδα φανταστικού αριθμού ( $j^2 = -1$ )
- $\frac{2\pi}{N}\mathbf{kn}$ : το γωνιακό πολλαπλασιαστικό που καθορίζει την αντιστοίχιση μεταξύ δείγματος χρόνου

n και δείγματος συχνότητας k. [54]

Στα ηχητικά σήματα μουσικών οργάνων, ο τόνος περιγράφεται ως θεμελιώδης συχνότητα μαζί με ένα πλήθος μερικών (partials), οι οποίες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους και ονομάζονται αρμονικές. Το σχετικό πλάτος και η κατανομή αυτών των αρμονικών καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το ηχόχρωμα του οργάνου, καθώς και την αντιληπτή «λαμπρότητα» ή «σκοτεινότητα» του ήχου. Επιπλέον, μορφολογικά χαρακτηριστικά στο χρόνο, όπως η προσβολή (attack), η φάση απόσβεσης, η διατήρηση και η αποδέσμευση (ADSR envelope), διαφοροποιούν ακόμη και ήχους με παρόμοιο φάσμα στιγμιαία, συμβάλλοντας στην αναγνώριση της πηγής.[4]

### 2.1.2 Ψυχοακουστικές παράμετροι: ύψος, ένταση, διάρκεια

Η ψυχοακουστική μελετά τη σχέση ανάμεσα στις φυσικές ιδιότητες του ήχου και στα αντίστοιχα αντιληπτικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιώντας πειραματικές μεθόδους και μοντέλα ακοής. Η συχνότητα αντιστοιχεί αντιληπτικά στο ύψος (pitch), αλλά η σχέση τους δεν είναι γραμμική και επηρεάζεται από παράγοντες όπως η ένταση, η διάρκεια και η φασματική δομή του σήματος. Επιπλέον, θεωρίες όπως η place theory και η periodicity theory εξηγούν το ύψος είτε ως αποτέλεσμα χωρικής διέγερσης στη βασική μεμβράνη είτε ως κωδικοποίηση της χρονικής περιοδικότητας, με τα σύγχρονα μοντέλα να συνδυάζουν στοιχεία και από τις δύο προσεγγίσεις.[4]

Η ένταση σχετίζεται με το πλάτος της ηχητικής πίεσης, όμως η υποκειμενική «ηχηρότητα» (loudness) εξαρτάται από τη συχνότητα και το φασματικό περιεχόμενο. Οι καμπύλες ίσης ακουστότητας (equal-loudness contours), όπως τυποποιούνται στο ISO 226:2023, περιγράφουν τους συνδυασμούς συχνότητας και στάθμης SPL που γίνονται αντιληπτοί ως εξίσου δυνατοί, και αποτελούν θεμέλιο για πρότυπα υπολογισμού της ηχηρότητας (π.χ. ISO 532, ECMA-418-2). Σε ψυχοακουστικά πειράματα χρησιμοποιούνται έννοιες όπως το «μόλις αντιληπτό διαφοράς» (just noticeable difference) για τη μελέτη της ικανότητας διάκρισης ύψους ή έντασης, αναδεικνύοντας τα όρια ανάλυσης του ακουστικού συστήματος.[4],[3]

Η χρονική διάσταση του ήχου αποτυπώνεται στην αντίληψη της διάρκειας, του ρυθμού, του ρυθμικού μέτρου και του τέμπο, τα οποία δομούν τον μουσικό χρόνο. Ο ρυθμός βασίζεται σε σχετικές και όχι απόλυτες διάρκειες, γεγονός που εξηγεί γιατί ένα μοτίβο διατηρείται αναγνωρίσιμο ακόμη και όταν αλλάζει το τέμπο συνολικά. Πειραματικά έχει βρεθεί ότι οι άνθρωποι έχουν περιορισμένο εύρος τιμών όπου μπορούν να «κουμπώσουν» άνετα σε παλμό (beat), ενώ ακραία αργοί ή γρήγοροι ρυθμοί δυσκολεύουν την οργάνωση του ακουστικού χρόνου σε νοητικό επίπεδο.[4]

### 2.1.3 Ηχόχρωμα και φασματική δομή

Το ηχόχρωμα (timbre) είναι η ποιότητα του ήχου που επιτρέπει τη διάκριση δύο πηγών με ίδιο ύψος, ένταση και διάρκεια, όπως για παράδειγμα ένα βιολί και μία τρομπέτα που παίζουν την ίδια νότα. Εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες, όπως το φασματικό περιεχόμενο (αρμονικές και αναρμονικές συνιστώσες), τη χρονική περιβάλλουσα, μικροδιακυμάνσεις ύψους και έντασης, καθώς και από μη γραμμικά φαινόμενα της πηγής. Στην ανάλυση μουσικών τόνων, διακρίνονται η θεμελιώδης συχνότητα και οι επιμέρους αρμονικές/μη αρμονικές συνιστώσες, ενώ ζώνες συχνοτήτων που ενισχύονται σταθερά για συγκεκριμένη φωνή ή όργανο ονομάζονται formants και λειτουργούν ως «δακτυλικά αποτυπώματα» της φωνητικής ή οργανικής πηγής.[4]

Τα ψυχοακουστικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε σύγχρονα πρότυπα ηχηρότητας περιλαμβάνουν στάδια προσομοίωσης του εξωτερικού/μέσου αυτιού, φίλτρα ακουστικών ζωνών, μη γραμμική συμπίεση και υπολογισμό μερικής ηχηρότητας ανά ζώνη, ώστε να προσεγγίσουν καλύτερα την πραγματική αντίληψη του ακροατή. Αυτά τα μοντέλα αξιοποιούνται σε εφαρμογές όπως αποτίμηση ποιότητας ήχου, σχεδιασμός ηχητικών διαπαφών και βελτιστοποίηση ακουστικής αναπαραγωγής, όπου η υποκειμενική αντίληψη είναι εξίσου σημαντική με τα φυσικά μεγέθη.[3]

## 2.2 Ψηφιακή επεξεργασία σήματος

Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος (Digital Signal Processing, DSP) ασχολείται με την αναπαράσταση, ανάλυση και τροποποίηση σημάτων σε διακριτή μορφή, με χρήση αλγορίθμων που εκτελούνται σε υπολογιστικά συστήματα ή ψηφιακούς επεξεργαστές. Στον τομέα του ήχου, η DSP επιτρέπει την υλοποίηση λειτουργιών όπως φιλτράρισμα, ανάλυση φάσματος, δυναμική επεξεργασία και χωρική αναπαραγωγή, οι οποίες είναι κρίσιμες για εφαρμογές όπως η μουσική παραγωγή, η συμπίεση ήχου και οι διαδραστικές διαπαφές. Στο πλαίσιο μιας εφαρμογής που μετατρέπει τον

ήχο σε απτική δόνηση, η DSP αποτελεί το βασικό εργαλείο για την εξαγωγή των κατάλληλων χαρακτηριστικών από το ακουστικό σήμα και τη χαρτογράφησή τους στο απτικό κανάλι.[1]

Η τυπική αλυσίδα επεξεργασίας ξεκινά με τη δειγματοληψία και κβάντιση του αναλογικού σήματος, όπου ο αναλογικός-σε-ψηφιακός μετατροπέας (ADC) μετατρέπει την συνεχή κυματομορφή σε διακριτά δείγματα σε ρυθμό δειγματοληψίας  $f_s$ . Σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist, ο ρυθμός δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιος της μέγιστης συχνότητας του σήματος, ώστε να αποφεύγεται aliasing και να είναι εφικτή η ανάκτηση του σήματος μετά την επεξεργασία. Μετά την ψηφιοποίηση, τα σήματα μπορούν να υπόκεινται σε φιλτράρισμα, τροποποίηση δυναμικής περιοχής, χρονικές μετατοπίσεις ή σύνθετες μετασχηματίσεις χώρου-συχνότητας, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.[1]

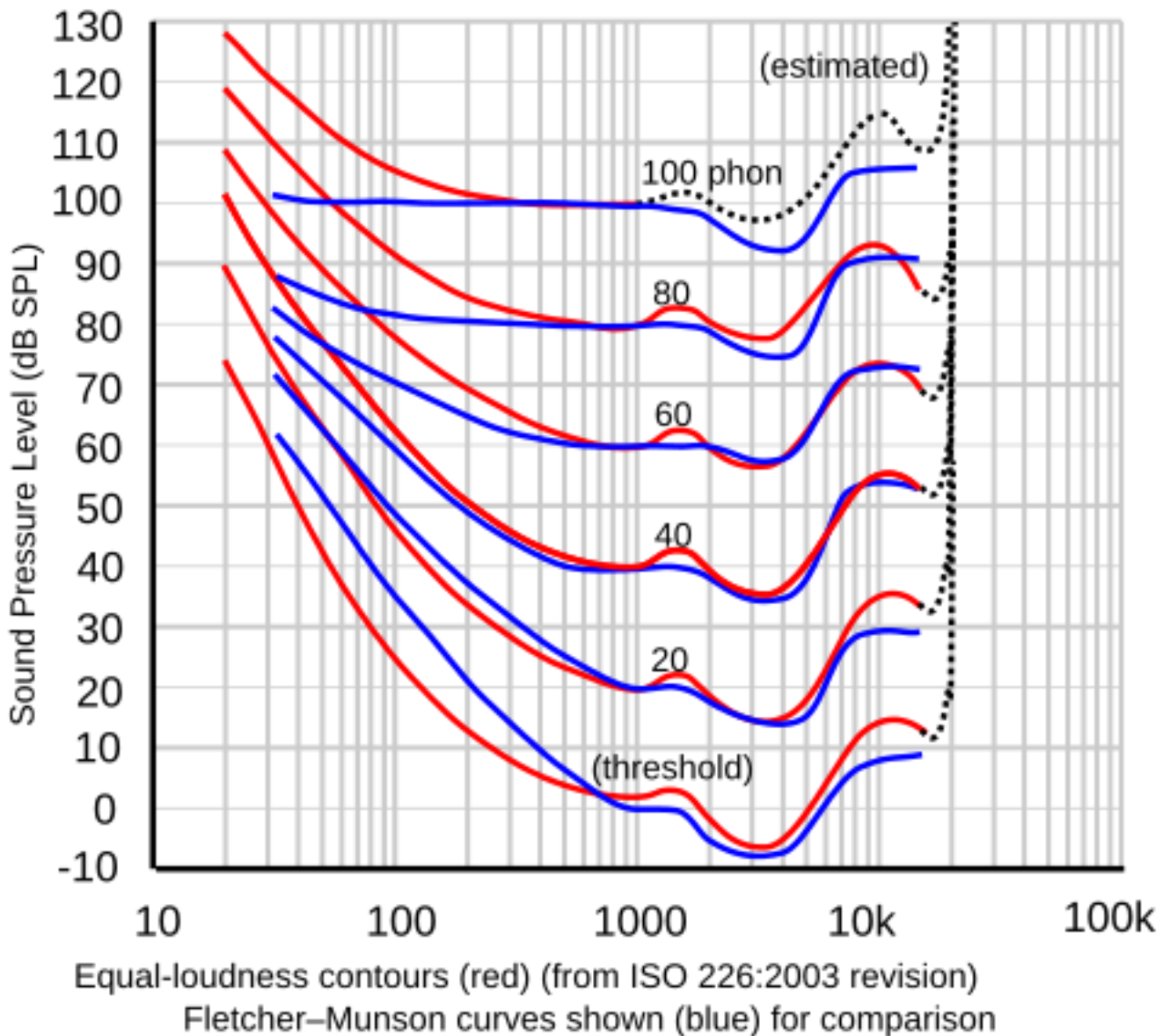
### 2.2.1 Αναπαράσταση και ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας

Για την ανάλυση της φασματικής δομής ενός σήματος, κεντρικό εργαλείο αποτελεί ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) και η υπολογιστικά αποδοτική υλοποίησή του, ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier (FFT). Ο DFT επιτρέπει την αναπαράσταση ενός χρονικού σήματος ως άθροισμα ημιτονικών συνιστωσών με διαφορετικές συχνότητες, πλάτη και φάσεις, γεγονός που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για μουσικά σήματα όπου η θεμελιώδης συχνότητα και οι αρμονικές συνιστώσες συνδέονται με αντιληπτές ιδιότητες όπως το ύψος και το ηχώχρωμα. Η χρήση παραθύρων (windowing), όπως Blackman ή Hamming, μειώνει τα φαινόμενα διαρροής φάσματος (spectral leakage) και βελτιώνει την ακρίβεια της φασματικής εκτίμησης, κάτι κρίσιμο για σταθερή και αξιόπιστη εξαγωγή χαρακτηριστικών σε πραγματικό χρόνο.[4],[1]

Συστήματα με χρονικά αμετάβλητη γραμμική συμπεριφορά (LTI) περιγράφονται πλήρως από την κρουστική απόκριση  $h[n]$  και τη συνάρτηση μεταφοράς τους στο πεδίο  $Z$  ή στο πεδίο της συχνότητας. Η συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου μεταξύ του σήματος εισόδου και της κρουστικής απόκρισης, ή ισοδύναμα ο πολλαπλασιασμός στο φάσμα συχνοτήτων, επιτρέπει την εφαρμογή φίλτρων για την ενίσχυση ή απόσβεση συγκεκριμένων ζωνών συχνοτήτων. Στον ήχο, τέτοια φίλτρα χρησιμοποιούνται από απλές διορθώσεις τόνου μέχρι πολύπλοκα εφέ όπως flanger, chorus, echo και προσομοίωση χώρων, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν πηγές χαρακτηριστικών και για απτικές αναπαραστάσεις (π.χ. διαφοροποίηση υφής δόνησης). [1]

### 2.2.2 Ψυχοακουστικά μοντέλα και ηχηρότητα

Η κλασική DSP περιγράφει τα σήματα σε φυσικούς όρους (πλάτος, ενέργεια, φάσμα), όμως σε πολλές εφαρμογές ενδιαφέρει η αντιληπτή ένταση και ποιότητα του ήχου, κάτι που μελετά η ψυχοακουστική.



Εικόνα 2.1: Equal Loudness contours [46]

Η ηχηρότητα (loudness) εξαρτάται από τη συχνότητα και το φασματικό περιεχόμενο του σήματος και όχι μόνο από την συνολική στάθμη SPL, γεγονός που περιγράφεται από τις καμπύλες ίσης ακουστότητας (equal-loudness contours) του προτύπου ISO 226:2023. Σύγχρονα πρότυπα υπολογισμού ηχηρότητας, όπως τα ISO 532-1, ISO 532-3 και το ECMA 418-2, βασίζονται σε μοντέλα ακοής που ενσωματώνουν φίλτρα εξωτερικού/μέσου αυτιού, τράπεζα ακουστικών φίλτρων και μη γραμμική συμπίεση για να προσεγγίσουν την πραγματική αντίληψη του ακροατή.[4],[3]

Τα μοντέλα αυτά επιτρέπουν τον υπολογισμό καμπυλών ίσης ηχηρότητας με μεγάλη ακρίβεια, και η σύγκριση τους με τα δεδομένα του ISO 226:2023 δείχνει ότι μέθοδοι όπως η ECMA 418-2 παρουσιάζουν χαμηλό μέσο τετραγωνικό σφάλμα σε σχέση με τις πειραματικές καμπύλες. Για μια εφαρμογή που μετατρέπει τον ήχο σε απτική δόνηση, η χρήση ψυχοακουστικών μεγεθών, αντί μόνο φυσικών μεγεθών όπως το RMS πλάτος, επιτρέπει πιο σταθερή αντιστοίχιση μεταξύ αλλαγών στην ηχηρότητα και αλλαγών στην ένταση ή στην πυκνότητα των απτικών ερεθισμάτων, αυξάνοντας τη χρηστικότητα για τον τελικό χρήστη.[3] [24] [1]

### 2.2.3 DSP στον ήχο και σχέση με audio-to-haptics

Στην επεξεργασία ηχητικών σημάτων, η DSP χρησιμοποιείται ευρέως για καθυστέρηση (delay), χωρικά εφέ, δυναμική επεξεργασία και μη γραμμική παραμόρφωση, με σκοπό τη διαμόρφωση της αντιληπτής ποιότητας του ήχου. Τεχνικές όπως τα comb filters, οι FIR και IIR δομές, καθώς και πολύπλοκες διατάξεις φίλτρων (filter banks), επιτρέπουν την απομόνωση ή τροποποίηση συγκεκριμένων περιοχών του φάσματος, κάτι που μπορεί να αξιοποιηθεί και σε σχήματα χαρτογράφησης σε απτική δόνηση (π.χ. διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων να αντιστοιχούν σε διαφορετικούς δονητές ή μοτίβα δόνησης). Η καλή κατανόηση των ψηφιακών φίλτρων και της συμπεριφοράς τους είναι βασική για τον σχεδιασμό σταθερών, αποδοτικών και υποκειμενικά “φυσικών” απτικών αναπαραστάσεων, ειδικά όταν η εφαρμογή λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο.[3][1]

Παράλληλα, τα ψυχοακουστικά χαρακτηριστικά όπως το pitch, η ηχηρότητα, η διάρκεια και το ηχόχρωμα, τα οποία αναλύονται εκτενώς στη σχετική βιβλιογραφία, προσφέρουν έναν φυσικό ενδιάμεσο χώρο μεταξύ φυσικής DSP και ανθρώπινης αντίληψης. Έτσι, μια σύγχρονη προσέγγιση στη σχεδίαση συστημάτων audio-to-haptics συνδυάζει κλασικές τεχνικές DSP (δειγματοληψία, FFT, φίλτρα, ανάλυση χρόνου-συχνότητας) με ψυχοακουστικά μοντέλα (ISO 226, ISO 532, ECMA 418-2) ώστε η απτική κωδικοποίηση να αντικατοπτρίζει όσο γίνεται καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τον ήχο.[4][3]

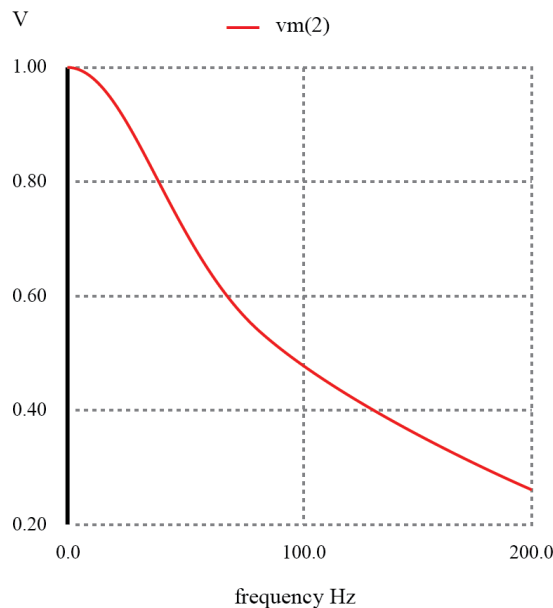
### 2.3 Φίλτρα (low/high/band-pass, weighting filters A/C/Z, equal-loudness)

Τα φίλτρα αποτελούν θεμελιώδες εργαλείο στην επεξεργασία σήματος, καθώς επιτρέπουν την επιλεκτική ενίσχυση ή εξασθένηση συγκεκριμένων περιοχών του φάσματος.

#### Τυπικά φασματικά φίλτρα

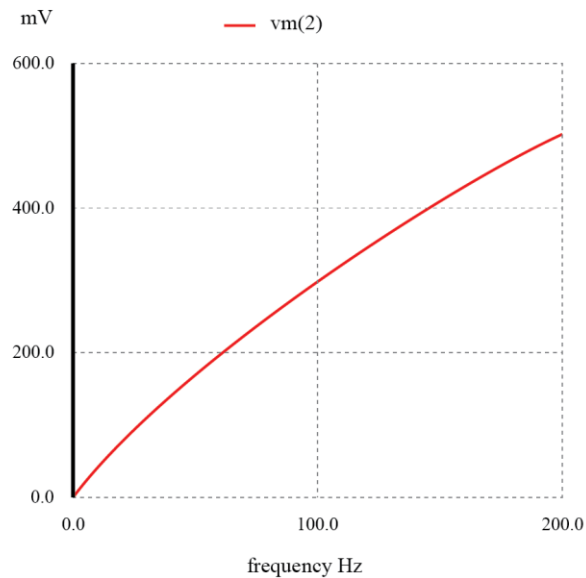
Ανάλογα με το ποιο τμήμα του φάσματος περνάει, διακρίνουμε:

- **Φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων (low-pass):** επιτρέπει τη διέλευση συχνοτήτων κάτω από μια συχνότητα αποκοπής, αποκόποντας τις υψηλότερες.[2]



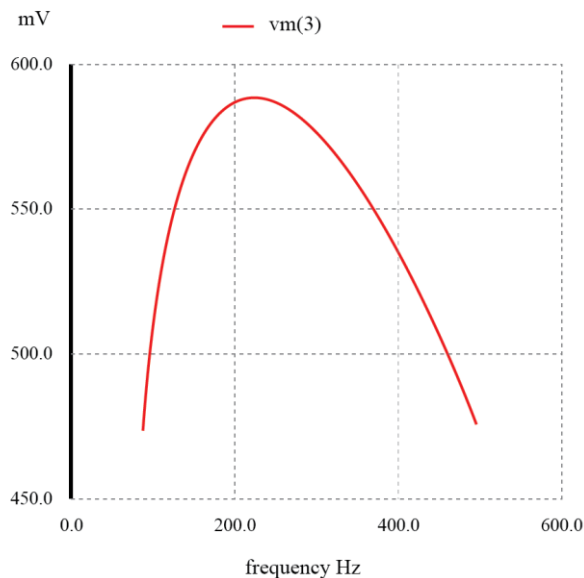
Εικόνα 2.2: Low-pass filter [47]

- **Φίλτρο υψηλών συχνοτήτων (high-pass):** επιτρέπει τη διέλευση συχνοτήτων πάνω από μια συχνότητα αποκοπής, εξασθενίζοντας τις χαμηλότερες.[29]



Εικόνα 2.3: High-pass filter [48]

- **Φίλτρο ζώνης συχνοτήτων (band-pass):** επιτρέπει τη διέλευση μιας συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων μεταξύ δύο ορίων (κάτω και άνω συχνότητα αποκοπής) και αποκόπτει τις υπόλοιπες. [30]



Εικόνα 2.4: Band-pass filter [49]

Στο πλαίσιο της εφαρμογής, το band-pass φίλτρο που ορίζεται μέσω του passband (π.χ. 40–280 Hz) χρησιμοποιείται για να δοθεί έμφαση σε συχνότητες που μεταφέρονται πιο αποτελεσματικά ως απτική δόνηση.

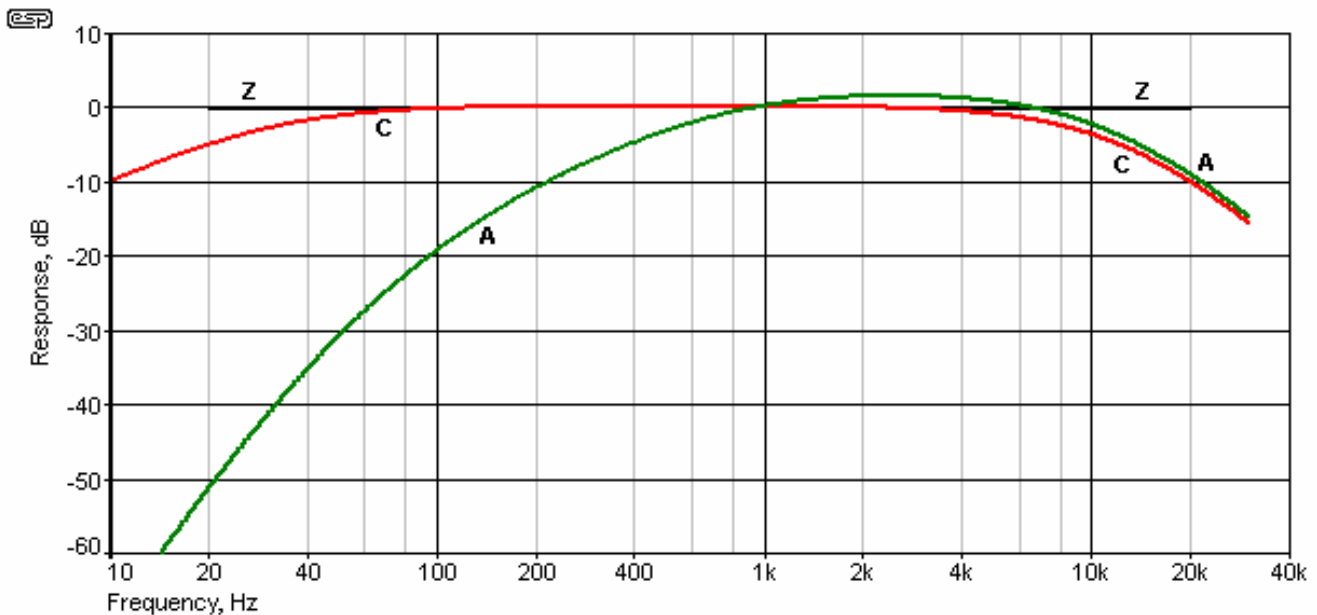
### 2.3.1 Φίλτρα στάθμισης (weighting filters A, C, Z)

Η ανθρώπινη ακοή δεν είναι το ίδιο ευαίσθητη σε όλες τις συχνότητες. Για την εκτίμηση της αντιληπτής έντασης έχουν αναπτυχθεί φίλτρα στάθμισης, τα οποία προσεγγίζουν την απόκριση του ανθρώπινου αυτιού:

- **A-weighting:** αποδίδει μειωμένη βαρύτητα στις πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές συχνότητες, προσεγγίζοντας την ακουστική ευαισθησία σε σχετικά χαμηλές στάθμες. Χρησιμοποιείται συχνά σε μετρήσεις θορύβου περιβάλλοντος.
- **C-weighting:** παρουσιάζει πιο «επίπεδη» απόκριση σε σχέση με το A-weighting, διατηρώντας περισσότερο τις χαμηλές συχνότητες. Είναι κατάλληλο για υψηλότερες στάθμες ήχου.

- **Z-weighting**(Zero weighting): ουσιαστικά αντιστοιχεί σε σχεδόν επίπεδη (flat) συχνοτική απόκριση, χωρίς σημαντική στάθμιση του φάσματος.

Τα φίλτρα αυτά συνδέονται με τις καμπύλες ίσης ακουστότητας (equal-loudness contours), οι οποίες δείχνουν ότι για να γίνει ένας ήχος αντιληπτός ως εξίσου δυνατός σε διαφορετικές συχνότητες, απαιτούνται διαφορετικές φυσικές στάθμες. Αντίστοιχη λογική μπορεί να εφαρμοστεί και στην απτική αντίληψη: κάποιες συχνότητες δόνησης γίνονται αντιληπτές ως πιο έντονες από άλλες, ακόμη και όταν η φυσική ενέργεια είναι ίδια.



Εικόνα 2.5: Καμπύλες απόκρισης συχνότητας A,C,Z [50]

Στην εφαρμογή, η χρήση διαφορετικών φίλτρων (Flat, A-weight, C-weight, Z-weight ή άλλων προσαρμοσμένων σχημάτων) επιτρέπει την εξερεύνηση του πώς μεταβάλλεται η υποκειμενική εμπειρία της δόνησης όταν το φάσμα του ήχου τροποποιείται πριν τη μετατροπή του σε απτική ανάδραση.[31]

## 2.4 Ρυθμός, beat και χρονικές δομές στη μουσική

Ο χρόνος αποτελεί μία από τις βασικές διαστάσεις του ήχου, δίνοντας ζωή και δομή στη μουσική μέσω παραμέτρων όπως η διάρκεια, ο ρυθμός, το τέμπο και το μέτρο. Σε αντίθεση με τις φυσικές ιδιότητες συχνότητας και πλάτους, η χρονική διάσταση βασίζεται σε ψυχοακουστικές διεργασίες που οργανώνουν τον ήχο σε νοητικά πλαίσια, επιτρέποντας στον ακροατή να εξάγει κανονικότητα και πρόβλεψη από ένα συνεχές ηχητικό ρεύμα. Στο πλαίσιο εφαρμογών audio-to-haptics, η κωδικοποίηση αυτών των χρονικών δομών σε απτικές δονήσεις είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική, καθώς τόσο το ακουστικό όσο και το απτικό σύστημα παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία σε περιοδικά μοτίβα και παλμούς.[4]

### 2.4.1 Beat και tempo

Το beat ορίζεται ως ψυχολογικό χαρακτηριστικό οργάνωσης της μουσικής, παρέχοντας ένα σταθερό πλαίσιο αναφοράς για τον ακροατή. Οι άνθρωποι διαθέτουν έμφυτη ικανότητα εξαγωγής τακτικού παλμού από μουσικά σήματα, ικανότητα που συνδέεται με ακουστικοκινητικά δίκτυα του εγκεφάλου και είναι καθολική σε όλους τους πολιτισμούς. Το tempo εκφράζει τον ρυθμό εμφάνισης των beats, με τυπικές τιμές μεταξύ 60-168 beats per minute (BPM), ενώ ρυθμοί κάτω από 42 BPM ή πάνω από 168 BPM γίνονται δύσκολα αντιληπτοί ως οργανωμένοι παλμοί.[4]

Το tempo επηρεάζει έντονα την συναισθηματική αντίληψη της μουσικής, με αργά τέμπο να συνδέονται με μελαγχολία και γρήγορα με ενθουσιασμό, αν και οι ακριβείς συσχετίσεις ποικίλλουν πολιτισμικά. Πειραματικά, το ελάχιστο διάστημα για μετρική οργάνωση beats είναι 100 ms, ενώ για διαστήματα άνω των 1800 ms ο παλμός γίνεται μη αντιληπτός ως τέτοιος.[4]

### 2.4.2 Μέτρο και ρυθμός

Το μέτρο αναφέρεται στην εναλλαγή ισχυρών και αδύναμων beats, δημιουργώντας μια ιεραρχία χρονικής έμφασης (π.χ. δυαδικό 4/4 ή τριαδικό 3/4). Ακόμη και σε μουσική χωρίς ρητή μετρική δομή, οι ακροατές τείνουν να επιβάλλουν υποκειμενική μετρική οργάνωση, φαινόμενο γνωστό ως subjective rhythmization. Ο ρυθμός ορίζεται ως τα χρονικά μοτίβα που δημιουργούνται από τις διάρκειες των μουσικών σημείων καθώς η μουσική ξετυλίγεται, με χαρακτηριστικό ότι βασίζεται σε σχετικές και όχι απόλυτες χρονικές κλίμακες.[4]

Αυτό σημαίνει ότι ένα ρυθμικό μοτίβο παραμένει αναγνωρίσιμο ακόμη και αν το συνολικό τέμπο επιταχύνει ή επιβραδύνει, καθώς οι αναλογίες διαρκειών μεταξύ σημείων διατηρούνται σταθερές. Η σημασία του ρυθμού είναι τέτοια ώστε μερικές φορές μια μελωδία να αναγνωρίζεται αποκλειστικά από το ρυθμικό της μοτίβο, ανεξάρτητα από τις τονικότητες.[4]

### 2.4.3 Σχέση με DSP και audio-to-haptics

Στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος, η ανάλυση χρονικών δομών απαιτεί αλγορίθμους εξαγωγής beat και tempo (beat tracking), συχνά βασισμένους σε onset detection, φασματική ανάλυση και autocorrelation του περιβάλλοντος ενέργειας του σήματος. Η κρουστική απόκριση φίλτρων καθυστέρησης (delays) και τα comb filters, που χρησιμοποιούνται σε εφέ όπως echo και chorus, βασίζονται σε περιοδικές χρονικές δομές παρόμοιες με αυτές του ρυθμού, επιτρέποντας την προσομοίωση χρονικών μεταβολών στο φάσμα του ήχου. [1]

Για εφαρμογές audio-to-haptics, η χαρτογράφηση ρυθμού και τέμπο σε απτική δόνηση είναι ιδιαίτερα φυσική: τα beats μπορούν να μετατραπούν σε περιοδικούς παλμούς δόνησης συγχρονισμένους με το BPM, ενώ τα μετρικά μοτίβα σε διαφορετικές έντασης ή διάρκειας δονήσεις. Η χρήση σχετικών χρονικών κλιμάκων επιτρέπει προσαρμογή του απτικού ρυθμού σε διαφορετικά τέμπο χωρίς απώλεια αναγνωρισιμότητας του μοτίβου, ενώ η ψυχοακουστική γνώση των ορίων αντίληψης (100-1800 ms) καθοδηγεί τον σχεδιασμό ώστε να αποφεύγονται μη φυσικές ταχύτητες δόνησης.[4][1]

## Κεφάλαιο 3ο: Απτική αντίληψη και Audio–Tactile Mapping

Η σύγχρονη βιβλιογραφία για audio-tactile συστήματα τονίζει ότι η απτική αντίληψη δόνησης μπορεί να λειτουργήσει είτε συμπληρωματικά είτε αντισταθμιστικά προς την ακοή, επιτρέποντας σε χρήστες –και ειδικά σε άτομα με προβλήματα ακοής– να αποκτήσουν πρόσβαση σε πληροφορίες ρυθμού, δυναμικής και δομής της μουσικής. Ανασκοπήσεις όπως η “Audio-Tactile Rendering: A Review on Technology and Methods to Convey Musical Information through the Sense of Touch” και η “Tactile displays for auditory augmentation” συγκεντρώνουν μεγάλο εύρος πειραματικών και τεχνολογικών εργασιών και καταλήγουν ότι η επιτυχία τέτοιων συστημάτων εξαρτάται από συνδυασμό σωστού σχεδιασμού δόνησης, κατάλληλων συσκευών και προσεκτικά μελετημένων τεχνικών mapping ήχου-δόνησης. Παράλληλα, η ανασκόπηση “Recent developments in haptic devices designed for hearing-impaired people” δείχνει ότι τα τελευταία χρόνια έχει υπάρξει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για συσκευές που επιτρέπουν σε κωφούς και βαρήκοους να βιώνουν τη μουσική και άλλα ακουστικά γεγονότα μέσω της αφής, με διαφορετικούς βαθμούς πολυπλοκότητας και φορητότητας.[9][16][14]

### 3.1 Φυσιολογία της αφής και αντίληψη δόνησης

Οι ανασκοπήσεις για audio-tactile rendering και tactile displays περιγράφουν συνοπτικά τη λειτουργία των μηχανοϋποδοχέων του δέρματος (π.χ. υποδοχείς τύπου Pacini, Meissner κ.λπ.), τονίζοντας ότι διαφορετικοί υποδοχείς είναι πιο ευαίσθητοι σε συγκεκριμένα εύρη συχνοτήτων και τύπους μηχανικής διέγερσης, κάτι που καθορίζει άμεσα τον σχεδιασμό των vibrotactile συστημάτων. Στην εργασία “Tactile displays for auditory augmentation” επισημαίνεται ότι η παλαμιαία επιφάνεια του χεριού και τα δάκτυλα διαθέτουν ιδιαίτερα υψηλή πυκνότητα απτικών υποδοχέων, γεγονός που τα καθιστά προτιμώμενα σημεία τοποθέτησης απτικών ενεργοποιητών όταν στόχος είναι η λεπτομερής κωδικοποίηση ακουστικής πληροφορίας. Η ανασκόπηση “Recent developments in haptic devices designed for hearing-impaired people” συμπληρώνει ότι, πέρα από τα χέρια, συχνά αξιοποιούνται και άλλες περιοχές του σώματος (βραχίονας, κορμός, πλάτη, καθίσματα), όπου η φυσιολογία της αφής επιτρέπει μεν λιγότερο λεπτή διάκριση αλλά παρέχει μεγαλύτερη επιφάνεια και δυνατότητα έντονης vibrotactile εμπειρίας σε χαμηλές συχνότητες που σχετίζονται με μουσική μπάσο.[16][14][9]

Στην πειραματική εργασία “Multichannel Vibrotactile Glove: Validation of a New Device Designed to Sense Vibrations” εξετάζεται ένα γάντι με πολλούς ενεργοποιητές σε διάφορα σημεία του χεριού, και καταγράφεται ότι οι συμμετέχοντες μπορούν να διακρίνουν διακριτά κανάλια δόνησης όταν τα κανάλια τοποθετούνται σε επαρκώς απομακρυσμένες ανατομικές περιοχές και οι παράμετροι διέγερσης (συχνότητα, ένταση) προσαρμόζονται στα τοπικά κατώφλια. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δείχνουν ότι η χωρική οργάνωση των tactors σε συνδυασμό με την εγγενή φυσιολογία της αφής επιτρέπει τη δημιουργία πολυκαναλικών audio-tactile αναπαραστάσεων, στις οποίες διαφορετικά μέρη του ήχου (π.χ. μπάσο, μεσαία, κρουστά) μπορούν να αντιστοιχηθούν σε διαφορετικά σημεία του χεριού για καλύτερη διαχωριστικότητα. Επιπλέον, ο Hatzfeld και οι συνεργάτες του, στην εργασία “Influence of surgical gloves on haptic perception thresholds”, δείχνουν ότι η παρεμβολή λεπτών υλικών (όπως τα χειρουργικά γάντια) αυξάνει τα απτικά κατώφλια και μειώνει την ικανότητα διάκρισης μικρών διαφορών δόνησης, γεγονός που έχει άμεσο ενδιαφέρον για φορετά audio-tactile συστήματα που στηρίζονται σε επαφή μέσω υφασμάτων, λαστίχων ή άλλων προστατευτικών υλικών.[12][11][14][9]

### 3.2 Μοντελοποίηση δονητικών ενεργοποιητών

Η απτική δόνηση σε κινητές συσκευές παράγεται από ηλεκτρομηχανικούς ενεργοποιητές (actuators) που διεγείρουν μηχανικά το σασί/πλαίσιο της συσκευής, μεταφέροντας επιταχύνσεις στο σημείο επαφής με το χέρι. Στην πράξη, η συμπεριφορά ενός actuator δεν είναι “επίπεδη” ως προς τη συχνότητα, αλλά χαρακτηρίζεται από συντονισμό (resonance) και απόσβεση, άρα η ίδια ηλεκτρική διέγερση μπορεί να δώσει διαφορετική απτική ένταση ανάλογα με τη συχνότητα οδήγησης και τη μηχανική ενσωμάτωση (loading).[27][32]

#### Μοντέλο 2ης τάξης (Mass–Spring–Damper)

Ένα καθιερωμένο μοντέλο για δονητικούς μηχανισμούς είναι το SDOF (single degree of freedom) μοντέλο μάζας–ελατηρίου–απόσβεσης. Η εξίσωση κίνησης με εξωτερική δύναμη  $F(t)$  είναι:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (3.1)$$

όπου  $m$  είναι η ισοδύναμη μάζα,  $c$  η απόσβεση και  $k$  η δυσκαμψία, ενώ  $x(t)$  η μετατόπιση. Η φυσική ιδιογωνιακή συχνότητα είναι:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.2)$$

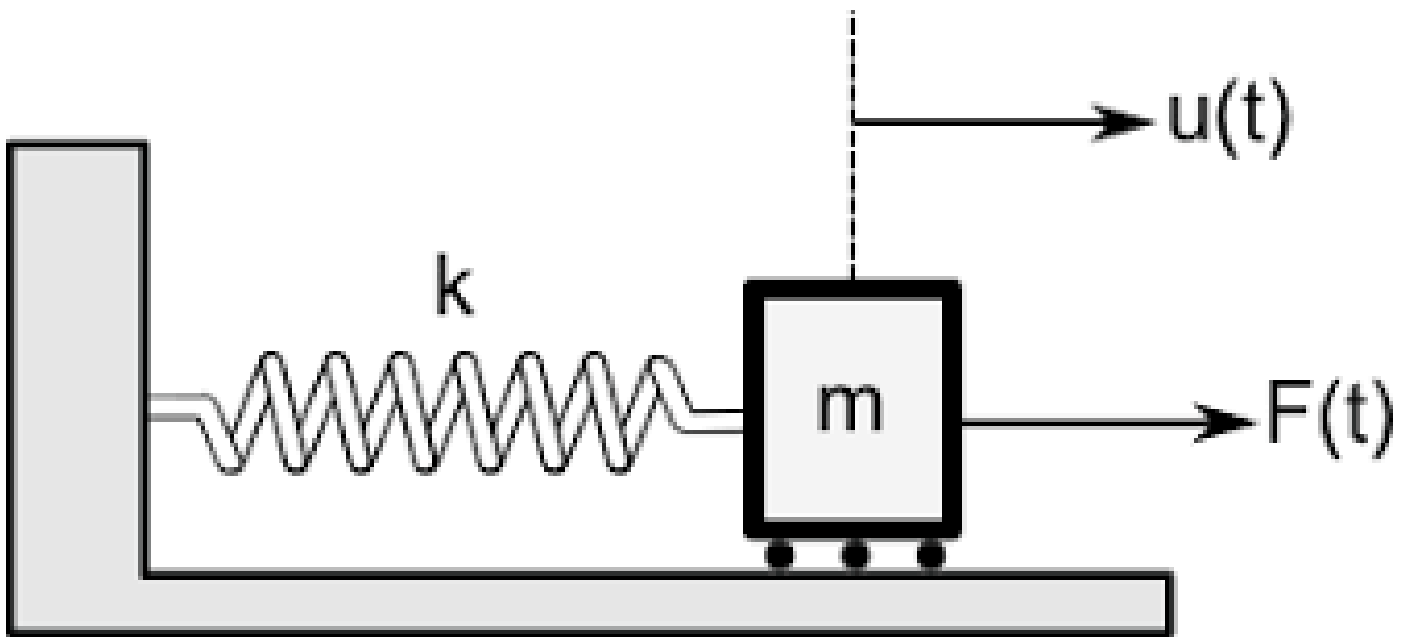
και η ιδιοσυχνότητα σε Hz είναι:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (3.3)$$

Ο λόγος απόσβεσης ορίζεται ως:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (3.4)$$

και περιγράφει το πόσο underdamped/critical/overdamped είναι το σύστημα.[33],[34]



Εικόνα 3.1:Μηχανισμός SDOF [51]

Για αρμονική διέγερση:

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t) \quad (3.5)$$

η συχνοτική απόκριση του πλάτους σε σχέση με τη στατική μετατόπιση δίνεται από:

$$\frac{X(\omega)}{X_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \text{ όπου } r = \frac{\omega}{\omega_n} \text{ και } X_{st} = \frac{F_0}{k} \quad (3.6)$$

Η σχέση αυτή δείχνει κορυφή πλάτους κοντά στο  $r \approx 1$  (συντονισμός), η οποία μειώνεται όσο αυξάνει η απόσβεση  $\zeta$ . Επειδή η “αίσθηση” δόνησης σχετίζεται συχνά με επιτάχυνση, ισχύει ότι:

$$a(t) = \ddot{x}(t) = -\omega^2 X \sin(\omega t) \text{ για } x(t) = X \sin(\omega t) \quad (3.7)$$

και το πλάτος επιτάχυνσης ισούται[26]:

$$A = \omega^2 X \quad (3.8)$$

Ο συντελεστής ποιότητας  $Q$  είναι μέτρο της “έντασης” και “στενότητας” του συντονισμού και συνδέεται με τη ζώνη συχνοτήτων όπου το σύστημα έχει σημαντική απόκριση. Ένας συχνός ορισμός είναι:

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} \mu \varepsilon \Delta f \approx \frac{f_N}{Q} \quad (3.9)$$

όπου  $f_r$  η συχνότητα συντονισμού και  $\Delta f$  το bandwidth (FWHM/half-power bandwidth). Επίσης από τις σχέσεις προκύπτει πως μεγαλύτερο  $Q$  σημαίνει στενότερο bandwidth.[35]

### 3.2.1 Παροδική απόκριση (Overshoot & Settling)

Για να περιγραφεί πόσο “κοφτά” ή “καθαρά” ξεκινά/σταματά μια δόνηση, χρησιμοποιούνται μετρικές παροδικής απόκρισης 2ης τάξης, όπως overshoot και settling time. Για υπο-αποσβεννύμενα συστήματα, το ποσοστό υπερύψωσης (percent overshoot) δίνεται από:

$$\%OS = 100 \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \quad (3.10)$$

Επιπλέον, ο χρόνος αποκατάστασης (2% settling time) προσεγγίζεται συχνά ως:

$$T_s \approx \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (3.11)$$

Οι σχέσεις αυτές είναι χρήσιμες επειδή δείχνουν τον συμβιβασμό: μικρή απόσβεση (μικρόζ, μεγάλο  $Q$ ) αυξάνει overshoot/“ringing” και επιμηκύνει το settling, ενώ μεγαλύτερη απόσβεση “καθαρίζει” την απόκριση αλλά μειώνει κορυφές/ένταση κοντά στο resonance.[36][37][35]

### 3.2.2 ERM (Eccentric Rotating Mass): δύναμη ανισοροπίας

Ο ERM actuator βασίζεται σε εκκεντρική περιστρεφόμενη μάζα που δημιουργεί φυγόκεντρη/ανισοροπία δύναμη στο περίβλημα. Το πλάτος της δύναμης ανισοροπίας προσεγγίζεται από τη σχέση:

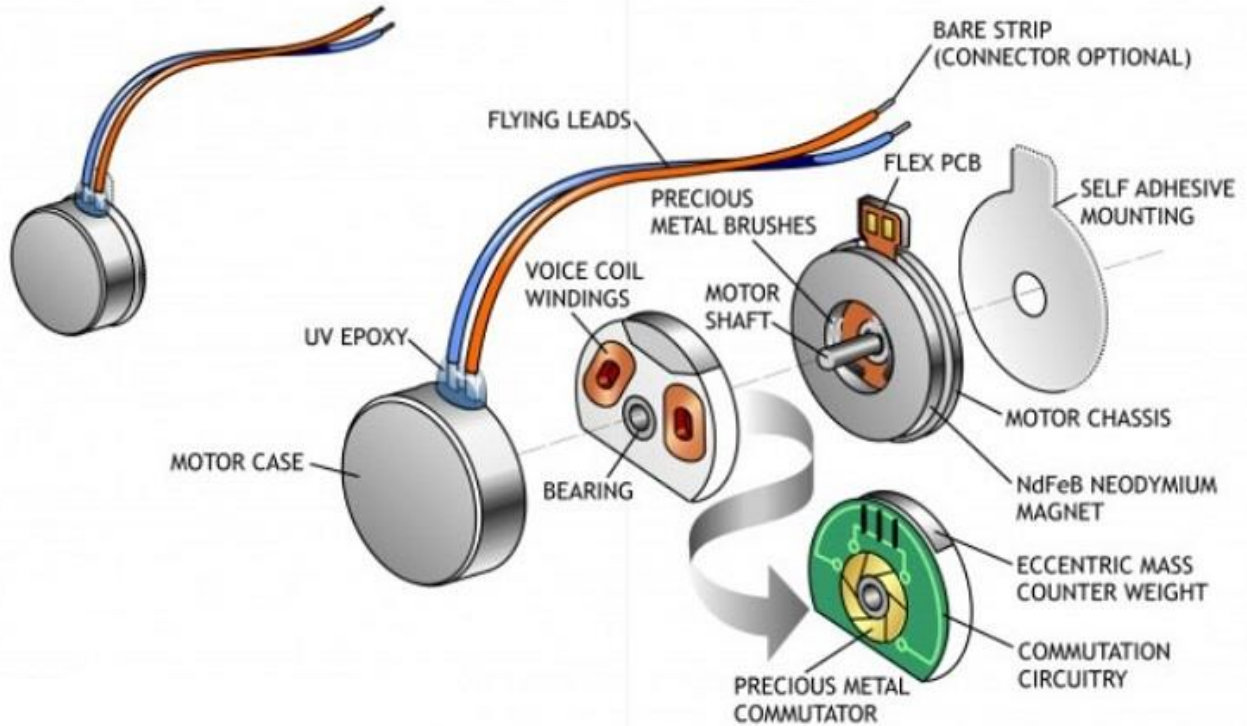
$$F_0 = m_u r \omega^2 \quad (3.12)$$

όπου  $m_u$  είναι η εκκεντρική μάζα,  $r$  η ακτίνα εκκεντρότητας και  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα. Η διέγερση μπορεί να θεωρηθεί αρμονική, δηλαδή:

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t) \quad (3.13)$$

κάτι που επιτρέπει να συνδεθεί απευθείας με το προηγούμενο μοντέλο στη σχέση (3.1) για την πρόβλεψη του πλάτους στο σασί.[38][39][26]

Η εξάρτηση  $F_0 \propto \omega^2$  δείχνει ότι η ένταση δόνησης αυξάνει έντονα με την ταχύτητα περιστροφής, αλλά αυτό συνεπάγεται και πρακτικούς περιορισμούς σε πολύ σύντομα “clicks” επειδή η ταχύτητα  $\omega(t)$  δεν αλλάζει στιγμιαία λόγω αδράνειας. Έτσι, οι ERM τείνουν να έχουν πιο αργή δυναμική onset/offset σε σύγκριση με resonant λύσεις, κάτι που επηρεάζει τη χρονική ακρίβεια όταν ζητούνται πολύ μικρές διάρκειες.[27][39][40]



][35]

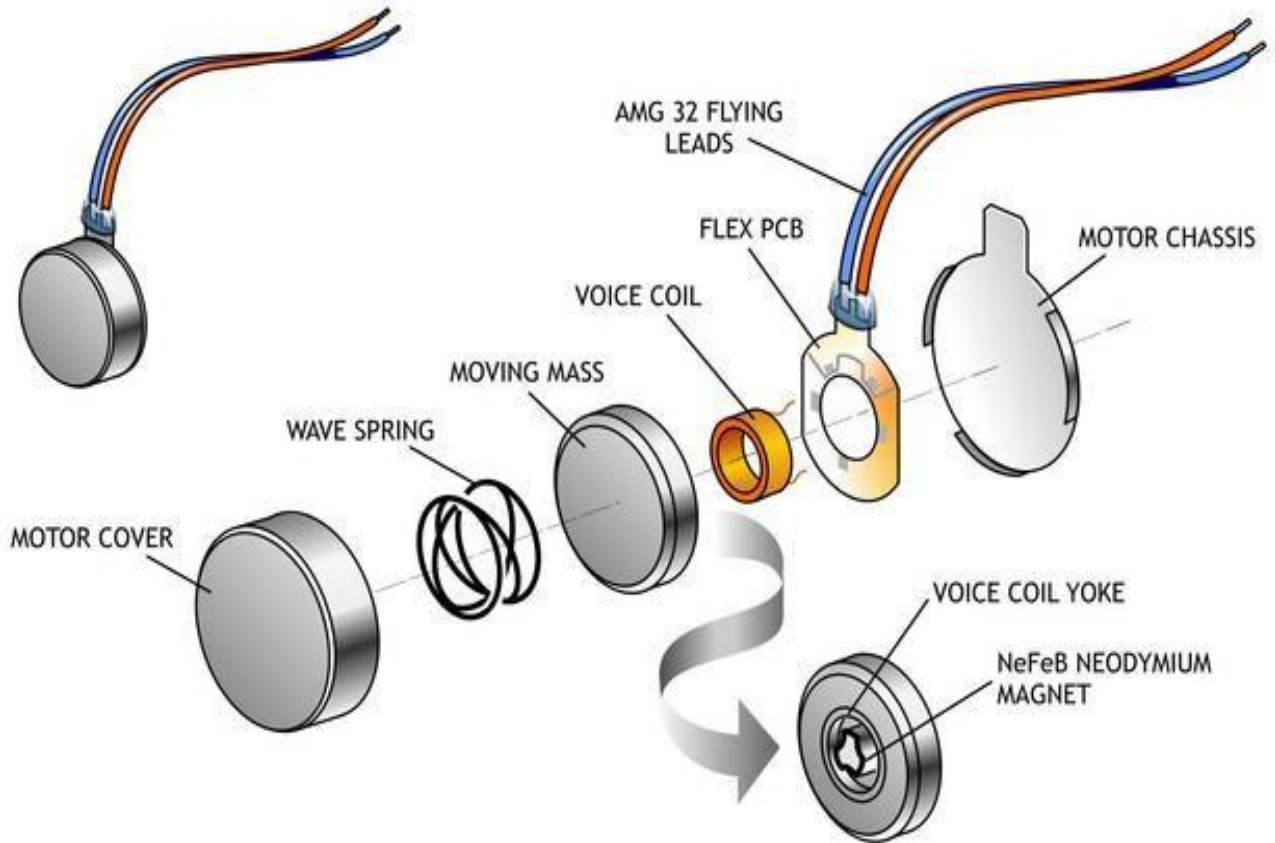
Εικόνα 3.2 ERM (Eccentric Rotating Mass) [52]

### 3.2.3 LRA (Linear Resonant Actuator): συντονισμένη λειτουργία

Ο LRA actuator μοντελοποιείται φυσικά ως συντονισμένο mass–spring–damper σύστημα, σχεδιασμένο να αποδίδει μέγιστα γύρω από μια συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού. Τεχνικές αναφορές τονίζουν ότι οι LRAs απαιτούν AC drive (εναλλασσόμενη διέγερση) ώστε να διατηρείται η παλινδρομική κίνηση της μάζας. Για haptics σε κινητές συσκευές, αναφέρεται ότι πολλά LRAs έχουν συχνότητες συντονισμού στην περιοχή 200–300 Hz και ότι η απόκριση μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από τον συντονισμό.[32][38][34]

Αυτό σημαίνει ότι, από την σκοπιά του hardware, η “χρήσιμη” περιοχή συχνοτήτων ενός LRA σχετίζεται με το  $Q$  και το  $\Delta f$ , δηλαδή με το πόσο στενή είναι η κορυφή του resonance. Με υψηλό  $Q$  επιτυγχάνεται έντονη και “καθαρή”

δόνηση κοντά στο  $f_r$ , αλλά το σύστημα γίνεται πιο ευαίσθητο σε μεταβολές φόρτισης/στήριξης που μπορούν να αλλάξουν αποτελεσματικά το σημείο λειτουργίας.[38][35]



**PRECISION MICRODRIVES  
PRECISION HAPTIC™  
Y-AXIS LINEAR RESONANT ACTUATOR**

Εικόνα 3.3 LRA (Linear Resonant Actuator) [53]

**3.2.4 Πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές: constitutive equations και μετατόπιση**

Οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές περιγράφονται μέσω καταστατικών εξισώσεων (constitutive equations) που συνδέουν μηχανικά μεγέθη (strain/stress) με ηλεκτρικά (electric field/electric displacement). Σε απλοποιημένη μορφή, ένα βασικό αποτέλεσμα είναι ότι η παραμόρφωση (strain) μπορεί να είναι ανάλογη του ηλεκτρικού πεδίου, δηλαδή:

$$S = \frac{\Delta l}{L} \approx d_{33}E \tag{3.14}$$

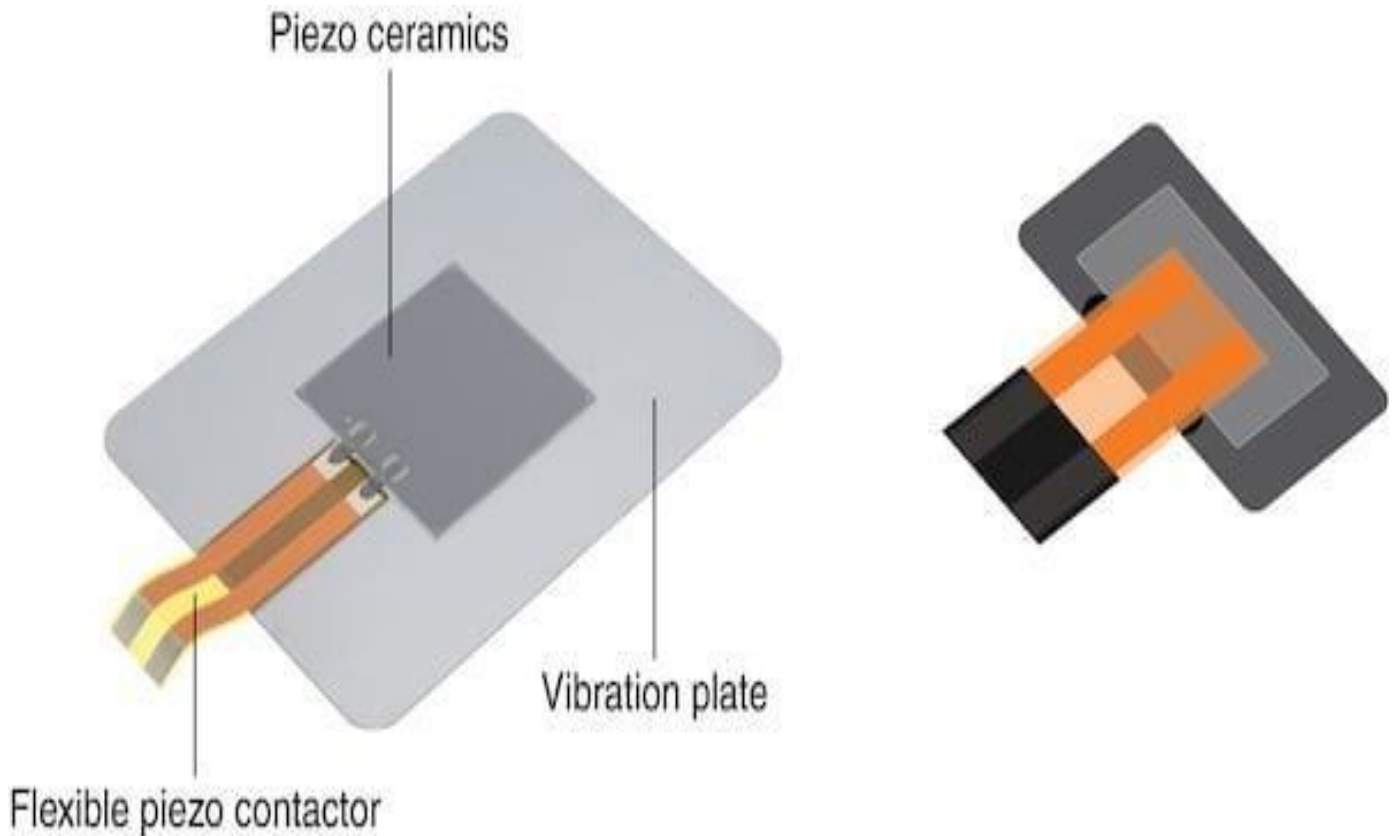
Με

$$E = \frac{V}{t} \tag{3.15}$$

(τάση προς πάχος), μια χρήσιμη σχέση μετατόπισης είναι:

$$\Delta l \approx d_{33} \frac{V}{t} L \tag{3.16}$$

όπου  $d_{33}$  είναι πιεζοηλεκτρικός συντελεστής,  $L$  ενεργό μήκος και  $t$  πάχος. Η περιγραφή αυτή είναι σημαντική γιατί δείχνει ότι στους συγκεκριμένους ενεργοποιητές η μετατόπιση κλιμακώνεται με το ηλεκτρικό πεδίο και τη γεωμετρία, άρα οι απαιτήσεις driver (τάση/φόρτιση) και η μηχανική κατασκευή είναι κεντρικές για την τελική δόνηση.[28][42]



Εικόνα 3.4 Piezoelectric [54]

### 3.2.5 Ενέργεια, κατανάλωση και φαινόμενο “loading” στα smartphones

Η ενεργειακή κατανάλωση ενός απτικού αποτελέσματος μπορεί να εκφραστεί από βασικές σχέσεις ισχύος/ενέργειας:

$$p(t) = V_{DD}i(t) \quad (3.17)$$

και

$$E = \int_0^T p(t) dt \quad (3.18)$$

κάτι χρήσιμο για σύγκριση τεχνολογιών. Σε πειραματικές μετρήσεις “click” (με στόχο κορυφή επιτάχυνσης  $\sim 0.9$  g), αναφέρονται ενδεικτικά μέσες τιμές ρεύματος 124 mA (ERM), 51.3 mA (LRA) και 62.6 mA (piezo) σε συγκεκριμένα παραδείγματα. Στο ίδιο πλαίσιο τονίζεται ότι οι μετρήσεις εξαρτώνται από το μηχανικό φορτίο (loading) και παρουσιάζεται δοκιμή όπου ο ενεργοποιητής φορτώνεται με μεταλλική μάζα 100 g για προσομοίωση smartphone.[26]

Το φαινόμενο του “loading” είναι κρίσιμο γιατί αλλάζει τα ισοδύναμα  $m, c, k$  του συνολικού συστήματος, μετακινεί/αλλάζει την κορυφή συντονισμού και τελικά επηρεάζει ένταση και καθαρότητα δόνησης. Άρα, δύο ίδιες μονάδες actuator μπορεί να δώσουν αισθητά διαφορετική εμπειρία αν αλλάξει η θέση/στήριξη στο σασί, το υλικό σκελετού ή η κατανομή μάζας του τηλεφώνου.[32][26]

### 3.3 Ευαισθησία σε συχνότητες δόνησης, όρια αντίληψης και άνεση

Η ανασκόπηση “Audio-Tactile Rendering” συνοψίζει ευρήματα από πολλές ψυχοφυσικές μελέτες και υπογραμμίζει ότι το απτικό σύστημα εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία σε δονήσεις χαμηλής έως μέσης συχνότητας, ιδίως κάτω από τα 300 Hz περίπου, με τα κατώφλια αντίληψης να αυξάνονται αισθητά τόσο σε πολύ χαμηλές όσο και σε πολύ υψηλές συχνότητες. Στην “Tactile displays for auditory augmentation” περιγράφονται διάφορα tactile setups (ζώνες, γλέκα, καθίσματα) και αναφέρεται ότι οι σχεδιαστές τείνουν να περιορίζουν το φάσμα των δονήσεων σε περιοχές όπου η ευαισθησία είναι υψηλή αλλά η αίσθηση παραμένει άνετη, ώστε να εξασφαλίζουν καθαρή μετάδοση πληροφοριών χωρίς ενόχληση ή κόπωση, ιδίως σε παρατεταμένη χρήση με μουσικό περιεχόμενο. Επιπλέον, η εργασία “Recent developments in haptic devices designed for hearing-impaired people” αναφέρει ότι πολλές συσκευές

επιλέγουν κατάλληλες συχνότητες και επίπεδα διέγερσης βάσει υπαρχόντων καμπυλών κατωφλίου, προσαρμοσμένων ανάλογα με την περιοχή του σώματος όπου εφαρμόζεται η δόνηση (χέρια, κορμός, ώμοι κ.λπ.).[16][14][9]

Οι μακροχρόνιες επιδράσεις της δόνησης έχουν μελετηθεί σε εργασιακά περιβάλλοντα, όπως φαίνεται στην εργασία “Long-term effect of hand-arm vibration on thermotactile perception thresholds”, όπου παρατεταμένη έκθεση σε δονήσεις χεριού-βραχίονα σχετίζεται με αυξημένα θερμοτακτικά και απτικά κατώφλια, γεγονός που ερμηνεύεται ως ένδειξη επιβάρυνσης των αισθητικών μηχανισμών. Σε πιο οξείες καταστάσεις, η εργασία “Effect of tool handle diameter on temporary threshold shift (TTS) of vibrotactile perception” καταγράφει ότι μετά από έκθεση σε δόνηση στα 125 Hz τα κατώφλια αντίληψης στα δάκτυλα αυξάνονται προσωρινά (TTS) και επανέρχονται με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που υποδεικνύει ότι ακόμη και βραχύχρονη έντονη διέγερση μπορεί να επηρεάσει παροδικά την ευαισθησία. Τα ευρήματα αυτά χρησιμοποιούνται στις ανασκοπήσεις audio-tactile rendering και tactile displays ως επιχείρημα υπέρ του περιορισμού της μέγιστης έντασης και της συνεχούς διάρκειας δόνησης στα μουσικά και διαδραστικά συστήματα, ώστε να διατηρούνται οι δονήσεις εντός ασφαλών και άνετων ορίων για τον χρήστη.[15][10][9][14]

Σε πιο μουσικό πλαίσιο, η μελέτη “Vibrotactile enhancement of musical engagement” δείχνει ότι μέτρια επίπεδα δόνησης, με σαφή ρυθμική οργάνωση (παλμοί συγχρονισμένοι με το beat, παύσεις, αλλαγές μοτίβου) και με συχνότητες εντός του προτιμώμενου εύρους ευαισθησίας, γίνονται αντιληπτά ως ευχάριστα και αυξάνουν την υποκειμενική εμπλοκή του χρήστη με τη μουσική. Η εργασία “Exposure to vibrotactile music improves audiometric performances” σε χρήστες κοχλιακών εμφυτευμάτων αναφέρει ότι συστηματική έκθεση σε μουσική εμπλουτισμένη με vibrotactile δόνηση όχι μόνο είναι υποκειμενικά αποδεκτή αλλά συνδέεται και με βελτιωμένη επίδοση σε ορισμένες ακουστικές δοκιμασίες, στοιχείο που ενισχύει την ιδέα ότι η προσεκτικά σχεδιασμένη vibrotactile διέγερση μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να προκαλεί βλαπτική κόπωση. Ανασκοπήσεις όπως η “Recent developments in haptic devices...” και η “Tactile displays for auditory augmentation” χρησιμοποιούν τα παραπάνω ευρήματα για να προτείνουν κατευθυντήριες γραμμές έντασης/συχνότητας/διάρκειας για haptic συσκευές που στοχεύουν σε μακροχρόνια ή συχνή χρήση από άτομα με ακουστικές δυσκολίες.[13][7][9][16]

### 3.4 Συνδυασμός ακοής–αφής (audio–tactile integration)

Η ανασκόπηση “Audio-Tactile Rendering” περιγράφει ότι όταν τα χρονικά και φασματικά χαρακτηριστικά της δόνησης ταιριάζουν με εκείνα του αντίστοιχου ηχητικού σήματος (audio-tactile congruence), οι χρήστες τείνουν να αντιλαμβάνονται τον ήχο και τη δόνηση ως μία ενιαία πολυαισθητηριακή εμπειρία, με αποτέλεσμα βελτιωμένη αντίληψη ρυθμού, δυναμικής και μουσικής δομής. Η σημασία της audio-tactile congruence εξετάζεται λεπτομερώς στη μελέτη “Effect of audio-tactile congruence on vibrotactile music enhancement”, όπου συγκρίνονται συνθήκες «συνεπούς» και «ασύμβατης» δόνησης ως προς τον ήχο, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι μόνο η συνεπής δόνηση οδηγεί σε σαφή βελτίωση της μουσικής εμπειρίας και του συγχρονισμού κινήσεων, ενώ η ασύμβατη δόνηση μπορεί ακόμη και να μειώσει την υποκειμενική ποιότητα. Παρόμοιες παρατηρήσεις γίνονται και στην ανασκόπηση “Tactile displays for auditory augmentation”, όπου τονίζεται ότι ο κακός χρονισμός ή η επιλογή άσχετων συχνοτικών περιοχών για τη δόνηση δημιουργεί γνωστική ασυμφωνία και επιβαρύνει τον χρήστη αντί να τον βοηθά.[5][9][14]

Για άτομα με προβλήματα ακοής, εργασίες όπως “Enhancing Musical Experience for the Hearing-Impaired Using Visual and Haptic Displays” δείχνουν ότι η συνδυασμένη χρήση οπτικών αναπαραστάσεων μουσικής (π.χ. γραφικά equalizers, φώτα) και vibrotactile δόνησης επιτρέπει στους χρήστες να αναπτύξουν μια πλούσια, αν και μη κλασικά ακουστική, εμπειρία της μουσικής, βασισμένη σε χρονικά, χωρικά και απτικά cues. Η ανασκόπηση “Recent developments in haptic devices designed for hearing-impaired people” καταγράφει μεγάλο φάσμα συσκευών (καρέκλες, γιλέκα, ζώνες, wristbands) που έχουν δοκιμαστεί σε κωφούς και βαρήκοους, αναφέροντας ότι η πλειονότητα των χρηστών αναφέρει αυξημένη απόλαυση, αίσθηση σύνδεσης με τη μουσική και βελτιωμένη ικανότητα να ακολουθούν τον ρυθμό όταν η δόνηση είναι κατάλληλα συγχρονισμένη με τον ήχο. Επιπλέον, μελέτες όπως “A Way for Deaf and Hard of Hearing People to Enjoy Music by Exploring and Customizing Cross-modal Music Concepts” και “FeelMusic – Enriching Our Emotive Experience of Music through Audio-Tactile” δείχνουν ότι η δυνατότητα παραμετροποίησης (customization) των audio-tactile mappings από τον ίδιο τον χρήστη –π.χ. επιλογή περιοχής σώματος, έντασης ή είδους μοτίβου– ενισχύει την αίσθηση ελέγχου και προσαρμόζει καλύτερα την εμπειρία στις προσωπικές προτιμήσεις και ανάγκες.[17][20][6][16][14]

### 3.5 Τεχνικές mapping ήχου → δονήσεων

Η ανασκόπηση “Audio-Tactile Rendering” προτείνει ένα εννοιολογικό πλαίσιο ταξινόμησης των audio-tactile mappings σε τρεις βασικές κατηγορίες: (α) άμεσο mapping έντασης ή χαμηλοσυχνοτικού περιεχομένου σε μονοκαναλική δόνηση, (β) πολυζωνική/φασματική αντιστοίχιση σε πολλαπλούς factors και (γ) πιο αφηρημένα mappings που αξιοποιούν μουσικολογικά γεγονότα ή συναισθηματικές διαστάσεις. Η κατηγορία (α) συναντάται συχνά σε απλά συστήματα, όπως αυτά που περιγράφονται στην “Enhancing Musical Experience for the Hearing-Impaired Using Visual and Haptic Displays”, όπου το συνολικό επίπεδο του ήχου ή η ενέργεια στις πολύ χαμηλές συχνότητες μεταφράζεται σε ένταση δόνησης σε μία ή λίγες θέσεις στο σώμα, προσφέροντας βασική αίσθηση ρυθμού και δυναμικής χωρίς περίπλοκη ανάλυση. Οι κατηγορίες (β) και (γ) υλοποιούνται σε πιο εξελιγμένα συστήματα όπως αυτά που περιγράφονται στις εργασίες “Design of Vibrotactile Feedback and Stimulation for Music”, “FeelMusic – Enriching Our Emotive Experience of Music” και “Tactile displays for auditory augmentation”, όπου ο ήχος αναλύεται σε πολλαπλές φασματικές ζώνες και επιλεγμένα μουσικά γεγονότα (π.χ. δυναμικές κορυφώσεις, αλλαγές μέρους, downbeats) χαρτογραφούνται σε ξεχωριστά απτικά μοτίβα και κανάλια.[6][8][9][17]

Η εργασία “Design of Vibrotactile Feedback and Stimulation for Music” παρουσιάζει συστήματα στα οποία διαφορετικές ζώνες συχνότητων αντιστοιχούν σε διαφορετικούς factors (π.χ. μπάσο σε κάτω μέρος σώματος, μεσαίες σε κορμό, υψηλές σε ώμους ή χέρια), επιτρέποντας στον χρήστη να αντιλαμβάνεται χωρικά τη φασματική κατανομή του ήχου, ενώ παράλληλα ρυθμικά γεγονότα όπως τα beats κωδικοποιούνται ως σύντομα παλμικά μοτίβα. Η εργασία “FeelMusic – Enriching Our Emotive Experience of Music” εστιάζει περισσότερο στη μετάδοση της συναισθηματικής διάστασης της μουσικής, εξερευνώντας mappings όπου συνδυασμοί συχνότητας, έντασης και χωρικής κατανομής της δόνησης στο σώμα αντιστοιχούν σε διαφορετικές συναισθηματικές καταστάσεις (π.χ. «ένταση», «ηρεμία»), αντί μόνο σε «πιστή» αναπαράσταση του φάσματος. Παράλληλα, η εργασία “New haptic systems for elicit emotions in audio-visual events for hearing-impaired people” περιγράφει συστήματα όπου ο στόχος είναι η πρόκληση συγκεκριμένων συναισθηματικών αποκρίσεων κατά τη διάρκεια οπτικοακουστικών γεγονότων, με χρήση κατάλληλα σχεδιασμένων μοτίβων δόνησης που λαμβάνουν υπόψη τόσο τα ψυχοφυσικά όρια της αφής όσο και την audio-tactile congruence.[8][19][9][13][6]

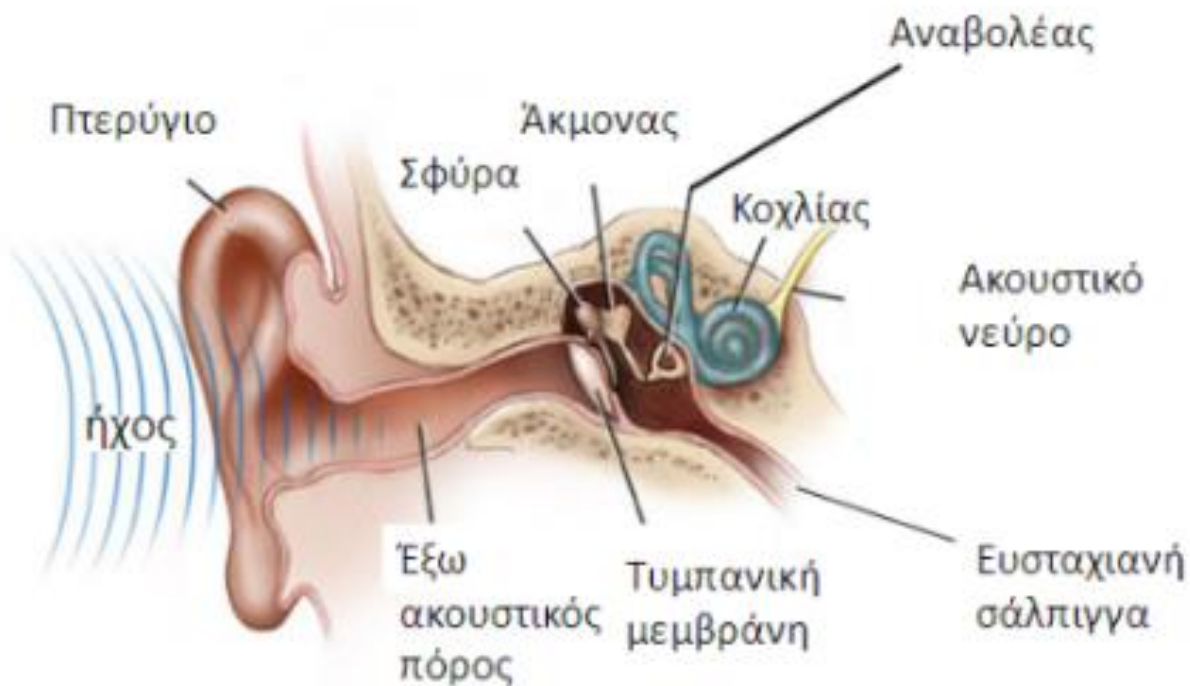
Τέλος, η πατέντα “System, Methods and Devices for Audio-Tactile Mapping” παρουσιάζει μια πιο «βιομηχανική» υλοποίηση, στην οποία το ηχητικό σήμα περνά από στάδια φιλτραρίσματος, συμπίεσης δυναμικής και μετασχηματισμού προτού παραχθεί το απτικό σήμα, με στόχο να μεταποπιστεί η ενέργεια σε συχνοτικές περιοχές όπου η απτική ευαισθησία είναι μεγαλύτερη και να περιοριστεί ο κίνδυνος υπερφόρτωσης του χρήστη με υπερβολικά πολύπλοκα patterns. Η ανασκόπηση “Tactile displays for auditory augmentation” χρησιμοποιεί παραδείγματα τέτοιων συστημάτων για να υποστηρίξει ότι τα πιο επιτυχημένα audio-tactile mappings συνδυάζουν φασματική ανάλυση, ανίχνευση ρυθμικών/δομικών γεγονότων και ψυχοφυσικές γνώσεις για τα κατώφλια και την άνεση, δημιουργώντας δονήσεις που είναι ταυτόχρονα αντιληπτικά πλούσιες, χρονικά συνεπείς με τον ήχο και ανεκτές σε μακροχρόνια χρήση.[5][18][9][10][14]

## Κεφάλαιο 4ο: Άτομα με προβλήματα ακοής και βοηθητικές τεχνολογίες

Τα άτομα με απώλεια ακοής αποτελούν μια ιδιαίτερα ετερογενή ομάδα, τόσο ως προς την αιτιολογία όσο και ως προς τον βαθμό και το «σχήμα» της βαρηκοΐας στο ακούγραμμα, με αυτό τον τρόπο γίνεται αντιληπτό σε μεγάλο βαθμό οι βοηθητικές τεχνολογίες που είναι κατάλληλες και το ποσοστό της αποτελεσματικότητας που εξυπηρετούν. Ιατρικές ελληνικές μελέτες για τη βαρηκοΐα (π.χ. ενημερωτικά κείμενα ΩΡΛ κλινικών και επαγγελματιών ακοής) τονίζουν ότι η απώλεια ακοής δεν επηρεάζει μόνο την κατανόηση του λόγου, αλλά έχει σημαντικές επιπτώσεις στην κοινωνική ζωή, την εκπαίδευση, την εργασία και την ψυχαγωγία, με τη μουσική να είναι ένας από τους τομείς που συχνά υποβαθμίζονται ή εγκαταλείπονται λόγω της μειωμένης ποιότητας ακρόασης. Σημαντικό κομμάτι ενός ατόμου με προβλήματα ακοής είναι η ύπαρξη κλασικών τεχνολογιών όπως τα ακουστικά βαρηκοΐας και τα κοχλιακά εμφυτεύματα, διότι αποδίδουν εντυπωσιακά και βελτιώνουν την πρόσβαση στον λόγο για πολλές κατηγορίες ασθενών. Παρόλα αυτά, η βιβλιογραφία για θέματα που σχετίζονται με την απτική απόδοση του ήχου και την αξιοποίηση συσκευών με απτική δόνηση, παρουσιάζουν την ανάγκη για ανάπτυξη νέων τεχνολογιών με σκοπό την βελτίωση στην εμπειρία της μουσικής και του περιβάλλοντος ήχου, διότι μέχρι σήμερα παραμένει συχνά ελλιπής ή μη ικανοποιητική, δημιουργώντας χώρο για συμπληρωματικές πολυαισθητηριακές λύσεις.[6][16][14][9][22][23][25]

### 4.1 Τύποι και βαθμοί απώλειας ακοής

Σύμφωνα με τυπικές ωτορινολαρυγγολογικές ταξινομήσεις που παρουσιάζονται σε ελληνικές ιατρικές ιστοσελίδες και ενημερωτικό υλικό (π.χ. οδηγούς για βαρηκοΐα, ενημερωτικά άρθρα ΩΡΛ κλινικών), η απώλεια ακοής κατηγοριοποιείται αρχικά σε τρεις βασικούς τύπους: βαρηκοΐα αγωγιμότητας, νευροαισθητήρια βαρηκοΐα και μικτή βαρηκοΐα. Η βαρηκοΐα αγωγιμότητας σχετίζεται με προβλήματα στο έξω ή στο μέσο ους (π.χ. βύσμα κυψελίδας, διάτρηση τυμπάνου, δυσλειτουργία οσταρίων), όπου ο μηχανικός μηχανισμός αγωγής του ήχου προς το έσω ους υπολειπεται· στις περιπτώσεις αυτές, η μετατροπή των ηχητικών κυμάτων σε μηχανική δόνηση του κοχλία μπορεί να αποκατασταθεί με επεμβάσεις ή/και με κατάλληλη ενίσχυση, με αποτέλεσμα συχνά καλύτερη πρόγνωση. Αντίθετα, η νευροαισθητήρια βαρηκοΐα σχετίζεται με βλάβες στα τριχοειδή κύτταρα του κοχλία ή στο ακουστικό νεύρο και τις περισσότερες φορές είναι μη αναστρέψιμη, οδηγώντας σε πιο σύνθετα προβλήματα επεξεργασίας του ήχου (π.χ.



Εικόνα 4.1 Ανατομία του αυτιού [44]

παραμόρφωση timbre, δυσκολία σε θορυβώδες περιβάλλον) που συχνά χρειάζονται πιο περίπλοκους τρόπους αντιμετώπισης από μια απλή ενίσχυση. Τέλος, η μικτή βαρηκοΐα συνδυάζει στοιχεία και από τις δύο καταστάσεις, καθιστώντας αναγκαία μια συνδυαστική προσέγγιση αποκατάστασης.[23][26][21][22]

Ως προς τον βαθμό, συχνά χρησιμοποιείται η κλασική κλίμακα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας και συναφών κλινικών οδηγιών, όπως αυτή παρουσιάζεται σε ελληνικές πηγές, όπου η απώλεια κατηγοριοποιείται ως ήπια, μέτρια, σοβαρή, πολύ σοβαρή ή κώφωση, ανάλογα με το μέσο κατώφλι σε dB HL (Decibels Hearing Level) σε βασικές συχνότητες ομιλίας. Ενδεικτικά, ήπια απώλεια (π.χ. 20–40 dB HL) μπορεί να σημαίνει δυσκολία κατανόησης ψιθυριστού ή λόγου σε απόσταση, μέτρια απώλεια συνήθως σχετίζεται με δυσκολία παρακολούθησης συζήτησης χωρίς ενίσχυση, ενώ σοβαρή ή πολύ σοβαρή απώλεια/κώφωση περιορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την κατανόηση λόγου χωρίς τεχνικά βοηθήματα, ειδικά σε θορυβώδη περιβάλλοντα. Αυτές οι κλίμακες δεν στοχεύουν στην αποτύπωση της μουσικής ικανότητας, αλλά αποδίδουν το πόσο δυσκολεύεται ο ασθενής να βρεθεί στον φυσιολογικό ακουστικό κόσμο. Πολλές ελληνικές ενημερωτικές πηγές επισημαίνουν επίσης τη σημασία της έγκαιρης διάγνωσης και της εξατομικευμένης προσέγγισης, καθώς το προφίλ της απώλειας (σχήμα ακοογράμματος, συμμετρία, ηλικία έναρξης) χαρίζει ξεκάθαρη εικόνα τόσο στην επιλογή βοηθημάτων όσο στον τρόπο με τον οποίο το άτομο μπορεί να αξιοποιήσει εναλλακτικά κανάλια, όπως η όραση ή η αφή.[25][43][26][44][23]

#### 4.2 Προκλήσεις στην πρόσβαση στη μουσική και στον περιβάλλοντα ήχο

Η μουσική αποτελεί μία από τις πιο σύνθετες μορφές ηχητικής πληροφορίας: περιέχει πλούσιο φασματικό περιεχόμενο, πολυφωνία, δυναμικές, ρυθμικές δομές και λεπτές διαφοροποιήσεις χροιάς (timbre), οι οποίες απαιτούν σχετικά καλή ανάλυση συχνότητας και χρόνο-συχνότητας από το ακουστικό σύστημα. Στην ανασκόπηση “*Audio-Tactile Rendering: A Review on Technology and Methods to Convey Musical Information through the Sense of Touch*” του Sighinolfi et al., παρατηρείται ότι με τα κλασικά ακουστικά βοηθήματα και τα κοχλιακά εμφυτεύματα επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση στη κατανόηση του λόγου, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι έχουν σχεδιαστεί για την πιστή αναπαραγωγή των πλούσιων μουσικών λεπτομερειών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλοί χρήστες να μην βιώνουν τη μουσική ως μια πολυαισθητηριακή εμπειρία αλλά σαν επίπεδη, παραμορφωμένη ή και κουραστική. Παρόμοια συμπεράσματα αναφέρει και η ανασκόπηση “*Recent Developments in Haptic Devices Designed for Hearing-Impaired People*” (Garcia et al.), όπου τονίζεται πως ακόμη και η χρήση σύγχρονων εμφυτευμάτων, δεν βελτιώνουν την μελωδική διάκριση, συγχορδιών και timbre, επομένως η λύση του προβλήματος παραμένει σημαντική πρόκληση.[14][16][9]

Επιπλέον, ο περιβαλλοντικός ήχος (π.χ. ειδοποιήσεις κινητού, κουδούνια, σήματα κυκλοφορίας, ήχοι στο σπίτι ή στην εργασία) έχει κρίσιμη σημασία για την καθημερινή λειτουργικότητα και την αίσθηση ασφάλειας, όμως συχνά δεν γίνεται σαφής αναπαράσταση από τα υπάρχοντα βοηθήματα. Επίσης, στην ανασκόπηση “*Tactile Displays for Auditory Augmentation*” (Karam et al.), παρουσιάζεται ότι πολλά άτομα με σοβαρή απώλεια ακοής δυσκολεύονται να αντιληφθούν εγκαίρως κρίσιμα ηχητικά γεγονότα ή να καταλάβουν την «ακουστική σκηνή» σε πολύπλοκα περιβάλλοντα, ακόμη και με χρήση τεχνικής ενίσχυσης. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερη είναι η πρόκληση όταν υπάρχει έντονος θόρυβος ή πολλαπλές πηγές. Ταυτόχρονα, από υποκειμενικές αναφορές σε μελέτες όπως αυτές της ομάδας της “Nanayakkara” στο “*Enhancing Musical Experience for the Hearing-Impaired Using Visual and Haptic Displays*”, φαίνεται ότι πολλοί χρήστες δεν θα ήθελαν απλά να «ακούν» μόνο λειτουργικά τη μουσική, αλλά να ξαναβρούν ή να ανακαλύψουν τη συναισθηματική και σωματική της διάσταση, κάτι που η καθαρά ακουστική ενίσχυση δεν εξασφαλίζει πάντα. [17][16][9]

Τέλος, η ποικιλία στις προτιμήσεις είναι μεγάλη: κάποιιοι προτιμούν έντονα μπάσα και «σωματική» εμπειρία, άλλοι ενδιαφέρονται περισσότερο για ρυθμό και δομή, ενώ υπάρχει και διακύμανση στην ανεκτικότητα σε ένταση ή δόνηση. Τα έργα “*FeelMusic – Enriching Our Emotive Experience of Music*” και “*A Way for Deaf and Hard of Hearing People to Enjoy Music by Exploring and Customizing Cross-modal Music Concepts*” δείχνουν ότι είναι απαραίτητη η δυνατότητα παραμετροποίησης της εμπειρίας (σε οπτικά, ακουστικά και απτικά κανάλια). Με αυτό τον τρόπο θα ικανοποιηθούν οι διαφορετικές ανάγκες και προσδοκίες των χρηστών με προβλήματα ακοής. [6][20]

#### 4.3 Επιπτώσεις της απώλειας ακοής στην καθημερινή ζωή και στην ποιότητα ζωής

Η απώλεια ακοής συνιστά μια αναπηρία που επηρεάζει πολυδιάστατα την καθημερινότητα, από την επικοινωνία και την εργασία έως την ασφάλεια, την ψυχική υγεία και την πρόσβαση σε ψυχαγωγία. Οι επιπτώσεις αυτές διαφοροποιούνται ανάλογα με τον βαθμό και τον τύπο της βαρηκοΐας, αλλά και από το αν υπάρχει έγκαιρη διάγνωση και χρήση ακουστικών ή άλλων υποστηρικτικών τεχνολογιών.

### **4.3.1 Επικοινωνία και κοινωνική συμμετοχή**

Κεντρική επίπτωση της βαρηκοΐας είναι η δυσχέρεια στην κατανόηση της ομιλίας, ιδιαίτερα σε θορυβώδη περιβάλλοντα ή σε ομαδικές συζητήσεις, όπου η διάκριση της φωνής από τον θόρυβο φόντου γίνεται απαιτητική και εξαντλητική. Τα άτομα συχνά ζητούν επαναλήψεις, παρερμηνεύουν λέξεις ή προσποιούνται ότι κατάλαβαν, γεγονός που οδηγεί σε παρεξηγήσεις, αίσθημα ντροπής και σταδιακή αποφυγή κοινωνικών συναναστροφών.[23][43]

Ο αποκλεισμός από την επικοινωνία μπορεί να προκαλέσει αισθήματα μοναξιάς και κοινωνικής απομόνωσης, ιδιαίτερα όταν η απώλεια ακοής δεν αναγνωρίζεται ή δεν αντιμετωπίζεται με βοηθήματα. Η μειωμένη συμμετοχή σε οικογενειακές συζητήσεις, κοινωνικές εκδηλώσεις ή δραστηριότητες αναψυχής αποδυναμώνει τις διαπροσωπικές σχέσεις και περιορίζει τις ευκαιρίες για κοινωνική στήριξη.[23][43]

### **4.3.2 Συναισθηματικές και ψυχικές επιπτώσεις**

Η χρόνια προσπάθεια για κατανόηση της ομιλίας, σε συνδυασμό με τα επαναλαμβανόμενα επικοινωνιακά εμπόδια, αυξάνει τα επίπεδα στρες και ψυχικής κόπωσης. Μελέτες δείχνουν συσχέτιση της μη αντιμετωπισμένης βαρηκοΐας με αυξημένη εμφάνιση άγχους, καταθλιπτικής συμπτωματολογίας και χαμηλής αυτοεκτίμησης, καθώς το άτομο βιώνει σταδιακή απώλεια του ελέγχου πάνω στις καθημερινές του αλληλεπιδράσεις.[23]

Η βαρηκοΐα ενδέχεται επίσης να συνδέεται με γνωστική έκπτωση και αυξημένο κίνδυνο άνοιας, ιδίως στους ηλικιωμένους, καθώς ο εγκέφαλος αναγκάζεται να διαθέτει περισσότερους πόρους για την ακουστική επεξεργασία εις βάρος άλλων γνωστικών λειτουργιών, ενώ η κοινωνική απομόνωση επιδεινώνει περαιτέρω τη γνωστική επιβάρυνση. Η έγκαιρη χρήση ακουστικών βαρηκοΐας και λοιπών παρεμβάσεων φαίνεται να βελτιώνει δείκτες ποιότητας ζωής και να μειώνει τον ψυχοκοινωνικό αντίκτυπο.[23]

### **4.3.3 Εκπαίδευση και επαγγελματική λειτουργικότητα**

Στο εκπαιδευτικό πλαίσιο, η απώλεια ακοής δυσχεραίνει την παρακολούθηση προφορικών μαθημάτων, ιδίως όταν απουσιάζουν οπτικά βοηθήματα, συστήματα ενίσχυσης ή προσαρμοσμένες διδακτικές πρακτικές. Τα παιδιά και οι νέοι με βαρηκοΐα χρειάζεται να καταβάλλουν υπερβολική προσπάθεια για να παρακολουθήσουν, γεγονός που οδηγεί σε κόπωση, διάσπαση προσοχής και συχνά σε χαμηλότερη σχολική επίδοση ή αποθάρρυνση από περαιτέρω σπουδές.[45]

Στον χώρο εργασίας, η μειωμένη ακουστική ικανότητα επηρεάζει την κατανόηση οδηγιών, τη συμμετοχή σε συναντήσεις και την αποτελεσματική χρήση τηλεφώνου ή τηλεδιασκέψεων, ιδίως σε περιβάλλοντα με θόρυβο ή κακή ακουστική. Η μη αντιμετωπισμένη βαρηκοΐα σχετίζεται με αυξημένο κίνδυνο ανεργίας ή απώλειας εργασίας, μειωμένες οικονομικές απολαβές και περιορισμό στην επιλογή επαγγελμάτων που απαιτούν λεπτή ακουστική διάκριση ή γρήγορη αντίδραση σε ηχητικά σήματα.[41]

### **4.3.4 Ασφάλεια και σωματική υγεία**

Η αδυναμία έγκαιρης αντίληψης προειδοποιητικών σημάτων, όπως κόρνες, σειρήνες, συναγερμοί καπνού ή κλήσεις για βοήθεια, αυξάνει τον κίνδυνο ατυχημάτων τόσο στον δρόμο όσο και στο σπίτι ή στον χώρο εργασίας. Σε μεγάλο βαθμό, τα άτομα με βαρηκοΐα βασίζονται περισσότερο στην όραση ή σε εναλλακτικά μέσα ειδοποίησης, γεγονός που σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού ή οπτικής απόσπασης μπορεί να αποβεί κρίσιμο.[16]

Η απώλεια ακοής έχει συσχετιστεί και με αυξημένο κίνδυνο πτώσεων στους ηλικιωμένους, πιθανώς λόγω μειωμένης ικανότητας χωρικού προσανατολισμού και μειωμένης πρόσληψης ακουστικών πληροφοριών από το περιβάλλον. Επιπλέον, το χρόνιο στρες που προκαλεί η επικοινωνιακή δυσχέρεια μπορεί να συμβάλει έμμεσα σε σωματικά προβλήματα, όπως διαταραχές ύπνου και αυξημένη κόπωση.[32]

### **4.3.5 Επιπτώσεις στην καθημερινή αυτονομία**

Στην καθημερινότητα, ακόμη και απλές δραστηριότητες, όπως η χρήση τηλεφώνου, η εξυπηρέτηση σε δημόσιες υπηρεσίες ή η κατανόηση ανακοινώσεων σε μέσα μαζικής μεταφοράς, μπορούν να μετατραπούν σε σύνθετες και αγχωτικές διαδικασίες. Η ανάγκη για υψηλότερη ένταση σε συσκευές ήχου (τηλεόραση, ραδιόφωνο, κινητό) δημιουργεί πολλές φορές εντάσεις στο οικογενειακό περιβάλλον και περιορίζει την άνεση κοινής χρήσης των μέσων.[23][43]

Παράλληλα, η αποφυγή τηλεφωνικών κλήσεων ή αυτοπρόσωπων συναλλαγών λόγω φόβου μη κατανόησης οδηγεί σε μεγαλύτερη εξάρτηση από τρίτους για απλές υποθέσεις, υπονομεύοντας το αίσθημα αυτονομίας. Με την πάροδο του

χρόνου, αυτό μπορεί να διαμορφώσει ένα μοτίβο παθητικότητας και απόσυρσης από δραστηριότητες που παλαιότερα ήταν αυτονόητες.[23][43]

#### **4.3.6 Ποιότητα ζωής και πρόσβαση σε ψυχαγωγία**

Η βαρηκοΐα επηρεάζει ουσιαστικά την απόλαυση της μουσικής, του κινηματογράφου, του θεάτρου και γενικότερα των ηχητικών πτυχών της ψυχαγωγίας, καθώς η ομιλία, τα μουσικά όργανα ή τα ηχητικά εφέ δεν γίνονται αντιληπτά με την ίδια καθαρότητα ή πληρότητα. Η συνεχής ανάγκη για υπότιτλους, υψηλή ένταση ή ειδικές θέσεις σε αίθουσες εκδηλώσεων μπορεί να περιορίσει τη συμμετοχή σε πολιτιστικές δραστηριότητες.[17][20]

Σε άτομα με σοβαρή ή βαθιά απώλεια ακοής, η έλλειψη ακουστικής πρόσβασης στη μουσική και στους ήχους του περιβάλλοντος στερεί ένα σημαντικό μέσο συναισθηματικής έκφρασης και σύνδεσης με τους άλλους. Η διεθνής και ελληνική βιβλιογραφία υπογραμμίζει την ανάγκη ανάπτυξης συμπληρωματικών τεχνολογιών (οπτικών, υποτιτλισμού, απτικών διεπαφών) ώστε να διασφαλίζεται ισότιμη πρόσβαση στην πολιτιστική ζωή και στην πολυτροπική εμπειρία του ήχου.[17]

#### **4.3.7 Συνολική θεώρηση και ανάγκη παρεμβάσεων**

Συνολικά, η απώλεια ακοής δεν περιορίζεται σε ένα αισθητηριακό έλλειμμα αλλά επηρεάζει δομικά την κοινωνική λειτουργικότητα, την εργασιακή ικανότητα, την ψυχική υγεία και την αίσθηση ασφάλειας και αυτονομίας. Ο συνδυασμός εξατομικευμένης ωτορινολαρυγγολογικής εκτίμησης, ακουστικών βοηθημάτων, συμβουλευτικής και χρήσης τεχνολογιών υποστήριξης επικοινωνίας μπορεί να μετριάσει σημαντικά αυτές τις επιπτώσεις και να βελτιώσει την ποιότητα ζωής των ατόμων με βαρηκοΐα.

Η κοινωνική ευαισθητοποίηση και η άρση του στίγματος γύρω από τα ακουστικά βαρηκοΐας και τις συναφείς τεχνολογίες αποτελούν κρίσιμες προϋποθέσεις για την έγκαιρη αναζήτηση βοήθειας και την πλήρη αξιοποίηση των διαθέσιμων παρεμβάσεων. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, καινοτόμες λύσεις, όπως συστήματα μετατροπής του ήχου σε άλλες αισθητηριακές μορφές (οπτικές ή απτικές), μπορούν να συμβάλουν συμπληρωματικά στη μείωση του λειτουργικού φορτίου που επιφέρει η απώλεια ακοής στην καθημερινότητα.

## Κεφάλαιο 5ο: Συναφείς εργασίες και συνεισφορά της παρούσας εργασίας

Η έρευνα γύρω από την ακουστική πρόσβαση ατόμων με προβλήματα ακοής και τη χρήση απτικής πληροφόρησης για μουσική και περιβάλλοντες ήχους έχει αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Σχετικές ανασκοπήσεις και πειραματικές εργασίες παρουσιάζουν ένα πλούσιο τοπίο από haptic συσκευές, τεχνικές audio-tactile mapping και συστήματα οπτικοποίησης, τα οποία ωστόσο παρουσιάζουν συγκεκριμένους περιορισμούς ως προς τη φορητότητα, την παραμετροποίηση και την ενοποιημένη υποστήριξη τόσο της μουσικής όσο και των περιβαλλοντικών ήχων. Η παρούσα εργασία τοποθετείται σε αυτό το πλαίσιο, επιδιώκοντας να αξιοποιήσει τα ευρήματα της βιβλιογραφίας και να προτείνει μια εφαρμογή που καλύπτει συγκεκριμένα κενά, όπως αναλύεται παρακάτω.

### 5.1 Ανασκόπηση σε audio-tactile rendering και haptic συσκευές

Η ανασκόπηση *“Audio-Tactile Rendering: A Review on Technology and Methods to Convey Musical Information through the Sense of Touch”* παρουσιάζει συστηματικές τεχνολογίες και μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί με σκοπό να μεταφέρουν μουσική πληροφορία μέσω της αφής, καλύπτοντας τόσο ψυχοφυσικές μελέτες (κατώφλια, συχνότητες άνεσης) όσο και πρακτικές προσεγγίσεις mapping έντασης, φάσματος και ρυθμού σε δονήσεις. Οι συγγραφείς ταξινομούν τα audio-tactile mappings σε βασικές κατηγορίες (άμεσο mapping έντασης, πολυζωνική φασματική αντιστοίχιση, υψηλού επιπέδου mappings με μουσικολογικά ή συναισθηματικά χαρακτηριστικά) ενώ επισημαίνουν τη σημασία της audio-tactile congruence, δηλαδή της χρονικής και φασματικής συνέπειας μεταξύ ήχου και δόνησης, για την επίτευξη της όσο το δυνατόν ικανοποιητικότερης εμπειρίας.[14][1]

Στην ανασκόπηση *“Tactile Displays for Auditory Augmentation”* παρουσιάζεται ένα ευρύ φάσμα απτικών διατάξεων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση ακουστικής πληροφορίας, από μονοκαναλικούς actuators έως πολυκαναλικά γιλέκα, καθίσματα και φορετές συσκευές, όπου αξιοποιούν την αίσθηση της αφής ως συμπληρωματικό κανάλι προς την ακοή. Η εργασία αυτή περιγράφει πώς οι tactile displays μπορούν να βοηθήσουν τόσο στην αναγνώριση μουσικής δομής όσο και στην ανίχνευση/ταυτοποίηση περιβαλλοντικών ήχων, αλλά επισημαίνει και τους περιορισμούς πολλών πρωτοτύπων, όπως ο όγκος, η πολυπλοκότητα εγκατάστασης και η έλλειψη τυποποιημένων μεθόδων mapping. Συμπληρωματικά, η ανασκόπηση *“Recent Developments in Haptic Devices Designed for Hearing-Impaired People – A Literature Review”* παρουσιάζει συσκευές που έχουν σχεδιαστεί για άτομα με προβλήματα ακοής, κατηγοριοποιώντας τις λύσεις ανάλογα με το σημείο εφαρμογής (κορμός, χέρια, πόδια, καθίσματα) και τον στόχο (μουσική, ειδοποιήσεις, ομιλία).[9][16]

### 5.2 Συστήματα για μουσική εμπειρία σε άτομα με προβλήματα ακοής

Ένα από τα πιο γνωστά και χρήσιμα συστήματα είναι η *“Haptic Chair”* (Απτική Καρέκλα) που εμφανίζεται στην εργασία *“Enhancing Musical Experience for the Hearing-Impaired Using Visual and Haptic Displays”* της ομάδας *“Nanayakkara”*. Συγκεκριμένα σε αυτό το έργο, γίνεται ανάλυση της μουσικής, απεικονίζεται οπτικά με δυναμικά γραφικά, ενώ ταυτόχρονα μετατρέπεται σε δονήσεις πολλαπλών συχνοτήτων που εφαρμόζονται σε διάφορα σημεία του καθίσματος, επιτρέποντας σε κωφούς και βαρήκοους χρήστες όχι απλά να καταλαβαίνουν αλλά να «νιώθουν» τον ρυθμό και την ένταση της μουσικής στο σώμα τους. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μια συνδυασμένη οπτική-απτική αναπαράσταση μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την απόλαυση και την κατανόηση της μουσικής δομής, αλλά η λύση παραμένει σταθερή (μη φορητή), προσανατολισμένη σε εργαστηριακό ή εγκαταστασιακό περιβάλλον.[17]

Το έργο *“FeelMusic – Enriching Our Emotive Experience of Music through Audio-Tactile”* προτείνει ένα σύστημα που εστιάζει στη συναισθηματική διάσταση της μουσικής, χρησιμοποιώντας πολυκαναλική vibrotactile διέγερση για να κωδικοποιήσει πληροφορίες όπως ένταση, φασματική «φωτεινότητα» και μουσικές κορυφώσεις σε χωρικά κατανεμημένα μοτίβα δονήσεων. Στο άρθρο εξετάζεται πώς διαφορετικοί συνδυασμοί συχνότητας, έντασης και θέσης στο σώμα μπορούν να αποδοθούν σε διαφορετικές συναισθηματικές καταστάσεις, προσφέροντας ένα παράδειγμα «υψηλού επιπέδου» mapping που δεν περιορίζεται στην απλή μεταφορά ρυθμού ή μπάσου. Αντίστοιχα, στην εργασία *“A Way for Deaf and Hard of Hearing People to Enjoy Music by Exploring and Customizing Cross-modal Music Concepts”* (Hoggan et al.) παρουσιάζεται ένα σύστημα όπου χρήστες με προβλήματα ακοής μπορούν να πειραματιστούν με cross-modal αντιστοιχίσεις μουσικής σε χρώμα, σχήμα και δόνηση, με μεγαλύτερη παραμετροποίηση καθώς έχουν την ευχέρεια να επιλέγουν οι ίδιοι mappings που βρίσκουν πιο κατανοητά ή ευχάριστα.[6][20]

Επιπλέον, το έργο “*New Haptic Systems for Elicit Emotions in Audio-Visual Events for Hearing-Impaired People*” προτείνει νέες haptic διατάξεις με στόχο την πρόκληση συγκεκριμένων συναισθηματικών καταστάσεων κατά τη διάρκεια οπτικοακουστικών γεγονότων, αξιοποιώντας προσεκτικά σχεδιασμένα μοτίβα δόνησης που λαμβάνουν υπόψη τα ψυχοφυσικά όρια της αφής και το περιεχόμενο των οπτικοακουστικών ερεθισμάτων. Συνολικά, τέτοια συστήματα φαίνεται πως βελτιώνουν την εμπειρία ατόμων με προβλήματα ακοής, επειδή η απτική πληροφόρηση μπορεί να ενισχύσει ουσιαστικά τη μουσική. Όμως, το πρόβλημα της προσβασιμότητας/παραμετροποίησης για πολλούς χρήστες παραμένει, γιατί χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένα setups, εστίαση κυρίως στη μουσική και περιορισμένη φορητότητα.[19]

### 5.3 Μελέτες για vibrotactile enhancement και audio-tactile congruence

Πέρα από τις ολοκληρωμένες συσκευές, αρκετές εργασίες εστιάζουν αναλυτικά στην επίδραση της vibrotactile ενίσχυσης στη μουσική εμπειρία και στην πολυαισθητηριακή ολοκλήρωση ήχου-αφής. Η εργασία “*Vibrotactile Enhancement of Musical Engagement (Scientific Reports)*” αξιολογεί πώς η προσθήκη vibrotactile δόνησης, συγχρονισμένης με τον ρυθμό και τη δομή της μουσικής, επηρεάζει την εμπλοκή των χρηστών, καταγράφοντας αυξημένη υποκειμενική απόλαυση και μεγαλύτερη κινητική συμμετοχή (π.χ. κίνηση στο beat) όταν η δόνηση είναι κατάλληλα σχεδιασμένη. Η μελέτη αυτή υποστηρίζει ότι η δόνηση μπορεί να λειτουργήσει ως «γέφυρα» ανάμεσα στη μουσική και στο σώμα, ιδιαίτερα όταν η ακουστική οδός είναι περιορισμένη.[13]

Στην εργασία “*Effect of Audio-Tactile Congruence on Vibrotactile Music Enhancement*” διερευνάται ο ρόλος της audio-tactile congruence, όπου συγκρίνοντας συνθήκες με την δόνηση να βρίσκεται χρονικά και φασματικά συνεπής με τη μουσική και με συνθήκες όπου είναι ασύμβατη ή καθυστερημένη. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μόνο η συνεπής δόνηση οδηγεί σε βελτίωση της υποκειμενικής μουσικής εμπειρίας· ενώ το αντίθετο μπορεί να προκαλέσει σύγχυση και να μειώσει την ποιότητα, κάτι που επιβεβαιώνεται από τα συμπεράσματα της ανασκόπησης “*Audio-Tactile Rendering*” για τη σημασία της προσεκτικής σχεδίασης του mapping. Επιπλέον, η μελέτη “*Exposure to Vibrotactile Music Improves Audiometric Performances*” σε χρήστες κοχλιακών εμφυτευμάτων καταγράφει ότι μια περίοδος συστηματικής έκθεσης σε μουσική με vibrotactile υποστήριξη σχετίζεται με βελτιώσεις σε συγκεκριμένες ακουομετρικές μετρήσεις, υποδεικνύοντας πιθανή διακαναλική πλαστικότητα και ενισχύοντας την ιδέα ότι η απτική πληροφορία μπορεί να υποστηρίξει όχι μόνο την απόλαυση αλλά και την ακουστική εκπαίδευση.[10][14][7]

### 5.4 Βιομηχανικές προσεγγίσεις και πατέντες

Ένα παράδειγμα πιο «βιομηχανικής» προσέγγισης αποτελεί η πατέντα “*System, Methods and Devices for Audio-Tactile Mapping*”, όπου περιγράφεται ένα πλήρες pipeline επεξεργασίας του ηχητικού σήματος και μετατροπής του σε απτικό σήμα. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει στάδια φιλτραρίσματος, ανάλυσης φάσματος, συμπίεσης δυναμικής και επιλογής κατάλληλων συχνοτικών περιοχών, με στόχο να μεταφερθεί η πιο σχετική πληροφορία στο απτικό κανάλι, λαμβάνοντας υπόψη τα όρια ευαισθησίας της αφής και την ανάγκη αποφυγής υπερφόρτωσης του χρήστη με υπερβολικά περίπλοκα patterns. Η πατέντα δείχνει την κατεύθυνση προς εμπορικά προϊόντα που ενσωματώνουν audio-tactile λειτουργίες, αλλά λειτουργεί σε κλειστό πλαίσιο, χωρίς να δίνει έμφαση στην ανοιχτή παραμετροποίηση από τον τελικό χρήστη ή στην υποστήριξη διαφορετικών συσκευών και σεναρίων χρήσης.[18]

### 5.5 Κενά στη βιβλιογραφία και συνεισφορά της παρούσας εργασίας

Η βιβλιογραφία για audio-tactile rendering δείχνει ότι υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις χαρτογράφησης μουσικής/ήχου σε δόνηση, αλλά η υλοποίηση σε πρακτικά συστήματα συχνά διαφέρει ως προς τον στόχο (μουσική εμπειρία, συναισθηματική ενίσχυση, ειδοποιήσεις) και το επίπεδο ελέγχου που δίνεται στον χρήστη. Παράλληλα, εργασίες που μελετούν την audio-tactile congruence τονίζουν ότι η χρονική συνέπεια (χαμηλή καθυστέρηση/σωστός συγχρονισμός) είναι κρίσιμη ώστε η δόνηση να λειτουργεί ενισχυτικά και όχι να υποβαθμίζει την εμπειρία.

Η παρούσα εργασία συνεισφέρει με την ανάπτυξη μιας εφαρμογής που μετατρέπει τον ήχο σε δόνηση σε πραγματικό χρόνο, αξιοποιώντας είσοδο από μικρόφωνο, ώστε να υποστηρίζει όχι μόνο προηχογραφημένο περιεχόμενο αλλά και “live” περιβάλλοντα (π.χ. ομιλία/περιβάλλον/ζωντανή μουσική) με άμεση απτική απόδοση. Η σχεδίαση αυτή τοποθετεί την εφαρμογή πιο κοντά στην κατηγορία “auditory augmentation μέσω αφής”, όπως περιγράφεται στη σχετική βιβλιογραφία, αλλά με έμφαση στην πρακτική υλοποίηση σε πραγματικό χρόνο.

### 5.5.1 Παραμετροποίηση με φίλτρα και passbands

Κεντρικό στοιχείο πρωτοτυπίας της εφαρμογής είναι ότι επιτρέπει στον χρήστη να ρυθμίζει το audio-tactile mapping μέσα από διαφορετικά φίλτρα/ζώνες διέλευσης (passbands), δηλαδή να επιλέγει ποιο τμήμα του φάσματος “μεταφέρεται” στο απτικό κανάλι και με ποια λογική. Αυτή η κατεύθυνση συνδέεται άμεσα με όσα συνοψίζει η ανασκόπηση για audio-tactile rendering σχετικά με φασματικές προσεγγίσεις (filterbank / band-based mapping) και με την ανάγκη να αποφεύγεται υπερφόρτωση της αφής με μη χρήσιμη πληροφορία. Σε πιο “βιομηχανικό” επίπεδο, αντίστοιχη λογική pipeline (ανάλυση/φιλτράρισμα/επιλογή συνιστωσών πριν το haptic output) εμφανίζεται και σε πατενταρισμένες προσεγγίσεις audio-tactile mapping, όμως εδώ μετατρέπεται σε λειτουργία που ελέγχεται και προσαρμόζεται από τον χρήστη μέσα στην εφαρμογή.

### 5.5.2 Έμφαση σε real-time congruence

Η εφαρμογή στοχεύει στη διατήρηση της χρονικής συνέπειας μεταξύ ήχου και δόνησης, επειδή η βιβλιογραφία δείχνει ότι η ασυμφωνία (π.χ. καθυστέρηση ή “λάθος” ταίριασμα) μπορεί να μειώσει το όφελος της vibrotactile ενίσχυσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν η είσοδος προέρχεται από μικρόφωνο, όπου η επεξεργασία πρέπει να είναι χαμηλής καθυστέρησης ώστε το απτικό feedback να παραμένει αντιληπτικά συνεπές με το ακουστικό γεγονός. Οπότε, με αυτόν τον τρόπο, η συνεισφορά της παρούσας εργασίας βρίσκεται στη σύνθεση των παραπάνω κατευθύνσεων σε μια πρακτική, παραμετροποιήσιμη και προσανατολισμένη στον χρήστη εφαρμογή, η οποία γεφυρώνει το χάσμα ανάμεσα στα κλινικά ακουστικά βοηθήματα και στα πειραματικά haptic συστήματα που έχουν παρουσιαστεί μέχρι σήμερα.

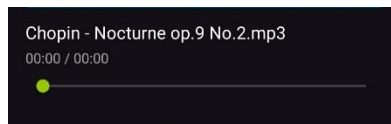
## Κεφάλαιο 6ο: Ανάλυση Απαιτήσεων και Σχεδίαση Συστήματος

Το σύστημα υλοποιείται σε περιβάλλον Android και η εφαρμογή είναι γραμμένη σε γλώσσα Kotlin, με σκοπό την μετατροπή ακουστικού σήματος (από αρχείο ή από μικρόφωνο) σε απτική ανάδραση μέσω του δονητή της συσκευής, με δυνατότητα παραμετροποίησης της απόκρισης με φίλτρα και ορισμού της ζώνη διέλευσης (passband). Η εφαρμογή περιλαμβάνει δύο βασικές λειτουργίες: (α) αναπαραγωγή επιλεγμένου audio αρχείου με παράλληλη δημιουργία δόνησης σύμφωνη με την πορεία της μελωδίας και (β) Καταγραφή από το μικρόφωνο, όπου ο ήχος λαμβάνεται σε πραγματικό χρόνο από AudioRecord και χαρτογραφείται σε δόνηση.

### 6.1 Σενάρια χρήσης (με/χωρίς προβλήματα ακοής, μουσική, περιβάλλον, mic mode)

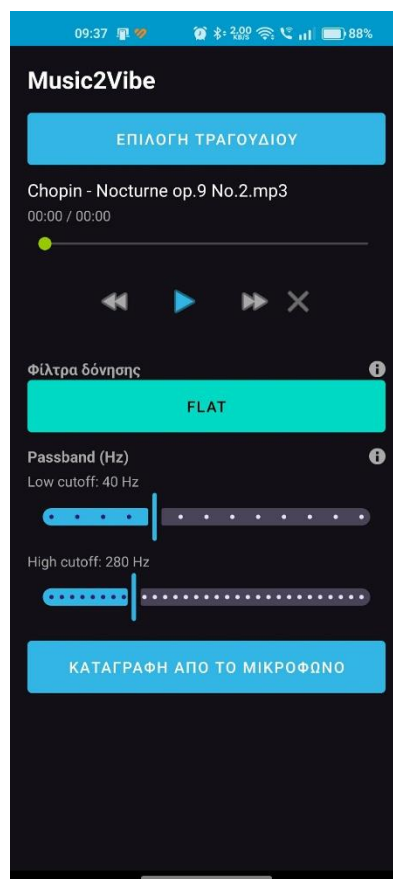
#### 6.1.2 Σενάριο Α: Ακρόαση μουσικής από αρχείο (τυπικός χρήστης)

Ο χρήστης επιλέγει αρχείο ήχου μέσω file picker (Intent ACTION\_GET\_CONTENT μεtype="audio/\*"), το σύστημα αποθηκεύει το URI και εμφανίζει το όνομα του αρχείου στην ένδειξη κομματιού.

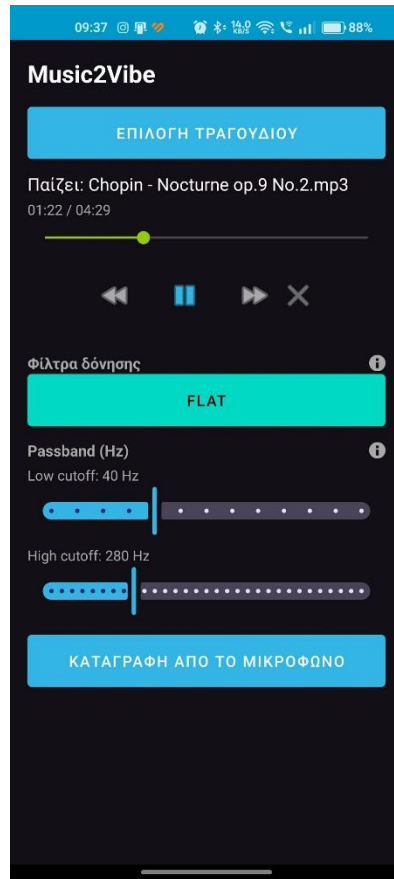


Εικόνα 6.1 txtSong label

Στη συνέχεια ο χρήστης μπορεί να ξεκινά/παύει την αναπαραγωγή με το κουμπί play/pause, διακόπτει με το stop, και μετακινείται χρονικά με seekbar ή τα κουμπιά  $\pm 5s$ . Κατά την αναπαραγωγή ενημερώνεται η ένδειξη χρόνου και η θέση της seekbar ανά  $\sim 200$  ms, όταν ο χρήστης δεν κάνει χειροκίνητο seek.



Εικόνα 6.2 Αρχική Οθόνη



Εικόνα 6.3 Αρχική Οθόνη κατά την αναπαραγωγή.

### 6.1.2 Σενάριο Β: Χρήση από άτομα με απώλεια ακοής (προσαρμογή απτικής απόκρισης)

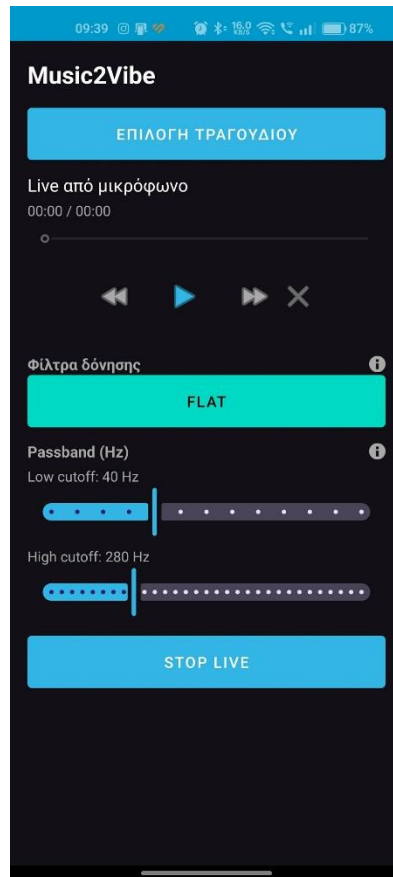
Ο χρήστης μπορεί να προσαρμόσει την απτική εμπειρία επιλέγοντας φίλτρο (Flat, A-weight, C-weight, Z-weight) ώστε να αλλάξει η στάθμιση του σήματος πριν παραχθεί η δόνηση. Επιπλέον, με την ρύθμιση του passband, ο χρήστης ρυθμίζει low/high cutoffs από sliders και το σύστημα ενημερώνει δυναμικά το παράθυρο απτικής “ζώνης” (TactileWindow) που επηρεάζει την ενίσχυση/απόσβεση ανά ζώνη συχνότητας. Με το Passband μπορεί ο χρήστης να προσαρμόσει τις συχνότητες δόνησης που δεν επιθυμεί να εκτελεστούν. Το low cutoff δέχεται τιμή από 20 Hz έως 80 Hz και σημαίνει πως όλες οι συχνότητες κάτω από την τιμή επιλογής, δεν αποδίδονται στην τελική εκτέλεση. Το high cutoff δέχεται τιμή από 200 Hz έως 500 Hz, οπότε όλες οι συχνότητες πάνω από την τιμή επιλογής δεν θα αποδοθούν επίσης.



Εικόνα 6.4 Κουμπί επιλογής φίλτρου

### 6.1.3 Σενάριο Γ: Live Mic (περιβάλλον ή ζωντανός ήχος)

Ο χρήστης πατά το κουμπί «Καταγραφή από το μικρόφωνο» και αν δεν έχει δοθεί άδεια RECORD\_AUDIO, η εφαρμογή ζητά runtime permission και ξεκινά μόνο μετά την έγκριση. Στο Live Mic mode δημιουργείται AudioRecord με 48 kHz mono (ENCODING\_PCM\_16BIT) και γίνεται συνεχής ανάγνωση frame-buffer, ώστε η απτική ανάδραση να ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο. Για αποφυγή μπερδέματος και σύγκρουσης λειτουργιών, όταν είναι ενεργή η καταγραφή μικροφώνου, η εφαρμογή απενεργοποιεί τα playback controls (play/rew/fwd/seekbar) και εμφανίζει κατάσταση “Live από το μικρόφωνο”, ενώ το κουμπί από «Καταγραφή από το μικρόφωνο», μετονομάζεται σε «Stop live», που πατώντας το ξανά απενεργοποιεί την λειτουργία.



Εικόνα 6.5 Αρχική Οθόνη κατά τη διάρκεια της real-time λειτουργίας

## 6.2 Λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις

### 6.2.1 Λειτουργικές απαιτήσεις

- Επιλογή αρχείου ήχου από τοπική πηγή μέσω του picker του τηλεφώνου και εμφάνιση του ονόματος του (DISPLAY\_NAME) στο UI ώστε να γνωρίζει ο χρήστης ποιο έχει επιλεγεί.
- Έλεγχος αναπαραγωγής (play/pause/stop) και χρονική πλοήγηση (seekbar,  $\pm 5s$ ), με συγχρονισμένη ενημέρωση UI.
- Ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της καταγραφής από το μικρόφωνο με έλεγχο άδειας, εκκίνηση/τερματισμό AudioRecord και καθαρισμό της απτικής εξόδου.
- Επιλογή φίλτρων και ρύθμιση passband (low/high cut) από το UI, με άμεση εφαρμογή τους στο pipeline της απτικής χαρτογράφησης.

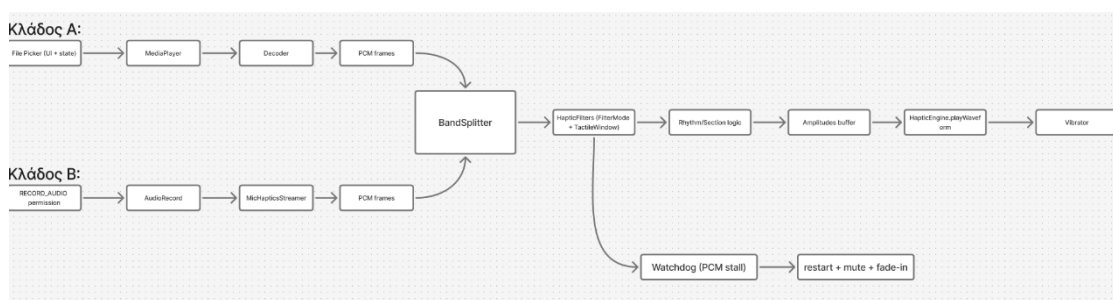
### 6.2.2 Μη λειτουργικές απαιτήσεις

- **Χαμηλή καθυστέρηση:** Η εφαρμογή χρησιμοποιεί χρονισμό frame (π.χ. 10 ms) και στέλνει amplitudes σε πακέτα (packetFrames) ώστε η κυματομορφή της δόνησης να ενημερώνεται συχνά και να παραμένει ομαλή.

- **Ανθεκτικότητα ροής/decoder:** Υπάρχει μηχανισμός επιτήρησης που ανιχνεύει καθυστέρηση στην άφιξη PCM (π.χ. >2 s) και επανεκκινεί τον decoder από την τρέχουσα θέση, με προσωρινό mute και fade-in ramp μετά την επανεκκίνηση.
- **Συμβατότητα με συσκευές:** Γίνεται έλεγχος αν υποστηρίζεται amplitude control (hasAmplitudeControl) ώστε η παραγωγή δόνησης να λειτουργεί σε περισσότερες συσκευές.
- **Ασφάλεια τερματισμού:** Σε stop paths η εφαρμογή εκτελεί cancel/stop στον δονητή και καθαρίζει buffers, ώστε να μην παραμένει ενεργή δόνηση.

### 6.3 Αρχιτεκτονική συστήματος (διαγράμματα block / UML)

Η αρχιτεκτονική οργανώνεται σε επίπεδο ελέγχου (MainActivity) και σε δύο pipelines εισόδου ήχου που συγκλίνουν σε κοινό pipeline επεξεργασίας και απτικής εξόδου. Στο pipeline “αρχείου”, ο MediaPlayer παρέχει clock/θέση αναπαραγωγής ενώ ο decoder τροφοδοτεί frames PCM στο callback, όπου εκτελείται φασματική ανάλυση, gating/ρυθμός και τελικά δημιουργία amplitudes. Στο pipeline “Live Mic”, ο MicHapticsStreamer διαβάζει PCM από AudioRecord και εφαρμόζει την ίδια λογική band splitting, φίλτρων και παραγωγής παλμών/έντασης πριν στείλει amplitudes στον HapticEngine.



Εικόνα 6.6: Διάγραμμα block

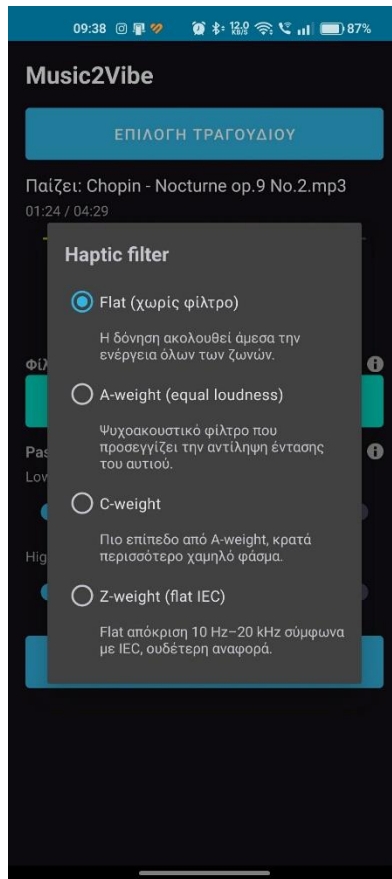
### 6.4 Σχεδίαση διεπαφής χρήστη (οθόνες, ροή, επιλογές φίλτρων και passband, info icons)

Η κύρια οθόνη περιλαμβάνει τίτλο εφαρμογής, επιλογή αρχείου (btnPick), ένδειξη κομματιού (txtSong), χρονική ένδειξη (txtTime), seekbar και ομάδα χειριστηρίων αναπαραγωγής (rew/play-pause/fwd/stop).

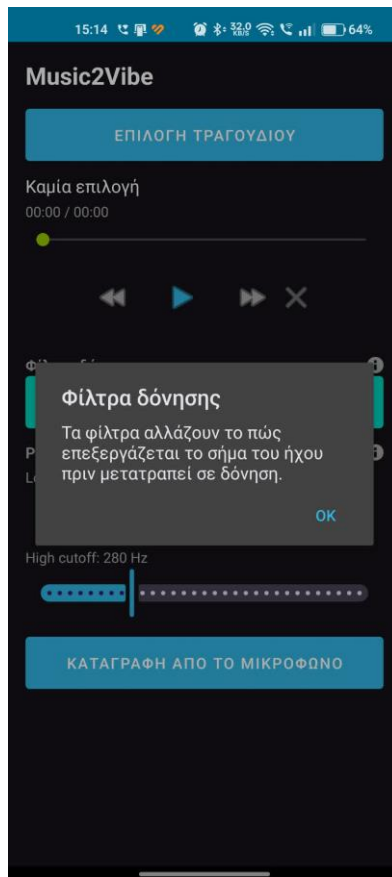


Εικόνα 6.7 Οθόνη ρυθμίσεων passband

Κάτω από τα playback controls υπάρχει block ρυθμίσεων φίλτρων: κουμπί επιλογής φίλτρου (btnFilter), block passband με info icon και δύο sliders (sliderLowCut,sliderHighCut) μαζί με τις αντίστοιχες ενδείξεις τιμών (txtLowCut,txtHighCut), καθώς και ξεχωριστό κουμπί “Live Mic” (btnLive). Η σχεδίαση προβλέπει “information points” μέσω εικονιδίων info, τα οποία ανοίγουν επεξηγηματικά AlertDialogs για φίλτρα και passband, ώστε ο χρήστης να κατανοεί τι αλλάζει λειτουργικά.



Εικόνα 6.8 Dialog επιλογής φίλτρου.



Εικόνα. 6.9 Info dialog

## 6.5 Απαιτήσεις προσβασιμότητας

Η εφαρμογή υποστηρίζει χρήστες με απώλεια ακοής, προσφέροντας απτική αναπαράσταση της έντασης και του ρυθμού, τόσο από μουσικά αρχεία όσο και από ήχους περιβάλλοντος μέσω Live Mic. Η επιλογή φίλτρων (Flat/A/C/Z) και η ρύθμιση του Passband επιτρέπουν την προσαρμογή της απτικής εμπειρίας στις ανάγκες κάθε χρήστη, δίνοντας έμφαση σε διαφορετικές συχνотικές ζώνες ανάλογα με το προφίλ χρήσης. Παράλληλα, η ασφαλής διαχείριση της δόνησης είναι κρίσιμη, ώστε να αποφεύγεται ανεπιθύμητη ή συνεχόμενη ανάδραση που θα μπορούσε να μειώσει την άνεση και να υποβαθμίσει τη συνολική εμπειρία χρήσης.

## Κεφάλαιο 7ο: Τεχνική Υλοποίηση της Εφαρμογής

Το Κεφάλαιο 7 περιγράφει αναλυτικά την τεχνική υλοποίηση μιας εφαρμογής Android που μετατρέπει ηχητική πληροφορία σε απτική ανάδραση, με στόχο η δόνηση να ακολουθεί τον ρυθμό και τη “δομή” του ήχου με τρόπο σταθερό και προβλέψιμο. Η παρουσίαση οργανώνεται σκόπιμα σε επιμέρους “pipelines”, ώστε να φαίνεται καθαρά τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα περνά από (α) είσοδο ήχου (αρχείο ή μικρόφωνο), σε (β) PCM frames, σε (γ) ανάλυση (band splitting, RMS, envelopes, rhythm/section logic) και τελικά σε (δ) μια κυματομορφή δόνησης που αναπαράγεται από το Vibrator. Παράλληλα, δίνεται έμφαση στα πρακτικά θέματα που εμφανίζονται σε πραγματικές συσκευές: χρονισμός, καθυστερήσεις, “κολλήματα” στην παραγωγή PCM, καθώς και περιορισμοί που εξαρτώνται από το hardware και την έκδοση Android (π.χ. δυνατότητα ελέγχου amplitude). Με αυτή τη λογική, το κεφάλαιο δεν λειτουργεί ως απλή περιγραφή αρχείων, αλλά ως μια χαρτογράφηση σχεδιαστικών επιλογών: ποιο κομμάτι του κώδικα αναλαμβάνει τι, γιατί η επεξεργασία γίνεται σε frames, και πώς εξασφαλίζεται ότι η απτική έξοδος παραμένει ομαλή ακόμη και όταν το audio pipeline δεν συμπεριφέρεται ιδανικά.

### 7.1 Πλατφόρμα Android, Kotlin, δομή έργου

#### 7.1.1 Πλατφόρμα Android: δυνατότητες και περιορισμοί

Η πλατφόρμα Android παρέχει APIs (Application Programming Interfaces: διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών) τόσο για πολυμέσα/ήχο (π.χ. MediaPlayer) όσο και για απτική έξοδο μέσω Vibrator και VibrationEffect, επιτρέποντας την παραγωγή δονούμενων “μοτίβων” από την εφαρμογή. Κρίσιμο στοιχείο είναι ότι το VibrationEffect.createWaveform(...) υλοποιεί waveform (κυματομορφή/μοτίβο δόνησης ως ακολουθία χρονισμών και εντάσεων), κάτι που ταιριάζει σε σενάρια όπου παράγονται διαδοχικές τιμές amplitude (ένταση δόνησης) από την επεξεργασία ήχου.

- Στην υλοποίηση, η κλάση HapticEngine δημιουργεί πίνακα χρονισμών (timings: διάρκειες ανά “βήμα”) με σταθερό frameMs και τον συνδυάζει με πίνακα amplitudes, ώστε να προκύψει VibrationEffect.createWaveform(timings, amplitudes, repeat).
- Η πρόσβαση σε μικρόφωνο απαιτεί RECORD\_AUDIO permission (άδεια πρόσβασης σε καταγραφή ήχου) και, σε νεότερες εκδόσεις, χρειάζεται έγκριση σε runtime (κατά την εκτέλεση) πριν ξεκινήσει η ροή.
- Επειδή η παραγωγή PCM (Pulse-Code Modulation: κωδικοποίηση δειγμάτων ήχου ως ακέραιες τιμές) μπορεί να διακοπεί προσωρινά, ενσωματώθηκε watchdog (μηχανισμός επιτήρησης) που ανιχνεύει stall (πάγωμα ροής δεδομένων) με βάση τον χρόνο τελευταίου PCM frame και εκκινεί διαδικασία ανάκαμψης.

#### 7.1.2 Kotlin: λόγοι επιλογής και γλωσσικά χαρακτηριστικά

Η Kotlin επιλέχθηκε επειδή παρέχει μηχανισμό null-safety (ασφάλεια έναντι τιμών null μέσω συστήματος τύπων), ο οποίος μειώνει σφάλματα τύπου NullPointerException και καθιστά σαφέστερη τη μοντελοποίηση “προαιρετικών” υποσυστημάτων (π.χ. player, mic streamer). Στην πράξη, αυτό αντικατοπτρίζεται σε nullable αναφορές όπως mediaPlayer: MediaPlayer?, selectedUri: Uri? και micStreamer: MicHapticsStreamer?, οι οποίες επιβάλλουν ελεγχόμενη πρόσβαση μόνο όταν υπάρχει έγκυρη κατάσταση λειτουργίας.

- Η Kotlin διευκολύνει επίσης την οργάνωση βοηθητικών συναρτήσεων (helpers: μικρές υποστηρικτικές συναρτήσεις) για εξομάλυνση/κατωφλίωση και παραγωγή παλμών, όπως φαίνεται σε συναρτήσεις τύπου smooth(...), pulseDurations(...) και στις ρουτίνες δημιουργίας envelope (περιβάλλουσα παλμού, π.χ. ADSR).
- Η υλοποίηση βασίζεται σε σαφή state variables (μεταβλητές κατάστασης), όπως active, liveMode, hapticThreadRunning, που καθορίζουν αν επιτρέπεται παραγωγή/αποστολή haptics σε κάθε χρονική στιγμή.

#### 7.1.3 Αρχιτεκτονική επεξεργασίας και κύριες ροές

Η αρχιτεκτονική ακολουθεί δύο εισόδους (file playback και live mic) που συγκλίνουν σε κοινό πυρήνα επεξεργασίας, ο οποίος παράγει amplitudes buffer (buffer: προσωρινή αποθήκευση τιμών) και στη συνέχεια τροφοδοτεί την απτική έξοδο ως waveform. Η βασική παραμετροποίηση του χρονισμού γίνεται μέσω frameMsCfg (frame: χρονικό πλαίσιο επεξεργασίας), packetFramesCfg (packetization: ομαδοποίηση πολλών frames σε ένα “πακέτο” εξόδου) και silenceShareThCfg (κατώφλι σιωπής/καταστολής όταν το ενεργειακό περιεχόμενο είναι πολύ χαμηλό).

- **Ροή αρχείου (file playback):** Η MainActivity εκκινεί decoder (decoder: αποκωδικοποιητής) μέσω startDecoderAt(...) και λαμβάνει PCM frames μέσω callback (callback: συνάρτηση επανάκλησης που καλείται όταν υπάρχει νέο δεδομένο).
- **Ροή μικροφώνου (live mic):** Η MicHapticsStreamer χρησιμοποιεί AudioRecord (μηχανισμός καταγραφής PCM από μικρόφωνο) και παράγει frames σταθερού μεγέθους από δειγματοληψία 48 kHz, εφαρμόζοντας gating (πύλη ενεργοποίησης: αγνόηση πολύ χαμηλού σήματος) πριν τη χαρτογράφηση σε haptics.
- **Κοινός κορμός χαρακτηριστικών:** Σε κάθε frame υπολογίζονται RMS ανά ζώνη μέσω BandSplitter.bandsRms(...) (RMS: τετραγωνική μέση τιμή ως μέτρο ενέργειας) και εφαρμόζεται φίλτρο μέσω HapticFilters.apply(...) με FilterMode (λειτουργία φίλτρου) και TactileWindow (παράθυρο απτικής “περατότητας”/στάθμισης συχνοτήτων).
- **Αξιοπιστία ροής (watchdog + ανάκαμψη):** Όταν ανιχνευθεί stall (~2 s χωρίς PCM frames), ενεργοποιείται restart του decoder και εφαρμόζεται mute (σίγαση) και fade-in (σταδιακή επαναφορά έντασης) μέσω μετρητή restartFadeFrames.

#### 7.1.4 Δομή έργου (modules και ρόλοι)

Η MainActivity λειτουργεί ως κεντρικός “ενορχηστρωτής” (orchestrator: συντονιστής) διαχείρισης UI, κατάστασης αναπαραγωγής, εκκίνησης/παύσης haptics και ελέγχου αξιοπιστίας μέσω watchdog. Η διεπαφή χρήστη ορίζεται στο activity\_main.xml (κεντρική οθόνη με επιλογή κομματιού, χρόνο/seekbar, player controls και επιλογές φίλτρων) και συμπληρώνεται από todialog\_filter\_bottom\_sheet.xml για επιλογή mode φίλτρου.

- HapticEngine.kt: απομονώνει το “hardware-facing” τμήμα (πρόσβαση σε vibrator) και τυποποιεί την αποστολή waveform με σταθερό frame duration.
- MicHapticsStreamer.kt: Υλοποιεί live pipeline από AudioRecord έως amplitudes και τελική αποστολή σε playWaveform, με πρόσθετες παραμέτρους όπως pre-gain (προενίσχυση) και gate threshold.
- BandSplitter.kt: Υλοποιεί biquad filters (διβάθμια φίλτρα IIR) και υπολογίζει RMS ανά ζώνη (low/mid/high) ώστε να στηριχθεί η μεταγενέστερη λογική χαρτογράφησης.
- HapticFilters.kt: Κωδικοποιεί “λειτουργίες φίλτρου” (FLAT, PASSBAND, AWEIGHT, CWEIGHT, ZWEIGHT) και επιστρέφει ζυγισμένες τιμές band energies, συμπεριλαμβανομένης passband weighting (στάθμιση συχνοτήτων εντός επιλεγμένου εύρους).

## 7.2 Audio Pipeline

### 7.2.1 Γενική περιγραφή pipeline

Το audio pipeline (αλυσίδα επεξεργασίας ήχου από την είσοδο έως τα παράγωγα δεδομένα) υλοποιείται ως δύο εναλλακτικές εισοδοί που συγκλίνουν σε κοινό πυρήνα ανάλυσης: (α) αναπαραγωγή αρχείου και (β) λήψη από το μικρόφωνο της συσκευής σε πραγματικό χρόνο (real-time: επεξεργασία με χρονικούς περιορισμούς ώστε να ακολουθεί τη ροή δεδομένων). Στο επίπεδο ελέγχου, η MainActivity λειτουργεί ως ενορχηστρωτής (orchestrator: κεντρικός συντονιστής ροής), που ξεκινά/παύει τις ροές και διατηρεί παραμέτρους χρονισμού όπως frameMsCfg (frame: χρονικό πλαίσιο επεξεργασίας) και packetFramesCfg (packetization: ομαδοποίηση πολλών frames σε ένα πακέτο). Η ενοποίηση των ροών επιτυγχάνεται επειδή τόσο η αποκωδικοποίηση αρχείου (decoding: μετατροπή συμπιεσμένου/δομημένου media σε ωμά δείγματα) όσο και η καταγραφή μικροφώνου οδηγούνται σε PCM (Pulse-Code Modulation: αναπαράσταση ήχου ως ακολουθία δειγμάτων).

### 7.2.2 Είσοδος από αρχείο (file playback)

Η λήψη αρχείου γίνεται μέσω του file picker που διαθέτει η συσκευή (επιλογέας αρχείου) με Intent.ACTION\_GET\_CONTENT και τύπο audio/\* για να μην επιλεγθεί κάτι διαφορετικό παρά μόνο αρχείο ήχου (mp3, wav κτλ), ενώ το επιλεγμένο Uri αποθηκεύεται στο selectedUri. Στο UI επίπεδο, μετά την επιλογή ενημερώνονται στοιχεία όπως το όνομα κομματιού μέσω getDisplayName(uri) και μηδενίζεται ο μετρητής χρόνου/seekbar, ώστε η αναπαραγωγή να ξεκινά σωστά. Η έναρξη ενεργοποιείται από togglePlayPause(), το οποίο, όταν δεν υπάρχει ενεργός MediaPlayer, καλεί startPlaybackAndHaptics(uri) για να ξεκινήσει ταυτόχρονα η αναπαραγωγή και η αντίστοιχη αποκωδικοποίηση/ανάλυση.

### 7.2.3 Έλεγχος αναπαραγωγής και χρονική βάση

Κατά τη διάρκεια playback, η MainActivity εκτελεί περιοδική ενημέρωση UI μέσω progressUpdater, ο οποίος διαβάζει currentPosition και duration από MediaPlayer και ενημερώνει το seekBar και το txtTime. Η ύπαρξη seek (μετακίνηση σε χρόνο) υλοποιείται μέσω seekTo(posMs) και seekBy(deltaMs), με αποτέλεσμα οποιαδήποτε αλλαγή θέσης στο MediaPlayer να συνοδεύεται από επανεκκίνηση της αποκωδικοποίησης/ανάλυσης από το νέο χρονικό σημείο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για το pipeline, διότι η ανάλυση δεν μπορεί να συνεχίσει “τυφλά” όταν αλλάζει η θέση αναπαραγωγής, αλλά χρειάζεται νέο σημείο εκκίνησης για να παραχθούν συνεπή PCM frames και παράγωγα χαρακτηριστικά (features: υπολογισμένα μεγέθη από το σήμα).

```
// File picker
binding.btnPick.setOnClickListener {
    pickAudioLauncher.launch(
        input = Intent( action = Intent.ACTION_GET_CONTENT).apply { type = "audio/*" }
    )
}
```

Εικόνα 7.1 file picker

```
private val pickAudioLauncher =
    registerForActivityResult( contract = ActivityResultContracts.StartActivityForResult() ) { result ->
        if (result.resultCode == Activity.RESULT_OK) {
            result.data?.data?.let { uri ->
                selectedUri = uri
                binding.txtSong.text = getDisplayName(uri)
                binding.txtTime.text = "00:00 / 00:00"
                binding.seekBar.progress = 0
            }
        }
    }

private fun getDisplayName(uri: Uri): String =
    try {
        contentResolver.query(uri, projection = null, selection = null, selectionArgs = null, sortOrder = null).use { c ->
            if (c != null && c.moveToFirst()) {
                val idx = c.getColumnIndex( columnName = OpenableColumns.DISPLAY_NAME )
                if (idx >= 0) c.getString( columnIndex = idx ) else "audio"
            } else "audio"
        }
    } catch (_: Exception) {
        "audio"
    }
```

Εικόνα 7.2 συναρτήσεις pickAudioLauncher(...) και getDisplayName(...)

```

private fun togglePlayPause() {
    if (liveMode) {...}
    val mp = mediaPlayer
    if (mp == null) {...}
    if (mp.isPlaying) {
        val pos = mp.currentPosition
        mp.pause()
        stopHapticsNow()
        binding.seekBar.progress = pos
        binding.txtTime.text = "${formatTime(ms = pos)} / ${formatTime(ms = mp.duration)}"
        binding.btnPlayPause.setImageResource(android.R.drawable.ic_media_play)
    } else {
        val pos = mp.currentPosition
        active = true
        hapticThreadRunning = true
        tMs = pos.toLong()

        startDecoderAt(
            startUs = pos.toLong() * 1000L,
            frameMs = frameMsCfg,
            packetFrames = packetFramesCfg,
            silenceShareThreshold = silenceShareThCfg,
            pulseDurations = ::pulseDurations
        )

        mp.start()
        startWatchdog()
        binding.btnPlayPause.setImageResource(android.R.drawable.ic_media_pause)
    }
}

```

Eukóva 7.3 togglePlayPause(...)

```

private val progressUpdater = object : Runnable {
    override fun run() {
        val mp = mediaPlayer
        if (mp != null && mp.isPlaying && !userSeeking) {
            val pos = mp.currentPosition
            val dur = mp.duration.takeIf { it > 0 } ?: 0
            binding.seekBar.max = dur
            binding.seekBar.progress = pos
            binding.txtTime.text = "${formatTime(ms = pos)} / ${formatTime(ms = dur)}"
        }
        uiHandler.postDelayed(r = this, delayMillis = 200)
    }
}

```

Eukóva 7.4 progressUpdater(...)

```

private fun seekTo(posMs: Int) {
    if (liveMode) return
    val mp = mediaPlayer ?: return
    mp.seekTo( msec = posMs)
    tMs = posMs.toLong()

    startDecoderAt(
        startUs = posMs.toLong() * 1000L,
        frameMs = frameMsCfg,
        packetFrames = packetFramesCfg,
        silenceShareThreshold = silenceShareThCfg,
        pulseDurations = ::pulseDurations
    )
}

```

Εικόνα 7.5 συνάρτηση seekTo(...)

### 7.2.7 Είσοδος από μικρόφωνο (real-time)

Η λειτουργία μικροφώνου ενεργοποιείται από startMicMode() στη MainActivity αφού πρώτα ζητηθεί άδεια για την χρήση του μικροφώνου από την εφαρμογή. Εκεί αρχικοποιείται HapticEngine, μηδενίζονται μεταβλητές ανάλυσης (π.χ. envelopes: εξομαλυμένες περιβάλλουσες ενέργειας) και δημιουργείται MicHapticsStreamer με τις παραμέτρους frameMsCfg, packetFramesCfg, silenceShareThCfg. Η MicHapticsStreamer βασίζεται σε AudioRecord (κλάση καταγραφής PCM από μικρόφωνο), με AudioFormat PCM 16-bit και mono, και sample rate 48 kHz, ενώ επιλέγει audio source VOICE\_RECOGNITION (πηγή με προσανατολισμό σε καθαρότητα φωνής/μείωση επεξεργασιών, ανά συσκευή). Το frame size σε δείγματα ορίζεται ως frameSamples = sampleRate \* frameMs / 1000, δηλαδή η ροή κατακερματίζεται σε σταθερά χρονικά πλαίσια σύμφωνα με τη ρύθμιση frameMs. Η εκτέλεση γίνεται σε ξεχωριστό thread (νήμα εκτέλεσης) που διαβάζει επαναληπτικά ShortArray (frameSamples) από το AudioRecord.read(...) και προωθεί κάθε frame στη μέθοδο onMicFrame(...). Στο onMicFrame(...) υπολογίζεται RMS (Root Mean Square: τετραγωνική μέση τιμή ως δείκτης ενέργειας) και εφαρμόζεται mic pre-gain (προενίσχυση) και gating threshold (κατώφλι πύλης: απόρριψη πολύ χαμηλής στάθμης), ώστε να περιορίζεται η επίδραση θορύβου. Η ακριβής λογική φαίνεται από τις παραμέτρους micPreGain, refRms, gateRms και τον έλεγχο if (boosted < gateRms) appendAmp(0) ... return.

```

@RequiresApi( value = Build.VERSION_CODES.O)
private val micPermissionLauncher =
    registerForActivityResult( contract = ActivityResultContracts.RequestPermission() ) { granted ->
        if (granted) startMicMode()
        else Toast.makeText( context = this, text = "Άδεια μικροφώνου απορρίφθηκε", duration = Toast.LENGTH_SHORT).show()
    }

```

Εικόνα 7.6 Permission Request

```

private fun startMicMode() {
    activeDecoderSession += 1

    stopHapticsNow()
    synchronized( lock = ampts ) { ampts.clear() }
    vibrator?.cancel()
    hardStopPlaybackOnly()

    lowEnv = 0.0
    midEnv = 0.0
    highEnv = 0.0
    frameTick = 0L
    beatIndex = 0
    tMs = 0L
    lastIntervalMs = -1.0
    tempoStableCount = 0
    strongBeatsEnabled = false
    streamingMuteUntilMs = -1L
    beatsSuppressedUntilMs = -1L
    restartFadeFrames = 0

    haptic = HapticEngine( context = this )
    if (Build.VERSION.SDK_INT >= Build.VERSION_CODES.O) {
        hasAmpControl = haptic.hasAmplitudeControl()
    }
    active = true
    hapticThreadRunning = true

    micStreamer = MicHapticsStreamer(
        context = this,
        haptic = haptic,
        bandSplitter = bandSplitter,
        tactileWindow = tactileWindow,
        filterModeProvider = { filterMode },
        frameMs = frameMsCfg,
        packetFrames = packetFramesCfg,
        silenceShareThreshold = silenceShareThCfg,
        pulseDurations = ::pulseDurations
    ).also { it.start() }

    liveMode = true
    binding.txtSong.text = "Live από μικρόφωνο"
    binding.btnLive.text = "Stop Live"
    setPlaybackControlsEnabled(false)
}

```

Εικόνα 7.7 MainActivity.startMicMode().

```

audioRecord = AudioRecord.Builder()
    .setAudioSource(MediaRecorder.AudioSource.VOICE_RECOGNITION)
    .setAudioFormat(
        AudioFormat.Builder()
            .setEncoding(AudioFormat.ENCODING_PCM_16BIT)
            .setChannelMask(AudioFormat.CHANNEL_IN_MONO)
            .setSampleRate(sampleRate)
            .build()
    )
    .setBufferSizeInBytes(bufferSize)
    .build()

```

Εικόνα 7.8 MicHapticsStreamer.start() με AudioRecord.Builder.

```

val rms = sqrt(x = sumSq / pcm.size.coerceAtLeast(minimumValue = 1))
val boosted = rms * micPreGain

if (boosted < gateRms) {
    appendAmp(a = 0)
    flushIfNeeded()
    return
}

```

Εικόνα 7.9 MicHapticsStreamer.onMicFrame(...) με RMS και gating

### 7.2.8 Κοινός κορμός ανάλυσης (band splitting, envelopes, rhythm)

Μετά το στάδιο εισόδου (είτε από αποκωδικοποίηση αρχείου είτε από AudioRecord), η ροή οδηγείται στον κοινό κορμό ανάλυσης, όπου παράγονται τα βασικά χαρακτηριστικά (features) που τροφοδοτούν το απτικό pipeline. Στο playback pipeline, όταν ο χρήστης επιλέξει στάθμιση A-weight ή C-weight, εφαρμόζεται αρχικά πλήρης καμπύλη στάθμισης απευθείας στο PCM σήμα μέσω PcmWeighting48k.processInPlace(...), αποκλειστικά για δειγματοληψία 48 kHz, ώστε το σήμα να “προσαρμόζεται” πριν τον υπολογισμό των ενεργειών ανά ζώνη.

Πιο αναλυτικά, η καμπύλη στάθμισης A υλοποιήθηκε μέσω μιας σειράς (cascade) τμημάτων δεύτερης τάξης (SOS - Second Order Sections). Η χρήση SOS επιλέχθηκε έναντι ενός ενιαίου φίλτρου υψηλής τάξης για την αποφυγή αριθμητικής αστάθειας και σφαλμάτων κβαντισμού των συντελεστών. Για το φίλτρο η καμπύλη στάθμισης σχεδιάζεται δυναμικά στο πεδίο των αναλογικών συχνοτήτων (s-domain) με βάση τις χαρακτηριστικές συχνότητες αποκοπής  $f1 = 20.6$  Hz και  $f4 = 12194.2$  Hz. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ο Διγραμμικός Μετασχηματισμός (Bilinear Transformation) για τη μεταφορά του φίλτρου στο ψηφιακό πεδίο (z-domain).

Για την εκτέλεση του φιλτραρίσματος χρησιμοποιήθηκε η δομή Direct Form II Transposed (Df2T). Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσφέρει το πλεονέκτημα της ελαχιστοποίησης των απαιτήσεων μνήμης (χρήση μόνο δύο στοιχείων καθυστέρησης ανά biquad) και παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά σε αριθμητική κινητής υποδιαστολής. Ένα κρίσιμο στάδιο στην υλοποίηση είναι η Κανονικοποίηση (Normalization). Προκειμένου το φίλτρο να συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές, η συνάρτηση μεταφοράς κανονικοποιείται έτσι ώστε το κέρδος (gain) στη συχνότητα αναφοράς των 1000 Hz (σημείο τομής των καμπυλών) να είναι ακριβώς 0 dB (μοναδιαίο κέρδος). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συνάρτησης freqzMag, η οποία υπολογίζει το μέτρο της απόκρισης συχνότητας στο ψηφιακό πεδίο και αναπροσαρμόζει τους συντελεστές του αριθμητή.

Στη συνέχεια η ροή περνά σε band splitting μέσω BandSplitter.bandsRms(...), όπου εφαρμόζονται biquad (διβάθμια IIR) φίλτρα και εξάγεται RMS ανά ζώνη χαμηλών/μεσαίων/υψηλών συχνοτήτων (low/mid/high). Έπειτα εφαρμόζεται HapticFilters.apply(mode, low, mid, high, tactileWindow) ώστε να εισαχθεί η τελική στάθμιση/προσαρμογή που σχετίζεται με το επιλεγμένο passband (μέσω TactileWindow) και να αποφευχθεί διπλή εφαρμογή A/C weighting όταν αυτό έχει ήδη γίνει στο PCM (δηλαδή, μετά το band splitting χρησιμοποιείται PASSBAND ή FLAT ανάλογα με την περίπτωση).

Στο pipeline μικροφώνου, η εξομάλυνση των ζωνών γίνεται με εκθετική εξομάλυνση smooth(prev, x, a), ώστε να μειώνονται οι απότομες μεταβολές στα RMS και να σταθεροποιούνται τα επόμενα στάδια λήψης αποφάσεων. Τέλος υπολογίζονται οι αναλογίες συμμετοχής (shares) των ζωνών, οι οποίες αξιοποιούνται σε αποφάσεις όπως “σιωπή/καταστολή” μέσω silenceShareThreshold, πριν η ροή περάσει στους ανιχνευτές ρυθμού/section και στην παραγωγή απτικών πακέτων.

```

class MainActivity : AppCompatActivity() {
    private fun startDecoderAt(
        Thread {
            callback = object : DirectDecoder.Callback {
                override fun onPcmFrame(pcm: ShortArray, sampleRate: Int, channels: Int) {
                    pcmWeighting.processInPlace(pcm, channels, mode, sampleRate)

                    lastOnPcmWallMs = SystemClock.uptimeMillis()
                    if (decoderRestarting) decoderRestarting = false

                    frameTick++
                    tMs += frameMs
                    // Tempo / strong beats (όπως πριν)
                    if (!strongBeatsEnabled && tMs >= enableBeatsAtMs && rhythm.hasTempo())
                    ) {
                        private final var strongBeatsEnabled: Boolean = false
                        val cur = rhythm
                        if (lastIntervalMs < com.example.vibrateserver.MainActivity
                            val tol = VibrateServer.app.main
                            tempoStableCount =
                                if (abs(x = cur - lastIntervalMs) <= tol) tempoStableCount + 1
                                else 0
                        }
                        lastIntervalMs = cur
                        strongBeatsEnabled = tempoStableCount >= 2
                    }
                    // Mute window μετά από restart
                    if (tMs < streamingMuteUntilMs) {
                        appendAmp(a = 0)
                        flushIfNeeded(frameMs, packetFrames, allowCancel = false)
                        return
                    }
                    val bands = bandSplitter.bandsRms(pcm, sr = sampleRate, channels)
                    val postMode =
                        if (mode == FilterMode.PASSBAND) FilterMode.PASSBAND else FilterMode.FLAT
                }
            }
        }
    )
}

```

Εικόνα 7.10 pcmWeighting, BandSplitter και post mode

```

2 Usages
class PcmWeighting48k(private val maxChannels: Int = 2) {

    2 Usages
    private val aSosByCh: Array<SosCascade> =
        Array( size = maxChannels) { SosCascade( stages = A48k.sos.map { BiquadDf2T( c = it) }.toTypedArray()) }

    2 Usages
    private val cIirByCh: Array<IirDf2T> =
        Array( size = maxChannels) {
            val (b, a) = C48k.design(fs = 48000.0)
            IirDf2T(b, a)
        }

        val y = when (mode) {
            FilterMode.A_WEIGHT -> aSosByCh[ci].process(x)
            FilterMode.C_WEIGHT -> cIirByCh[ci].process(x)
            else -> x
        }

        pcm[i] = y.roundToInt().coerceIn(-32768, 32767).toShort()
    }
}

```

Εικόνα 7.11 aSosByCh, cIirByCh μεταβλητές

```

1 Usage
private fun freqzMag(b: DoubleArray, a: DoubleArray, fHz: Double, fs: Double): Double {
    val w = 2.0 * PI * fHz / fs
    var nr = 0.0; var ni = 0.0
    var dr = 0.0; var di = 0.0

    for (k in b.indices) {
        val ang = -w * k
        nr += b[k] * cos(x = ang)
        ni += b[k] * sin(x = ang)
    }
    for (k in a.indices) {
        val ang = -w * k
        dr += a[k] * cos(x = ang)
        di += a[k] * sin(x = ang)
    }
    val num2 = nr * nr + ni * ni
    val den2 = (dr * dr + di * di).coerceAtLeast( minimumValue = 1e-24)
    return sqrt(x = num2 / den2)
}

```

Εικόνα 7.12 συνάρτηση freqzMag(...)

```

2 Usages
fun bandsRms(pcm: ShortArray, sr: Int, channels: Int): Bands {
    ensure(sr)
    var sumTot = 0.0; var sumL = 0.0; var sumM = 0.0; var sumH = 0.0; var n = 0
    var i = 0
    while (i < pcm.size) {
        val v = if (channels <= 1 || i + 1 >= pcm.size) pcm[i] / 32768.0
        else 0.5 * (pcm[i] / 32768.0 + pcm[i + 1] / 32768.0)
        val yL = lp!!.process(x = v); val yB = bp!!.process(x = v); val yH = hp!!.process(x = v)
        sumTot += v * v; sumL += yL * yL; sumM += yB * yB; sumH += yH * yH
        n++; i += if (channels <= 1) 1 else 2
    }
    if (n == 0) return Bands(low = 0.0, mid = 0.0, high = 0.0, total = 0.0)
    fun rms(x: Double) = sqrt(x = x / n)
    return Bands(low = rms(x = sumL), mid = rms(x = sumM), high = rms(x = sumH), total = rms(x = sumTot))
}

```

Εικόνα 7.12 BandSplitter.bandsRms.

```

2 Usages
object HapticFilters {
    2 Usages
    fun apply(
        mode: FilterMode,
        low: Double,
        mid: Double,
        high: Double,
        window: TactileWindow
    ): Triple<Double, Double, Double> {
        return when (mode) {
            FilterMode.FLAT -> Triple(first = low, second = mid, third = high)
            FilterMode.PASSBAND -> applyPassband(low, mid, high, window)
            FilterMode.A_WEIGHT -> applyAWeight(low, mid, high)
            FilterMode.C_WEIGHT -> applyCWeight(low, mid, high)
            FilterMode.Z_WEIGHT -> Triple(first = low, second = mid, third = high)
        }
    }
}

```

Εικόνα 7.13 HapticFilters.apply(...).

## 7.2.9 Decoder σε PCM frames

Όταν ξεκινήσει ή αλλάξει θέση η αναπαραγωγή, η MainActivity καλεί `startDecoderAt(startUs, frameMs, packetFrames, silenceShareThreshold, pulseDurations)`, περνώντας το `lastUri` του τρέχοντος τραγουδιού και τις παραμέτρους χρονισμού του pipeline. Εσωτερικά δημιουργείται νέο `DirectDecoder.decode(...)` που είναι υπεύθυνο να διαβάσει από το media αρχείο (μέσω `PcmInputStream/AudioConverter` όπου απαιτείται) και με αυτό τον τρόπο παράγει PCM frames σταθερού μεγέθους (π.χ. 960 samples), τα οποία επιστρέφονται σε callback `onPcmFrame(pcm, sampleRate, channels)`. Σε κάθε κλήση `onPcmFrame`, ενημερώνεται ο λογικός «χρόνος pipeline» `tMs` προσθέτοντας `frameMs`, ώστε να υπάρχει ρητή αντιστοίχιση μεταξύ σειράς PCM frames και χρόνου αναπαραγωγής. Ο decoder ελέγχει αν το `session id` του τρέχοντος thread ταιριάζει με το `activeDecoderSession`, ώστε παλιότερες αποκωδικοποιήσεις (π.χ. από προηγούμενο τραγούδι ή seek) να σταματούν σιωπηλά για να διατηρείται καθαρό το νέο pipeline.

```
class MainActivity : AppCompatActivity() {
    private fun startDecoderAt(
        Thread {
            try {
                DirectDecoder.decode(
                    context = this,
                    uri,
                    frameSamples = 960,
                    startUs = startUs,
                    callback = object : DirectDecoder.Callback {
                        @RequiresApi(value = Build.VERSION_CODES.O)
                        override fun onPcmFrame(pcm: ShortArray, sampleRate: Int, channels: Int) {
                            if (sessionId != activeDecoderSession) return
                            if (!hapticThreadRunning || !active) return

                            lastOnPcmWallMs = SystemClock.uptimeMillis()
                            if (decoderRestarting) decoderRestarting = false

                            frameTick++
                            tMs += frameMs
                        }
                    }
                )
            }
        }
    )
}
```

Εικόνα 7.14 Ο ορισμός `startDecoderAt(...)` με τη δημιουργία thread και την κλήση `DirectDecoder.decode(...)`.

## 7.2.10 Συγχρονισμός χρόνου, seek και restart

Ο συγχρονισμός του pipeline με τον οπτικό χρόνο του player γίνεται συνδυάζοντας το `tMs` του decoder με το `currentPosition` του `MediaPlayer`. Κατά την διάρκεια παύσης ή μετακίνησης (`togglePlayPause`, `seekTo`), η MainActivity ενημερώνει το `tMs` στην αντίστοιχη θέση (π.χ. `tMs = posMs.toLong()`) και στη συνέχεια καλεί ξανά `startDecoderAt` από το νέο `startUs`, έτσι ώστε οι επόμενοι PCM frames να αντιστοιχούν στον νέο χρόνο. Όταν ο decoder καλεί `onPcmFrame`, ενημερώνει επίσης `lastOnPcmWallMs` με το τρέχον `SystemClock.uptimeMillis()`, ώστε ο watchdog να γνωρίζει ότι η ροή PCM συνεχίζει ομαλά. Αν συμβεί προσωρινό stall στην αποκωδικοποίηση (π.χ. δύσκολο σημείο στο αρχείο ή σφάλμα), ο watchdog θα δει ότι δεν ενημερώθηκε `lastOnPcmWallMs` για >2s και θα ζητήσει restart από την τρέχουσα θέση `currentPosition` του `MediaPlayer`, διατηρώντας έτσι τον συγχρονισμό με τον ήχο που ο χρήστης ακούει.

```

tMs = pos.toLong()

startDecoderAt(
    startUs = pos.toLong() * 1000L,
    frameMs = frameMsCfg,
    packetFrames = packetFramesCfg,
    silenceShareThreshold = silenceShareThCfg,
    pulseDurations = ::pulseDurations
)

```

Εικόνα 7.15 Απόσπασμα togglePlayPause/seekTo/onPcmFrame.

### 7.2.11 Band splitting, envelopes και ρυθμός

Κάθε PCM frame, είτε προέρχεται από DirectDecoder είτε από MicHapticsStreamer, περνά από bandSplitter.bandsRms(pcm, sampleRate, channels) που εφαρμόζει τρία biquad φίλτρα (χαμηλό, μεσαίο, υψηλό) και επιστρέφει RMS ενέργεια σε κάθε ζώνη. Στη συνέχεια καλείται HapticFilters.apply(filterMode, bands.low, bands.mid, bands.high, tactileWindow), η οποία ανάλογα με το FilterMode(FLAT, A\_WEIGHT, C\_WEIGHT, Z\_WEIGHT, PASSBAND) εφαρμόζει κατάλληλη σταθμισμένη κλίμακα στις ζώνες (π.χ. A/C-weighting ή passband weighting) με χρήση ισοηχητικών καμπυλών από EqualLoudness.

Οι φιλτραρισμένες τιμές χαμηλής/μεσαίας/υψηλής ζώνης εξομαλύνονται μέσω συνάρτησης τύπου smooth(prev, x, a) ώστε να σχηματίζουν envelopes (lowEnv, midEnv, highEnv) με εκθετική εξομάλυνση και συντελεστή  $a \approx 0.25$ . Από αυτές υπολογίζονται shares (αναλογίες) ανά ζώνη: χαμηλή/μεσαία μεταξύ τους (sumLM), και υψηλή ως ποσοστό επί της συνολικής ενέργειας (sumAll), τα οποία χρησιμοποιούνται τόσο για ανίχνευση σιωπής (silenceShareThreshold) όσο και για επιλογή “ηγέτη” band (leader LOW ή MID) για το pattern της δόνησης.

Ο ρυθμός αναλύεται με rhythm.onFrame(lowEnv) σε κάθε frame, το οποίο ενημερώνει εσωτερικούς μετρητές και εκτιμά το διάστημα μεταξύ beats (currentIntervalMs). Όταν σταθεροποιηθούν οι διαδοχικές εκτιμήσεις διαστήματος (μετρώντας tempoStableCount και διαφορά από lastIntervalMs κάτω από κάποιο ποσοστό ανοχής), ενεργοποιείται η λογική ισχυρών beats (strongBeatsEnabled) και γίνεται δυναμική προσαρμογή της διάρκειας παλμών μέσω pulseDurations(beatMs).

Παράλληλα, η SectionDetector λαμβάνει για κάθε frame το άθροισμα χαμηλής συν μεσαίας ενέργειας και το raw high share, ώστε να εντοπίζει αλλαγές «ενεργειακών ενοτήτων» (sections) στο τραγούδι, επηρεάζοντας π.χ. την επιμήκυνση παλμών σε ανεβάσματα (sectionRise). Από αυτές τις πληροφορίες (beats, sections, band shares) αποφασίζεται ανά frame εάν θα παραχθεί beat pulse, συνεχές tick ή καθόλου δόνηση, και αν θα προτιμηθεί χαμηλή ή μεσαία ζώνη ως “ηγέτης” που καθορίζει το πλάτος/διάρκεια.

```

class MichapticsStreamer(
    private fun onMicFrame(pcm: ShortArray, sampleRate: Int, channels: Int) {

        val bands = bandSplitter.bandsRms(pcm, sr = sampleRate, channels)
        val (fLow0, fMid0, fHigh0) =
            HapticFilters.apply(
                mode = filterModeProvider(),
                bands.Low,
                bands.mid,
                bands.high,
                tactileWindow
            )

        fun smooth(prev: Double, x: Double, a: Double) = (1 - a) * prev + a * x
        lowEnv = smooth( prev = lowEnv, x = fLow0, a = 0.25)
        midEnv = smooth( prev = midEnv, x = fMid0, a = 0.25)
        highEnv = smooth( prev = highEnv, x = fHigh0, a = 0.25)

        val sumLM = lowEnv + midEnv + 1e-9
        val lowShare = (lowEnv / sumLM).coerceIn(0.0, 1.0)
        val midShare = (midEnv / sumLM).coerceIn(0.0, 1.0)
        val sumAll = lowEnv + midEnv + highEnv + 1e-9
        val highShareRaw = (highEnv / sumAll).coerceIn(0.0, 1.0)

        if (sumLM < silenceShareThreshold ||
            (highShareRaw > 0.70 && lowShare < 0.15 && midShare < 0.15)
        ) {
            appendAmp( a = 0)
            flushIfNeeded()
            return
        }
    }
}

```

Εικόνα 7.16 Απόσπασμα onPcmFrame ή onMicFrame με κλήσεις BandSplitter.bandsRms, HapticFilters.apply και υπολογισμό lowEnv/midEnv/highEnv και shares.

```

class MicHapticsStreamer(
    private fun onMicFrame(pcm: ShortArray, sampleRate: Int, channels: Int) {
        val isBeat = rhythm.onFrame(LowEnv)
        val sectionRise = sectionDetector.onFrame(energyIn = sumLM, highShareIn = highShareRaw)
        if (isBeat) {
            val strong = strongBeatsEnabled && (beatIndex % 4 == 0)

            if (!strong && gateAllows) {
                if (Build.VERSION.SDK_INT >= 26) {
                    val amp = if (leader == "LOW") 255 else 210
                    vibrator?.cancel()
                    vibrator?.vibrate(vibe = VibrationEffect.createOneShot(milliseconds = 55L, amplitude = amp))
                } else {
                    @Suppress(...names = "DEPRECATION")
                    vibrator?.vibrate(milliseconds = 55L)
                }
            }
            val basePeak = maxOf(a = 180, b = rmsAmp).coerceAtMost(maximumValue = 255)
            val peak = if (strong) (basePeak * 1.15).toInt().coerceAtMost(maximumValue = 255) else basePeak
            writeAcsrPulse(buf = ampts, attack = 1, hold = 2, decay = 1, peak)
            appendAmp(a = 0); appendAmp(a = 0); appendAmp(a = 0)
        }

        beatIndex = (beatIndex + 1) % 4

        val (lowDur, midDur, _) = pulseDurations(beatMs)
        val baseDur = if (leader == "LOW") lowDur else midDur
        val durMs = if (sectionRise) (baseDur * 1.12).toLong() else baseDur
        writeHapticPulseForBand(leader, durMs, frameMs)
    } else {
        val base = 10 + 0.20 * rmsAmp
        val shaped = if (melodyOpen) base else base * 0.4
        val tick = shaped.toInt().coerceIn(0, 160)
        appendAmp(a = tick)
    }
}

```

Εικόνα 7.17 Κώδικας rhythm.onFrame(...), pulseDurations(...) και SectionDetector.onFrame(...)

## 7.2.12 Watchdog και ανάκαμψη pipeline

Ο watchdog εκτελείται όσο προγραμματίζεται περιοδικά (κάθε ~1s) στο κύριο thread και ελέγχει αν το `now - lastOnPcmWallMs` υπερβαίνει ένα όριο (π.χ. 2000 ms) ενώ ο player παίζει και το `flag decoderRestarting` είναι `false`. Σε περίπτωση `stall`, ο `watchdog` θέτει `decoderRestarting = true`, διαβάζει την τρέχουσα θέση του `MediaPlayer` σε μικροδευτερόλεπτα (`posUs`), ενεργοποιεί προσωρινό παράθυρο `mute` με `streamingMuteUntilMs = tMs + RESTART_MUTE_MS` και καταστολή `beats` με `beatsSuppressedUntilMs = tMs + RESTART_SUPPRESS_BEATS_MS`, και καλεί ξανά `startDecoderAt(posUs,...)` με `restartFadeFrames = RESTART_FADE_FRAMES`. Κατά την επανεκκίνηση, τα πρώτα frames περνούν από διαδικασία `fade-in`: σε κάθε frame εφαρμόζεται `factor ramp` που υπολογίζεται συνημιτονικά από το υπόλοιπο `restartFadeFrames`, ώστε η συνολική ενέργεια (`fLow/fMid/fHigh`) να αυξάνει ομαλά από το 0.5–1.0 μέχρι το κανονικό επίπεδο. Παράλληλα, όσο `tMs < streamingMuteUntilMs`, η λογική παραγωγής `pulses` αντικαθίσταται από αποστολή μηδενικών `amplitudes` (`appendAmp(0) + flushIfNeeded(...)`), αποτρέποντας απότομες δονήσεις κατά την επανασυγχρονισμένη είσοδο του `decoder`. Ο `watchdog` τερματίζει μόνο όταν θα σταματήσει και η αναπαραγωγή ή όταν καλεστεί η `stopHapticsNow()/hardStopPlaybackOnly()`, όπου στο συγκεκριμένο σημείο εκτελείται το `watchdogHandler.removeCallbacksAndMessages(null)` και μηδενίζονται τα flags, όπως το `streamingMuteUntilMs`. Η ύπαρξη `watchdog` αποτελεί κρίσιμο στοιχείο αξιοπιστίας του pipeline, ιδιαίτερα για συσκευές/αρχεία όπου η αποκωδικοποίηση μπορεί περιστασιακά να παγώσει χωρίς να σταματήσει ο `MediaPlayer`.

```

class MainActivity : AppCompatActivity() {
    private fun startDecoderAt(
        Thread {
            callback = object : DirectDecoder.Callback {
                override fun onPcmFrame(pcm: ShortArray, sampleRate: Int, channels: Int) {
                    // Mute window μετά από restart
                    if (tMs < streamingMuteUntilMs) {
                        appendAmp( a = 0)
                        flushIfNeeded(frameMs, packetFrames, allowCancel = false)
                        return
                    }

                    val bands = bandSplitter.bandsRms(pcm, sr = sampleRate, channels)
                    val (fLow0, fMid0, fHigh0) =
                        HapticFilters.apply(
                            filterMode,
                            bands.low,
                            bands.mid,
                            bands.high,
                            tactileWindow
                        )

                    // Restart fade ramp
                    val ramp = if (restartFadeFrames > 0) {
                        val k = (RESTART_FADE_FRAMES - restartFadeFrames + 1)
                            .coerceAtMost( maximumValue = RESTART_FADE_FRAMES)
                        restartFadeFrames--
                        0.5 * (1.0 - kotlin.math.cos( x = Math.PI * k / RESTART_FADE_FRAMES))
                    } else 1.0
                }
            }
        }
    )
}

```

Εικόνα 7.18 Συνάρτηση startWatchdog().

```

2 Usages
private fun startWatchdog() {
    lastOnPcmWallMs = SystemClock.uptimeMillis()
    decoderRestarting = false
    watchdogHandler.removeCallbacksAndMessages( token = null)
    watchdogHandler.postDelayed( r = object : Runnable {
        override fun run() {
            val mp = mediaPlayer
            val now = SystemClock.uptimeMillis()
            if (active && mp?.isPlaying == true) {
                if ((now - lastOnPcmWallMs) > 2000 && !decoderRestarting) {
                    decoderRestarting = true
                    val posUs = mp.currentPosition.toLong() * 1000L
                    streamingMuteUntilMs = tMs + RESTART_MUTE_MS
                    beatsSuppressedUntilMs = tMs + RESTART_SUPPRESS_BEATS_MS
                    restartFadeFrames = RESTART_FADE_FRAMES
                    startDecoderAt(
                        startUs = posUs, frameMsCfg, packetFramesCfg,
                        silenceShareThreshold = silenceShareThCfg, ::pulseDurations
                    )
                }
            }
            watchdogHandler.postDelayed( r = this, delayMillis = 1000)
        }
    }, delayMillis = 1000)
}

```

Εικόνα 7.19 Απόσπασμα onPcmFrame.

### 7.2.13 Παράμετροι και ρυθμίσεις audio pipeline

Οι βασικές παράμετροι του pipeline συγκεντρώνονται σε λίγες μεταβλητές που ελέγχονται από τη MainActivity και, εν μέρει, από UI:

- Χρονισμός επεξεργασίας: `frameMsCfg = 10` καθορίζει το βήμα χρόνου ανά frame, ενώ `packetFramesCfg = 10` θέτει ότι για οποιαδήποτε κλήση που θα πραγματοποιηθεί σε `HapticEngine.playWaveform` περιλαμβάνεται πακέτο 10 frames (δηλαδή 100 ms waveform).
- Κατώφλι «σιωπής»: `silenceShareThCfg = 0.006` χρησιμοποιείται τόσο στον decoder όσο και στον mic streamer για να ανιχνεύονται στιγμές όπου το άθροισμα low+mid είναι μικρό και το high share μεγάλο, οπότε επιλέγεται να σταλεί σιωπή για να αποφευχθούν οξείες λεπτομέρειες χωρίς ουσιαστική μουσική ενέργεια.

Για τη χωρική/συχνοτική περιοχή που μετατρέπεται σε δόνηση, ο χρήστης ελέγχει `lowCutHz` και `highCutHz` μέσω των sliders που βρίσκονται στο UI της εφαρμογής, ενώ η `updateTactileWindow()` πρέπει να ενημερώνει `tactileWindow = TactileWindow(lowCutHz, highCutHz, refHz)` με `refHz` στο μέσο του εύρους, επιτρέποντας passband-style στάθμιση όταν επιλεγθεί το ανάλογο filter mode. Οι επιλογές A/C/Z-weighting δεν αλλάζουν το passband αλλά τη σχετική έμφαση χαμηλών/μεσαίων/υψηλών σύμφωνα με πρότυπα equal-loudness, έτσι ώστε η απτική αίσθηση να ακολουθεί καλύτερα την ανθρώπινη ευαισθησία στις διάφορες συχνότητες.

Τέλος, ο χειρισμός mono έναντι stereo γίνεται νωρίς στο pipeline: στο file path η `AudioConverter` επιλέγει `ch = 1` και `downmix` όλων των καναλιών σε ένα, ενώ στο mic path το `AudioRecord` ορίζεται εξαρχής σε `CHANNEL_IN_MONO`, απλοποιώντας σημαντικά τα επόμενα φίλτρα, τον υπολογισμό RMS και τη χαρτογράφηση σε δόνηση. Η επιλογή αυτή είναι συνειδητός συμβιβασμός υπέρ της σταθερότητας και του μικρότερου υπολογιστικού κόστους, δεδομένου ότι η απτική έξοδος της συσκευής είναι μονάχα ένας actuator (μονοκάναλη δόνηση) και δεν υποστηρίζει ξεχωριστά μοτίβα ανά audio κανάλι.

```
// Passband sliders (low / high cutoff)
fun updateTactileWindow() {
    val refHz = (lowCutHz + highCutHz) / 2.0
    tactileWindow = TactileWindow(fMin = lowCutHz, fMax = highCutHz, taperHz = refHz)
}

binding.txtLowCut.text = "Low cutoff: ${lowCutHz.toInt()} Hz"
binding.txtHighCut.text = "High cutoff: ${highCutHz.toInt()} Hz"

binding.sliderLowCut.addOnChangeListener { _, value, fromUser ->
    if (!fromUser) return@addOnChangeListener
    lowCutHz = value.toDouble().coerceAtMost(maximumValue = highCutHz - 10.0)
    binding.txtLowCut.text = "Low cutoff: ${lowCutHz.toInt()} Hz"
    updateTactileWindow()
}

binding.sliderHighCut.addOnChangeListener { _, value, fromUser ->
    if (!fromUser) return@addOnChangeListener
    highCutHz = value.toDouble().coerceAtLeast(minimumValue = lowCutHz + 10.0)
    binding.txtHighCut.text = "High cutoff: ${highCutHz.toInt()} Hz"
    updateTactileWindow()
}

updateTactileWindow()
```

Εικόνα 7.20 Τμήμα `updateTactileWindow()`.

```

// Stream config
6 Usages
private var frameMsCfg = 10L
6 Usages
private var packetFramesCfg = 10
6 Usages
private var silenceShareThCfg = 0.006

```

Εικόνα 7.21 Σταθερές frameMsCfg, packetFramesCfg, silenceShareThCfg κοντά στην MainActivity.

## 7.3 Haptic Pipeline

Το haptic pipeline (αλυσίδα παραγωγής απτικής εξόδου) αρχίζει με “haptic events” (γεγονότα δόνησης: π.χ. beat pulse, tick, σιωπή) που παράγονται ανά frame στον decoder ή στον mic streamer και καταλήγει σε κλήση `HapticEngine.playWaveform(frameMs, amplitudes, repeat)`. Η κεντρική ιδέα είναι η απτική έξοδος να αποστέλλεται ως waveform (κυματομορφή δόνησης: ακολουθία χρονισμών + ακολουθία εντάσεων), όπου κάθε στοιχείο αντιστοιχεί σε ένα frame διάρκειας `frameMs`. Η MainActivity λειτουργεί ως “συντονιστής” παραγωγής `amplitudes` σε playback mode, ενώ η `MicHapticsStreamer` πραγματοποιεί αντίστοιχη λογική σε live mode, με κοινές έννοιες όπως `frameMs`, `packetFrames` και `buffer amplitudes`.

### 7.3.1 Επίπεδο συσκευής: HapticEngine και waveform έξοδος

Η κλάση `HapticEngine` είναι το χαμηλότερο επίπεδο (hardware-facing: σημείο επαφής με hardware) και αποκρύπτει τις διαφορές API μεταξύ `Android < 31` και `Android ≥ 31`, κάνοντας επιλογή `Vibrator` αναλόγως, αν είναι `< 31` τότε μέσω `VibratorManager.defaultVibrator`, διαφορετικά μέσω `legacy VIBRATOR_SERVICE`. Η μέθοδος `hasAmplitudeControl()` ελέγχει αν το μοτέρ δόνησης υποστηρίζει `amplitude control` (έλεγχο έντασης), κάτι που είναι κρίσιμο για pipeline που παράγει συνεχείς τιμές 0–255 και όχι απλώς on/off. Η έξοδος επιτυγχάνεται λόγω της συνάρτησης `playWaveform(frameMs, amplitudes, repeat)`, επειδή δημιουργεί `timings = LongArray(amplitudes.size) { frameMs }` και στη συνέχεια `VibrationEffect.createWaveform(timings, amplitudes, repeat)`, άρα κάθε `amplitude` αντιστοιχεί σε ίσης διάρκειας `frame`.

Πριν από κάθε νέα εκπομπή waveform γίνεται `vibrator.cancel()`, ώστε να αποφεύγεται επικάλυψη (overlap: ταυτόχρονη εκτέλεση παλαιότερου και νέου pattern) και να εξασφαλίζεται ότι το τελευταίο πακέτο `amplitudes` έχει προτεραιότητα. Η συνάρτηση `stop()` απλώς ακυρώνει τον δονητή, στοιχείο που χρησιμοποιείται συστηματικά στην παύση/τερματισμό ώστε να υπάρχει το επιθυμητό αποτέλεσμα χωρίς δονήσεις σε σημεία που δεν θέλουμε.

```

HapticEngine.kt x
1 package com.example.vibrateserver.haptics
2
3 > import ...
9
4 Usages
10 class HapticEngine(context: Context) {
11     4 Usages
12     private val vibrator: Vibrator = if (Build.VERSION.SDK_INT >= 31) {
13         val vm = context.getSystemService( name = Context.VIBRATOR_MANAGER_SERVICE) as VibratorManager
14         vm.defaultVibrator
15     } else {
16         @Suppress( ...names = "DEPRECATION")
17         context.getSystemService( name = Context.VIBRATOR_SERVICE) as Vibrator
18     }
19     2 Usages
20     @RequiresApi( value = Build.VERSION_CODES.O)
21     fun hasAmplitudeControl(): Boolean = vibrator.hasAmplitudeControl()
22     6 Usages
23     @RequiresApi( value = Build.VERSION_CODES.O)
24     fun playWaveform(frameMs: Long, amplitudes: IntArray, repeat: Int = -1) {
25         val timings = LongArray(amplitudes.size) { frameMs }
26         val effect = VibrationEffect.createWaveform(timings, amplitudes, repeat)
27         vibrator.cancel()
28         vibrator.vibrate( vibe = effect)
29     }
30     3 Usages
31     fun stop() = vibrator.cancel()
32 }

```

Εικόνα 7.22 HapticEngine.playWaveform(...).

### 7.3.2 Βασική μονάδα χρόνου: frames και packetization

Ο σχεδιασμός βασίζεται σε χρονισμό σταθερού βήματος (fixed-step), όπου το frameMsCfg (συνήθως 10 ms) ορίζει τη συχνότητα που πραγματοποιείται απόφαση για νέο haptic event και πόσο συχνά παράγεται νέο amplitude. Οι τιμές amplitudes δεν αποστέλλονται μία-μία, αλλά ομαδοποιούνται σε πακέτα packetFramesCfg (π.χ. 10 frames), ώστε κάθε κλήση στη μέθοδο playWaveform να “καλύπτει” ένα μικρό χρονικό παράθυρο (π.χ. 100 ms). Αυτό μειώνει το υπολογιστικό/λειτουργικό κόστος κλήσεων API (overhead) και σταθεροποιεί την έξοδο, διότι το μοτέρ της δόνησης εκτελεί ένα συνεκτικό μικρό waveform αντί για συνεχείς μικρο-ενημερώσεις.

```

startDecoderAt(
    startUs = 0L,
    frameMs = frameMsCfg,
    packetFrames = packetFramesCfg,
    silenceShareThreshold = silenceShareThCfg,
    pulseDurations = ::pulseDurations
)

```

Εικόνα 7.23 Η χρήση των frameMsCfg, packetFramesCfg στο startDecoderAt(...).

### 7.3.3 Παραγωγή amplitudes σε playback mode (MainActivity)

Στη ροή αρχείου, η παραγωγή των amplitudes υλοποιείται μέσα στο callback onPcmFrame(...) του decoder, όπου για κάθε frame ενημερώνονται envelopes, ανιχνεύονται beats/sections και παράγονται είτε παλμοί είτε μηδενικά amplitudes. Η MainActivity διατηρεί buffer ampmts (λίστα amplitudes), στον οποίο προστίθεται μία τιμή ανά frame μέσω του appendAmp(...). Όταν ο buffer φτάσει το μέγεθος του ίσο με των packetFrames, τότε γίνεται flushIfNeeded(...) όπου εκεί μετατρέπει τη λίστα σε λίστα ακέραιων αριθμών (IntArray) και καλεί την haptic.playWaveform(frameMs, data, repeat=-1) για να εκτελεστεί αμέσως το νέο πακέτο.

Η παραγωγή σιωπής (silence: μηδενική ένταση) δεν θεωρείται “κενό”, αλλά ενεργό μέρος του pipeline, διότι στέλνοντας μηδενικά frames διατηρείται ο χρονισμός και αποφεύγονται απότομα υπολείμματα προηγούμενων

κυματομορφών (τα λεγόμενα residual patterns). Εν συνεχεία, σε ορισμένα σημεία (π.χ. windows με restart ή mute) ο κώδικας προσθέτει επαναλαμβανόμενα μηδενικά (appendAmp(0)πολλαπλές φορές) ώστε να καταστείλει προσωρινά οποιαδήποτε beats/σύνθετες αποφάσεις μέχρι να αποκατασταθεί η σταθερότητα. Ο μηχανισμός “cancel πριν το νέο waveform” (μέσα στο HapticEngine) σε συνδυασμό με packetization επιτρέπει γρήγορη διόρθωση της εξόδου όταν αλλάζει κατάσταση (pause/resume/seek/restart).

```
private fun appendAmp(a: Int) {
    synchronized( lock = ampts) { ampts.add(a.coerceIn(0, 255)) }
}

4 Usages
@RequiresApi( value = Build.VERSION_CODES.0)
private fun flushIfNeeded(
    frameMs: Long,
    packetFrames: Int,
    allowCancel: Boolean = true
) {
    if (!active) return
    var chunk: IntArray? = null
    synchronized( lock = ampts) {
        if (ampts.size >= packetFrames) {
            chunk = ampts.toIntArray()
            ampts.clear()
        }
    }
    val data = chunk ?: return
    if (allowCancel &&
        Build.VERSION.SDK_INT >= 31 &&
        tMs >= streamingMuteUntilMs
    ) {
        vibrator?.cancel()
    }
    if (!active) return
    haptic.playWaveform(frameMs, amplitudes = data, repeat = -1)
}
}
```

Εικόνα 7.24 appendAmp(...) και flushIfNeeded(...)στη MainActivity.

```

// Mute window μετά από restart
if (tMs < streamingMuteUntilMs) {
    appendAmp( a = 0)
    flushIfNeeded(frameMs, packetFrames, allowCancel = false)
    return
}

if (sumLM < silenceShareThreshold ||
    (highShareRaw > 0.70 && lowShare < 0.15 && midShare < 0.15))
{
    appendAmp( a = 0)
    flushIfNeeded(frameMs, packetFrames)
    return
}

```

Εικόνα 7.25 Σημείο του onPcmFrame(...)

### 7.3.4 Παραγωγή amplitudes σε live mode (MicHapticsStreamer)

Στη λειτουργία όπου καταγράφεται ο ήχος από το μικρόφωνο και μετατρέπεται σε δόνηση, η κλάση MicHapticsStreamer ακολουθεί αντίστοιχο μοτίβο: για κάθε frame μικροφώνου υπολογίζει RMS/ζώνες, εφαρμόζει πύλη ενεργοποίησης με κατώφλι θορύβου (gating), και αν το frame βρίσκεται κάτω από gateRms τότε στέλνει μηδενικά amplitudes. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια που το σήμα είναι πάνω από το κατώφλι, υπολογίζεται κανονικοποιημένη στάθμη (norm) και μια αρχική τιμή amplitude (rmsAmp) που στη συνέχεια συμμετέχει στην τελική λογική pulses/ticks. Οπότε, εδώ χρησιμοποιείται η buffer ampts και flushIfNeeded που τελικά καλείται η haptic.playWaveform(frameMs, data, repeat=-1), άρα το “τελευταίο μίλι” του pipeline είναι κοινό με το playback mode.

```

1 Usage
@RequiresApi( value = Build.VERSION_CODES.O)
private fun onMicFrame(pcm: ShortArray, sampleRate: Int, channels: Int) {
    tMs += frameMs

    var sumSq = 0.0
    for (s in pcm) {
        val v = s.toDouble()
        sumSq += v * v
    }
    val rms = sqrt(x = sumSq / pcm.size.coerceAtLeast( minimumValue = 1))
    val boosted = rms * micPreGain

    if (boosted < gateRms) {
        appendAmp( a = 0)
        flushIfNeeded()
        return
    }

    val norm = sqrt((boosted / refRms)).coerceIn(0.0, 1.8)
    val rmsAmp = (norm * 255.0).toInt().coerceIn(0, 255)

```

Εικόνα 7.26 Σημείο του onPcmFrame(...)

```

3 Usages
@RequiresApi( value = Build.VERSION_CODES.O)
private fun flushIfNeeded() {
    var chunk: IntArray? = null
    synchronized( lock = ampts) {
        if (ampts.size >= packetFrames) {
            chunk = ampts.toIntArray()
            ampts.clear()
        }
    }
    val data = chunk ?: return
    haptic.playWaveform(frameMs, amplitudes = data, repeat = -1)
}

```

Εικόνα 7.27 Κλήση haptic.playWaveform(...).

### 7.3.4 Envelope shaping: ADSR και σταθερά επίπεδα

Για την παραγωγή “παλμών” που γίνονται αντιληπτοί ως ρυθμικά γεγονότα και όχι ως απότομο κλικ, χρησιμοποιείται envelope shaping (διαμόρφωση περιβάλλουσας έντασης) τύπου ADSR (Attack, Decay, Sustain, Release). Η κλάση Envelope Haptics δεν δημιουργεί απαραίτητα ξεχωριστό waveform array, αλλά παρέχει τη writeAdsrInto(...), η οποία γράφει απευθείας στον buffer amplitudes (MutableList<Int>) μια ακολουθία τιμών 0–255 συνολικού μήκους attackFrames + holdFrames + decayFrames, με γραμμική αύξηση στο attack, σταθερό peak στο hold και γραμμική

μείωση στο decay. Επειδή το decay ολοκληρώνεται σε μικρή θετική τιμή (και όχι ακριβώς στο 0), το τελικό “release” υλοποιείται πρακτικά μέσω padding μηδενικών frames που ακολουθούν τον παλμό στον ίδιο buffer, διατηρώντας έτσι ομαλό σβήσιμο και σταθερή πακετοποίηση. Στο playback όσο και στο microphone pipeline, η λογική παραμένει κοινή: οι ανιχνευτές/κανόνες αποφασίζουν πότε θα παραχθεί παλμός και με τι peak/διάρκεια, και το envelope shaping μετατρέπει αυτή την απόφαση σε συγκεκριμένη ακολουθία amplitudes που εγγράφεται στον buffer πριν σταλεί στον δονητή ως waveform.

```

2 Usages
fun writeAdsrInto(
    buf: MutableList<Int>,
    attackFrames: Int,
    holdFrames: Int,
    decayFrames: Int,
    peak: Int = 255
) {
    val peakC = peak.coerceIn(0, 255)
    val a = attackFrames.coerceAtLeast( minimumValue = 0)
    val h = holdFrames.coerceAtLeast( minimumValue = 0)
    val d = decayFrames.coerceAtLeast( minimumValue = 0)

    if (a > 0) {
        repeat( times = a) { i ->
            buf.add((peakC * (i + 1) / a.toDouble()).toInt().coerceIn(0, 255))
        }
    }
    repeat( times = h) { buf.add(peakC) }
    if (d > 0) {
        for (i in d ≥ downTo ≥ 1) {
            buf.add((peakC * i / d.toDouble()).toInt().coerceIn(0, 255))
        }
    }
}
}

```

Εικόνα 7.28 writeAdsrInto(...).

### 7.3.5 Strong beats: Primitives και fallback

Σε νεότερες εκδόσεις Android (API 31+), πληθώρα συσκευών υποστηρίζουν προκαθορισμένα απτικά “primitives” του Android (π.χ. THUD, CLICK), δηλαδή έτοιμα μοτίβα δόνησης που παρέχει το API και μπορούν να συντεθούν σε σύνθετα εφέ μέσω VibrationEffect.Composition. Η HapticsPrimitives.areStrongPrimitivesSupported(vibrator) ελέγχει αν υποστηρίζονται τα primitives PRIMITIVE\_THUD και PRIMITIVE\_CLICK, διαφορετικά επιστρέφει false. Η buildStrongDownbeat(...) συνθέτει THUD και CLICK με καθυστέρηση clickDelayMs και κλίμακα clickScale, ενώ στην περίπτωση που δεν υπάρχει υποστήριξη, επιστρέφει fallback VibrationEffect.createOneShot(durMs, DEFAULT\_AMPLITUDE).

Αυτό το τμήμα του pipeline είναι χρήσιμο όταν το σύστημα θέλει να αποδώσει ισχυρό beat (π.χ. πρώτο χτύπημα σε μέτρο) με τρόπο που να ξεχωρίζει απτικά από ένα απλό ADSR pulse. Επίσης εισάγει έννοια “πολυ-στοιχειώδους” παλμού (σύνθεση 2 primitives), που αποτελεί διαφορετική κατηγορία εξόδου από το waveform amplitudes, άρα μπορεί

να χρησιμοποιηθεί επιλεκτικά σε ειδικές στιγμές. Στον υπάρχοντα κώδικα παραγωγής beats, παρατηρείται ήδη έντονη διάκριση strong vs non-strong beats (π.χ. strongBeatsEnabled και έλεγχος modulo του beatIndex), οπότε τα primitives αποτελούν φυσική επέκταση της ίδιας λογικής.

```
object HapticsPrimitives {
    )

    1 Usage
    fun areStrongPrimitivesSupported(vibrator: Vibrator?): Boolean {
        if (vibrator == null) return false
        if (Build.VERSION.SDK_INT < 31) return false
        return try {
            vibrator.areAllPrimitivesSupported(
                ...primitivelds = VibrationEffect.Composition.PRIMITIVE_THUD,
                VibrationEffect.Composition.PRIMITIVE_CLICK
            )
        } catch (_: Throwable) {
            false
        }
    }

    1 Usage
    @RequiresApi(value = Build.VERSION_CODES.O)
    fun buildStrongDownbeat(vibrator: Vibrator?, params: StrongBeatParams = StrongBeatParams()): VibrationEffect {
        return if (areStrongPrimitivesSupported(vibrator) && Build.VERSION.SDK_INT >= 31) {
            VibrationEffect.startComposition()
                .addPrimitive(primitiveld = VibrationEffect.Composition.PRIMITIVE_THUD, scale = 1.0f, delay = 0)
                .addPrimitive(primitiveld = VibrationEffect.Composition.PRIMITIVE_CLICK, params.clickScale, delay = params.clickDelayMs)
                .compose()
        } else {
            if (Build.VERSION.SDK_INT >= 26) {
                VibrationEffect.createOneShot(millisecond = params.durMs, VibrationEffect.DEFAULT_AMPLITUDE)
            } else {
                @Suppress(...names = "DEPRECATION")
                VibrationEffect.createOneShot(millisecond = params.durMs, VibrationEffect.DEFAULT_AMPLITUDE)
            }
        }
    }
}
```

Εικόνα. 7.29 HapticsPrimitives.areStrongPrimitivesSupported(...) και buildStrongDownbeat(...).

### 7.3.6 Δρομολόγηση εξόδου: κινητό vs εξωτερικός actuator

Η διεπαφή External Actuator δημιουργήθηκε για να ορίζει μία γενική έξοδο send(frameMs, amps) έτσι ώστε να στέλνει amplitudes σε εξωτερικό hardware (π.χ. custom vibration motor), χωρίς να δεσμεύει την εφαρμογή σε συγκεκριμένο πρωτόκολλο. Ο HapticOutputRouter αναλαμβάνει τη δρομολόγηση: αν υπάρχει external != null, στέλνει στο external, αλλιώς καλεί phonePlay(frameMs, amps) (δηλαδή τον μηχανισμό του κινητού). Υπάρχουν τρεις μέθοδοι (routeLow/ routeMid/ routeHigh) με ίδια συμπεριφορά, που επιτρέπουν (εννοιολογικά) διαφορετικές γραμμές εξόδου ανά band, ακόμη κι αν στην παρούσα υλοποίηση ο external actuator είναι ένας. Η παρούσα αρθρωτή σχεδίαση επιτρέπει στο απτικό pipeline να διατηρεί αμετάβλητη τη λογική παραγωγής πινάκων amplitudes, ενώ παράλληλα υποστηρίζει εναλλαγή του φυσικού μέσου εξόδου, διευκολύνοντας πειραματικές διατάξεις με πολλαπλούς ενεργοποιητές ή/και διαφορετικές θέσεις διέγερσης.

```

package com.example.vibrateserver.haptics

1 Usage
interface ExternalActuator { fun send(frameMs: Long, amps: IntArray) }

class HapticOutputRouter(private val external: ExternalActuator? = null) {
    fun routeLow(frameMs: Long, amps: IntArray, phonePlay: (Long, IntArray) -> Unit) {
        if (external != null) external.send(frameMs, amps) else phonePlay(frameMs, amps)
    }
    fun routeMid(frameMs: Long, amps: IntArray, phonePlay: (Long, IntArray) -> Unit) {
        if (external != null) external.send(frameMs, amps) else phonePlay(frameMs, amps)
    }
    fun routeHigh(frameMs: Long, amps: IntArray, phonePlay: (Long, IntArray) -> Unit) {
        if (external != null) external.send(frameMs, amps) else phonePlay(frameMs, amps)
    }
}

```

Εικόνα 7.30 ExternalActuator και HapticOutputRouter.

### 7.3.7 Προ-πύλες και καταστολές

Πριν από την παραγωγή οποιουδήποτε απτικού μοτίβου, το playback pipeline φιλτράρει παλιά sessions (session id check) με την απαίτηση να έχουν την τιμή true τα flags hapticThreadRunning και active, για να μην γράφονται amplitudes όταν η εφαρμογή έχει παύσει/τερματίσει την έξοδο. Στο playback mode, η ύπαρξη του streamingMuteUntilMs επιτρέπει μια ελεγχόμενη περίοδο “αδρανοποίησης” της απτικής εξόδου μετά από restart, κατά την οποία αποστέλλονται αποκλειστικά μηδενικά δείγματα. Φαίνεται πως και στα δύο modes (playback και live), εφαρμόζεται επιπλέον έλεγχος “σιωπής/ανώφελου περιεχομένου” με βάση το silenceShareThreshold και τις αναλογίες ενέργειας των ζωνών (low/mid/high). Όταν η συνιστώσα low+mid (sumLM) είναι πολύ μικρή και η υψηλή ζώνη υπερیشύει, η ροή επιλέγει σιωπή (μηδενικά amplitudes και flush), αποφεύγοντας την παραγωγή δυσάρεστων υψηλόσυχνων απτικών ερεθισμάτων.

```

override fun onPcmFrame(pcm: ShortArray, sampleRate: Int, channels: Int) {
    if (sessionId != activeDecoderSession) return
    if (!hapticThreadRunning || !active) return

    lastOnPcmWallMs = SystemClock.uptimeMillis()
    if (decoderRestarting) decoderRestarting = false

    frameTick++
    tMs += frameMs

    // Tempo / strong beats (όπως πριν)
    if (!strongBeatsEnabled && tMs >= enableBeatsAtMs && rhythm.hasTempo()
    ) {
        val cur = rhythm.currentIntervalMs()
        if (lastIntervalMs > 0) {
            val tol = 0.08 * lastIntervalMs
            tempoStableCount =
                if (abs(x = cur - lastIntervalMs) <= tol) tempoStableCount + 1
                else 0
        }
        lastIntervalMs = cur
        strongBeatsEnabled = tempoStableCount >= 2
    }

    // Mute window μετά από restart
    if (tMs < streamingMuteUntilMs) {
        appendAmp(a = 0)
        flushIfNeeded(frameMs, packetFrames, allowCancel = false)
        return
    }
}

```

Εικόνα 7.31 Pre-gates.

```

if (sumLM < silenceShareThreshold ||
    (highShareRaw > 0.70 && lowShare < 0.15 && midShare < 0.15)
) {
    appendAmp(a = 0)
    flushIfNeeded(frameMs, packetFrames)
    return
}

```

Εικόνα 7.32 To branch silenceShareThreshold.

### 7.3.8 Απόφαση γεγονότος (beat/section/melody gate)

Σε κάθε πλαίσιο χρόνου (frame), ο αλγόριθμος αποφασίζει αν πρόκειται για beat ή non-beat μέσω της κλήσης `rhythm.onFrame(lowEnv)` και της μεταβλητής `isBeat`. Η αντίστοιχη εκτίμηση του διαστήματος ρυθμού αποτυπώνεται στο `beatMs` μέσω `rhythm.currentIntervalMs`, στοιχείο κρίσιμο για τη χρονική κλιμάκωση παλμών. Ανεξάρτητα από το tempo, η ανίχνευση “section rise” παράγεται με την κλήση `sectionDetector.onFrame(sumLM, highShareRaw)` και εφαρμόζεται ως δυαδικός πολλαπλασιαστής διάρκειας, ώστε οι παλμοί να αποκτούν εντονότερη χρονική παρουσία σε ανοδικά σημεία. Η αποφυγή “νευρικής” παραγωγής ticks επιτυγχάνεται με `stateful gating`: η κατάσταση `melodyOpen` δεν αλλάζει άμεσα αλλά μέσω κατωφλίων `openTh/closeTh` και ελέγχου χρόνου `melodyHoldMs`, ενώ ταυτοχρόνως το `gateAllows` επιβάλλει ελάχιστες διάρκειες νότας και σιωπής (`minNoteMs/minSilenceMs`).

```
val isBeat = rhythm.onFrame(lowEnv)
val beatMs = rhythm.currentIntervalMs()
val sectionRise = sectionDetector.onFrame(energyIn = sumLM, highShareIn = highShareRaw)

val melodicShare = midShare
val nowOpen =
  if (!melodyOpen) (melodicShare >= openTh)
  else (melodicShare >= closeTh)

if (nowOpen != melodyOpen) {
  melodyHoldMs = 0L
  melodyOpen = nowOpen
} else {
  melodyHoldMs += frameMs
}

val gateAllows =
  if (melodyOpen) (melodyHoldMs >= minNoteMs)
  else (melodyHoldMs >= minSilenceMs)
```

Εικόνα 7.33 Block `isBeat`, `beatMs`, `sectionRise` και ορισμός `melodyOpen/gateAllows`.

### 7.3.9 Επιλογή “ηγέτη” και τύπου pattern

Η επιλογή του “ηγέτη” (leader) βασίζεται στη συγκριτική κυριαρχία της χαμηλής έναντι της μεσαίας ζώνης, όπως αυτή αποτυπώνεται στα `lowShare` και `midShare`. Έτσι, η απόφαση LOW/MID επηρεάζει τις παραμέτρους χρονισμού του παλμού, αξιοποιώντας διακριτές διάρκειες για `low` και `mid` (π.χ. `lowDur` έναντι `midDur`). Η επιλογή αυτή καθορίζει τόσο τη διάρκεια όσο και τη δυναμική εξέλιξη της έντασης στο χρόνο, δεδομένου ότι για LOW εφαρμόζεται συνήθως πιο “παχύ” ADSR. Η ένταση του tick ρυθμίζεται από την πύλη μελωδίας: όταν `melodyOpen` είναι ενεργό, το tick διατηρείται ισχυρότερο, ενώ όταν είναι ανενεργό μειώνεται (ενδεικτικά με κλιμάκωση τύπου `base * 0.4`).

```

if (!strong && gateAllows) {
    val (lowDur, midDur, _) = pulseDurations(beatMs)
    val baseDur =
        if (leader == "LOW") lowDur else midDur
    val durMs =
        if (sectionRise) (baseDur * 1.12).toLong()
        else baseDur
    writeHapticPulseForBand(leader, durMs, frameMs)
} else {
    repeat( times = 3) { appendAmp( a = 0) }
}
} else {
    appendAmp( a = 0)
}

```

Εικόνα 7.34 Leader selection και branch “non-beat tick”.

### 7.3.10 Σύνοψη παλμών και bufferization

#### Beat branch: strong vs normal

Εντός του beat branch, τα strong beats αναγνωρίζονται μέσω της ενεργοποίησης strongBeatsEnabled και της περιοδικής συνθήκης  $beatIndex \% 4 == 0$ , με στόχο την έμφαση στο downbeat. Για strong beat, το pipeline ενεργοποιεί one-shot δόνηση με `VibrationEffect.createOneShot(55L, amp)` και η ένταση amp επιλέγεται ανάλογα με τον leader. Παράλληλα, ο buffer συμπληρώνεται με σύντομο ADSR παλμό μέσω `writeAdsrPulse(..., 1, 2, 1, peak)` και ακολουθούν μηδενικά frames που δημιουργούν διακριτό χρονικό κενό. Στη ζωντανή λήψη μικροφώνου, η κορυφή του παλμού (peak) υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το rmsAmp, με διαφοροποίηση strong έναντι non-strong.

#### Normal beat branch: band pulse

Στον κλάδο του αδύνατου χτύπου, η διάρκεια δεν είναι σταθερή αλλά εξάγεται από `pulseDurations(beatMs)`, με ειδική μέριμνα για low και mid band. Η επιλογή της κατάλληλης `baseDur` εξαρτάται από τον leader, ενώ ενεργοποιείται προαιρετική επιμήκυνση όταν ανιχνεύεται `sectionRise`. Η παραγωγή του waveform παλμού πραγματοποιείται με `writeHapticPulseForBand`, όπου ο μετασχηματισμός διάρκειας σε αριθμό frames γίνεται ως  $totalFrames = durMs / frameMs$ , και ακολουθεί επιλογή ADSR που διαφέρει για LOW και MID (με εντονότερο hold/decay στο LOW). Σε συσκευές χωρίς έλεγχο έντασης, η διαμόρφωση “αναλογικού” envelope υποβιβάζεται σε duty-cycle, περίπου 85% ενεργός χρόνος στο LOW και 50% στο MID, ώστε να παραμείνει η διάκριση.

#### Non-beat branch: tick ή σιωπή + “hard stop”

Η μη-ρυθμική παραγωγή tick στο mic mode ξεκινά από μια baseline τιμή εξαρτώμενη από το RMS ( $base = 10 + 0.20 * rmsAmp$ ) και στη συνέχεια εφαρμόζεται εξάρτηση από το `melodyOpen` για να αντικατοπτρίζεται η “ανοιχτή” ή “κλειστή” μελωδική κατάσταση. Ακολούθως, η τελική τιμή κλιμακώνεται ως προς το `melodyOpen` και περιορίζεται με `clamp` στο ~160 για να μην ανταγωνίζεται τα beats. Όταν `gateAllows` παραμένει false πέρα από το `minSilenceMs`, το pipeline διακόπτει απότομα την έξοδο μηδενίζοντας τον buffer και στέλνοντας “σιωπηλό” packet με `playWaveform(...)`

```

if (isBeat) {
    val strong = strongBeatsEnabled && (beatIndex % 4 == 0)
    val restartMuted = tMs < streamingMuteUntilMs

    if (!strong && gateAllows && active && !restartMuted) {
        val dur = 55L
        if (Build.VERSION.SDK_INT >= 26) {
            val amp = if (leader == "LOW") 255 else 200
            vibrator?.cancel()
            vibrator?.vibrate(
                vibe = VibrationEffect.createOneShot( milliseconds = dur, amplitude = amp)
            )
        } else {
            @Suppress( ...names = "DEPRECATION")
            vibrator?.vibrate( milliseconds = dur)
        }
        val peak = if (hasAmpControl) 255 else 210
        writeAcsrPulse( buf = ampts, attack = 1, hold = 2, decay = 1, peak)
        appendAmp( a = 0); appendAmp( a = 0); appendAmp( a = 0)
    }
}

```

Εικόνα 7.35 Strong beat branch.

```

    if (!strong && gateAllows) {
        val (lowDur, midDur, _) = pulseDurations(beatMs)
        val baseDur =
            if (leader == "LOW") lowDur else midDur
        val durMs =
            if (sectionRise) (baseDur * 1.12).toLong()
            else baseDur
        writeHapticPulseForBand(leader, durMs, frameMs)
    } else {
        repeat( times = 3) { appendAmp( a = 0) }
    }
} else {
    appendAmp( a = 0)
}

```

Εικόνα 7.36 Normal beat branch.

```

1 Usage
private fun writeHapticPulseForBand(
    leader: String,
    durMs: Long,
    frameMs: Long
) {
    val totalFrames = (durMs / frameMs).toInt().coerceAtLeast( minimumValue = 3)
    val (a, h, d) =
        if (leader == "LOW")
            Triple( first = 1, second = min( a = 8, b = totalFrames - 2), third = 4)
        else
            Triple( first = 1, second = min( a = 3, b = totalFrames - 2), third = 1)
    if (hasAmpControl) {
        writeAdsrPulse( buf = ampts, attack = a, hold = h, decay = d, peak = 255)
    } else {
        val duty = if (leader == "LOW") 0.85 else 0.50
        repeat( times = totalFrames) { idx ->
            appendAmp(
                a = if (idx < duty * totalFrames) 255 else 0
            )
        }
    }
}
}

```

Εικόνα 7.37 writeHapticPulseForBand(...).

```

    if (!gateAllows && melodyHoldMs >= minSilenceMs) {
        synchronized( lock = ampts) { ampts.clear() }
        if (active) {
            haptic.playWaveform(
                frameMs,
                amplitudes = IntArray( size = packetFrames) { 0 },
                repeat = -1
            )
        }
        return
    }
}

```

Εικόνα 7.38 Διαδικασία “Hard stop”

```

@RequiresApi(value = Build.VERSION_CODES.O)
private fun flushIfNeeded(
    frameMs: Long,
    packetFrames: Int,
    allowCancel: Boolean = true
) {
    if (!active) return
    var chunk: IntArray? = null
    synchronized(lock = ampts) {
        if (ampts.size >= packetFrames) {
            chunk = ampts.toIntArray()
            ampts.clear()
        }
    }
    val data = chunk ?: return
    if (allowCancel &&
        Build.VERSION.SDK_INT >= 31 &&
        tMs >= streamingMuteUntilMs
    ) {
        vibrator?.cancel()
    }
    if (!active) return
    haptic.playWaveform(frameMs, amplitudes = data, repeat = -1)
}

```

Εικόνα 7.39 flushIfNeeded(...).

## 7.4 Ζητήματα απόδοσης και latency

Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης και των επαναληπτικών δοκιμών της εφαρμογής, εντοπίστηκε ότι η απτική έξοδος δεν παρέμενε πάντοτε χρονικά ευθυγραμμισμένη με τη μουσική, με αποτέλεσμα αντιληπτή καθυστέρηση (end-to-end latency) και, σε ορισμένες περιπτώσεις, αστάθεια στον συγχρονισμό (jitter). Το φαινόμενο αυτό αποδόθηκε κυρίως στη δομική ασυμφωνία μεταξύ frame-based επεξεργασίας (ρυθμός απόφασης ανά frameMsCfg) και packet-based εκπομπής προς το haptics subsystem (αποστολή μόνο όταν συμπληρωθούν packetFramesCfg amplitudes), η οποία εισάγει εγγενή packetization delay. Η ανάγκη αποφυγής artifacts και επικάλυψης waveforms οδήγησε επίσης στη χρήση μηχανισμών cancellation, hard-stop και restart/mute windows, οι οποίοι—αν και βελτιώνουν τη σταθερότητα της εμπειρίας—επηρεάζουν το “λειτουργικό” latency σε μεταβατικές καταστάσεις. Η επίλυση του προβλήματος βασίστηκε σε στοχευμένες σχεδιαστικές παρεμβάσεις που σταθεροποίησαν τη χρονική συμπεριφορά του pipeline και μείωσαν τα φαινόμενα αποσυγχρονισμού, όπως περιγράφεται στις επόμενες υποενότητες.

### 7.4.1 Πηγές latency (ενδογενείς καθυστερήσεις)

Αρχικά, επειδή το pipeline λειτουργεί σε frame-based υπολογισμό αλλά “επικοινωνεί” προς το haptics subsystem με packet-based εκπομπή, το end-to-end latency διαμορφώνεται από δύο ανεξάρτητους παράγοντες: τον ρυθμό ανάλυσης και τη στρατηγική πακετοποίησης. Παράλληλα, η παρουσία μηχανισμών gating, cancel, hard-stop και restart mute

windows ενσωματώνει εσκεμμένη καθυστέρηση για τον έλεγχο μεταβατικών σφαλμάτων (artifacts) και τη μείωση της επικάλυψης μεταξύ διαδοχικών waveforms.

#### 7.4.2 Αιτίες latency

Η παράμετρος `frameMsCfg = 10L` επιβάλλει ρυθμό ανανέωσης αποφάσεων 10 ms, ο οποίος αποτελεί τη βασική χρονική ανάλυση του υπολογιστικού σταδίου. Ειδικότερα, η ρουτίνα `flushIfNeeded(...)` εκκινεί `playWaveform(...)` μόνο όταν επιτευχθεί συσσώρευση 10 frames στον `buffer ampts`, δηλαδή όταν ολοκληρωθεί το αντίστοιχο packet. Κατά συνέπεια, προκύπτει δομική καθυστέρηση πακετοποίησης (packetization delay), επειδή η χρονική στιγμή παραγωγής ενός γεγονότος δεν συμπίπτει κατ' ανάγκη με τη χρονική στιγμή αποστολής του.

- Η συνάρτηση `flushIfNeeded(frameMs, packetFrames, allowCancel)` μετατρέπει τη λίστα σε `IntArray` μόνο όταν `ampts.size ≥ packetFrames` και εκείνη την στιγμή καλείται η `haptic.playWaveform(frameMs, data, repeat=-1)`.
- Στο παράθυρο σιωπής έπειτα από `restart tms < streamingMuteUntilMs`, η ροή του προγράμματος συνεχίζει να γράφει μηδενικά amplitudes και εκτελεί `flushIfNeeded(..., allowCancel=false)`, εισάγοντας σκόπιμη καθυστέρηση/σιωπή για να περιοριστούν artifacts.
- Η λογική με το `watchdog` επανεκκινεί τον decoder όταν δεν υπάρχει νέο PCM για `~2000 ms now - lastOnPcmWallMs > 2000`, έπειτα το επόμενο βήμα πραγματοποιείται θέτοντας `RESTARTMUTEMS = 350L` και `RESTARTSUPPRESSBEATSMS = 900L` και μεγαλώνουν το “λειτουργικό” latency (χρόνος μέχρι πλήρη επαναφορά της απτικής συμπεριφοράς).

#### 7.4.3 Παράγοντες απόδοσης (CPU/allocations/locks)

Η εκτέλεση ανά PCM frame (band-splitting, φιλτράρισμα και εξαγωγή amplitudes) καθιστά το σύστημα υψηλής συχνότητας, με συνεχείς ενημερώσεις της απτικής αναπαράστασης. Επιπροσθέτως, η επιβάρυνση απόδοσης προκύπτει τόσο από το υπολογιστικό φορτίο όσο και από λειτουργικά κόστη, όπως η διαχείριση/συγχρονισμός του `ampts` και οι επαναλαμβανόμενες κλήσεις προς την απτική διεπαφή (π.χ. `playWaveform`).

- Η αποθήκευση amplitudes βασίζεται σε `shared MutableList<Int>(ampts)` και οι εγγραφές/εκκαθαρίσεις προστατεύονται με `synchronized(ampts)` (π.χ. σε `appendAmp`, `flushIfNeeded`, και `hard-stop`), κάτι που μπορεί να αυξήσει lock contention υπό έντονη δραστηριότητα.
- Σε κάθε flush, γίνεται `ampts.toIntArray()` και έπειτα `ampts.clear()`, δηλαδή δημιουργείται νέο array αντικείμενο για κάθε πακέτο, κάτι που μπορεί να επιβαρύνει allocations/GC όταν τα flushes είναι συχνά.
- Η `HapticEngine.playWaveform(...)` δημιουργεί `LongArray(amplitudes.size)` για timings και κατόπιν `VibrationEffect.createWaveform(timings, amplitudes, repeat)`, άρα κάθε packet συνεπάγεται επιπλέον allocations και αντικείμενα effect.
- Η ίδια μέθοδος εκτελεί `vibrator.cancel()` πριν από `vibrator.vibrate(effect)`, κάτι που βελτιώνει την αποφυγή overlap αλλά προσθέτει overhead σε επίπεδο system service.

#### 7.4.4 Μετριάσμοι και trade-offs (σχεδιαστικές επιλογές)

Η σχεδιαστική επιλογή ευνοεί τη σταθερότητα και τη διακριτότητα της απτικής εμπειρίας έναντι της ελαχιστοποίησης της καθυστέρησης, αξιοποιώντας μηχανισμούς ακύρωσης (cancellation) και σίγασης σε μεταβατικές ή ασταθείς περιόδους. Εξίσου κρίσιμος είναι ο ρόλος του gating και του hard-stop ως μηχανισμών τερματισμού που εξαλείφουν υπολείμματα amplitudes και περιορίζουν ενεργές εκπομπές waveforms. Το τελικό αποτέλεσμα αντιπροσωπεύει σαφώς το trade-off ανάμεσα σε ποιότητα, latency και κόστος κλήσεων προς το vibration API.

Το `allowCancel` στο `flushIfNeeded(...)` (ιδίως όταν `Build.VERSION.SDK_INT ≥ 31` μπορεί να εκτελέσει `vibrator.cancel` πριν την αποστολή νέου packet, ώστε να μειωθεί η επικάλυψη διαδοχικών waveforms.

- Σε hard-stop σενάρια (π.χ. `gate.Allows = false` και `melodyHoldMs > minSilenceMs`, επίσης εκτελείται η εντολή `ampts.clear()` και αποστέλλεται “σιωπηλό” packet `IntArray(packetFrames){0}` μέσω `playWaveform`, εξαναγκάζοντας μηδενισμό της απτικής εξόδου.

- Στον πυρήνα της απτικής εξόδου, η HapticEngine εκτελεί cancel πριν από κάθε waveform (vibrator.cancel→vibrator.vibrate(effect)), μια επιλογή που μειώνει overlap αλλά μπορεί να αυξήσει latency όταν η συχνότητα packets είναι υψηλή.

#### 7.4.5 Μεθοδολογία αξιολόγησης latency

Η αποτίμηση της χρονικής απόκρισης ενδείκνυται να πραγματοποιείται σε δύο κλίμακες, καθώς συνυπάρχουν frame-based επεξεργασία (10 ms) και packet-based εκπομπή (≈100 ms) με κλήσεις playWaveform μόνο στα όρια πακέτων. Επιπλέον, η παρουσία μηχανισμών watchdog/επανεκκίνησης και παραθύρων σίγασης (mute windows) επιβάλλει διακριτή αποτίμηση της “κανονικής” λειτουργίας έναντι της μεταβατικής συμπεριφοράς μετά από restart. Επιπλέον, η δυναμική watchdog/restart σε συνδυασμό με mute windows συνιστά διαφορετικό καθεστώς λειτουργίας, το οποίο απαιτεί ξεχωριστή στατιστική/πειραματική αντιμετώπιση από την steady-state λειτουργία. Υπό αυτή τη θεώρηση, ο άμεσα μετρήσιμος χρόνος απόφασης→εκπομπής καθορίζεται από τη χρονική στιγμή κατά την οποία το amprts φτάνει το όριο packetFrames, οπότε και εκτελείται flushIfNeeded(...).

- Για να αποτιμηθεί το restart-induced latency, πραγματοποιείται καταμέτρηση των διαστημάτων RESTARTMUTEMS και RESTARTSUPPRESSBEATSMS ως επιπλέον νεκρός χρόνος μέχρι την πλήρη αποκατάσταση της κανονικής απτικής λειτουργίας.
- Για να αποτιμηθεί το overhead των cancellations, μπορεί να συγκριθεί η συμπεριφορά με/χωρίς allowCancel(όπου ενεργοποιείται) και να συνδεθεί με την επιπλέον συχνότητα vibrator.cancel πριν από playWaveform.

#### 7.5 Κενά στη βιβλιογραφία και συνεισφορά της παρούσας εργασίας

Η ποιότητα και η πιστότητα της απτικής εξόδου περιορίζονται τόσο από τη φυσική δυναμική του εκτελεστή δόνησης (ERM/LRA) όσο και από τη μορφή με την οποία το Android Vibrator API επιτρέπει την κωδικοποίηση πλάτους και χρονικών μεταβολών. Έτσι, ακόμη και με “ιδανικά” envelopes σε επίπεδο σύνθεσης, το παραγόμενο ερέθισμα δύναται να παρουσιάσει κορεσμό, εξομάλυνση λόγω αδράνειας και αποκλίσεις που οφείλονται σε διαφορές hardware/firmware μεταξύ συσκευών.

##### 7.5.1 Ένταση: κβάντωση, κορεσμός, υποστήριξη amplitude control

Η αναπαράσταση amplitudes στα Android waveform effects είναι διακριτή και ακέραιη (0–255), άρα το πλάτος δεν περιγράφεται ως συνεχής μεταβλητή αλλά ως κβαντισμένο μέγεθος. Η συγκεκριμένη υλοποίηση ενσωματώνει αυτόν τον περιορισμό, επιβάλλοντας αποκοπή τιμών στο κατά το buffering (μέσω appendAmp και coerceIn). Η προϋπόθεση για μη-δυναμική, πραγματικά κλιμακούμενη ένταση είναι η υποστήριξη amplitude control από το vibrator (hasAmplitudeControl()), που στο pipeline εκφράζεται από τη μεταβλητή hasAmpControl.

##### 7.5.2 Μη υποστήριξη amplitude: duty-cycle ως υποκατάστατο envelope

Σε απουσία amplitude control (hasAmpControl=false), η προοδευτική διαμόρφωση έντασης που προϋποθέτει ένα ADSR envelope δεν μπορεί να υλοποιηθεί με υψηλή πιστότητα. Ως αντιστάθμισμα, το pipeline εφαρμόζει duty-cycle κωδικοποίηση (on/off) με περίπου 0.85 στο LOW και 0.50 στο MID, ώστε να επιτυγχάνεται έστω προσεγγιστικά διαφοροποίηση στην αντιληπτή “μαζικότητα” της δόνησης. Το σχήμα αυτό είναι συνεπές με το μοντέλο waveforms όταν η ένταση δεν κλιμακώνεται: η πληροφορία μεταφέρεται κυρίως από το timing των on/off παλμών.

##### 7.5.3 Δυναμική μοτέρ (ERM/LRA): χρόνοι ανόδου/παύσης και πιστότητα σε γρήγορα μοτίβα

Η δυναμική απόκριση των απτικών μοτέρ δεν είναι στιγμιαία, αλλά περιορίζεται από αδράνεια και πεπερασμένους χρόνους ανόδου/καθόδου, οι οποίοι μπορούν να υποβαθμίσουν την ακρίβεια σε ταχείες ακολουθίες διέγερσης. Για LRA αναφέρονται χρόνοι εκκίνησης 40–60 ms και χρόνοι παύσης δυναμικά της τάξης εκατοντάδων ms, με μερική αντιστάθμιση μέσω braking. Για ERM, τα rise/fall times τοποθετούνται περίπου στα 50–100 ms λόγω της μηχανικής αδράνειας του έκκεντρου φορτίου. Ως εκ τούτου, σύντομοι παλμοί (ιδίως σε υψηλή επαναληπτική συχνότητα) ενδέχεται να αποδοθούν με εξομάλυνση ή/και χρονική μετατόπιση σε σχέση με το προγραμματισμένο waveform.

##### 7.5.4 Ετερογένεια συσκευών και επίπεδα API: συμπεριφορά cancel και routing vibrator

Η υλοποίηση λαμβάνει υπόψη πλατφορμικές διαφοροποιήσεις: για API 31+ αξιοποιείται VibratorManager/defaultVibrator, ενώ για παλαιότερα API γίνεται απευθείας κλήση της υπηρεσίας δόνησης μέσω VIBRATOR\_SERVICE. Επιπλέον, στο HapticEngine.playWaveform(...) εκτελείται vibrator.cancel() πριν από

vibrator.vibrate(effect), άρα η πολιτική διαχείρισης επικάλυψης (overlap) βασίζεται σε συμπεριφορά ακύρωσης σε επίπεδο συσκευής/OS. Σε αντίστοιχο πνεύμα, η αποστολή πακέτων amplitudes από το κύριο pipeline δύναται να προηγείται από cancel όταν το επιτρέπει ο μηχανισμός allowCancel (ιδίως σε API 31+), ώστε να περιορίζεται η ταυτόχρονη συνύπαρξη waveforms.

#### **7.5.5 Κατανάλωση ενέργειας και θερμοικοί/λειτουργικοί περιορισμοί (έμμεσες επιπτώσεις)**

Η εκτεταμένη παραγωγή συνεχών ή υψηλής έντασης waveforms οδηγεί σε αυξημένο duty λειτουργίας του απτικού ενεργοποιητή, με άμεση συνέπεια υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση και πιθανή επιδείνωση της θερμικής/λειτουργικής συμπεριφοράς υπό παρατεταμένη χρήση. Η υλοποίηση ενσωματώνει μηχανισμούς “φραγής” σε μεταβατικές περιόδους (mute windows και hard-stop με μηδενικό πακέτο), οι οποίοι μπορούν να μειώσουν την πιθανότητα παρατεταμένης ενεργοποίησης χωρίς ουσιαστικό απτικό όφελος.

# Κεφάλαιο 8ο: Πειραματικός Σχεδιασμός και Ερωτηματολόγιο

## 8.1 Στόχοι αξιολόγησης

Η παρούσα μεθοδολογική προσέγγιση αποσκοπεί στην αποτίμηση μιας εφαρμογής μετασχηματισμού ήχου σε απτική δόνηση, αξιοποιώντας ποικίλα ακουστικά ερεθίσματα (μουσική, ομιλία, ήχους περιβάλλοντος) και εστιάζοντας στη χρηστικότητα για άτομα με μειωμένη ακουστική πρόσληψη. Κεντρικός άξονας είναι η διερεύνηση της απτικής «αναγνωσιμότητας» της μουσικής: αν ο χρήστης μπορεί να παρακολουθήσει τον ρυθμό, να ανιχνεύσει επαναλαμβανόμενα μοτίβα και να αντιληφθεί τη χρονική δομή χωρίς ακουστική πρόσβαση. Επιπρόσθετα, διερευνάται τον τρόπο με τον οποίο οι ρυθμίσεις επεξεργασίας/φιλτραρίσματος μεταβάλλουν την αντιληπτική ποιότητα, δηλαδή αν οδηγούν σε πιο διακριτές, πιο σταθερές ή πιο κουραστικές δονήσεις. Η αξιοποίηση καμπυλών στάθμισης (A, C, Z) προσφέρει ένα τυποποιημένο πλαίσιο σύγκρισης διαφορετικών «εκδοχών» του σήματος πριν την απτική απόδοση.

Βασικοί επιμέρους στόχοι:

- **Αντιληπτή καθαρότητα ρυθμού:** Να εκτιμηθεί η σαφήνεια με την οποία ο ρυθμός γίνεται αντιληπτός όταν η απτική έξοδος παράγεται από διαφορετικές συνθήκες φιλτραρίσματος (Flat, A-weight, C-weight, Z-weight).
- **Συγκριτική προτίμηση φίλτρων:** Να εντοπιστεί ποιο φίλτρο θεωρείται συνολικά καλύτερο από τους χρήστες, καθώς και αν υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν παρατηρείται διαφορά.
- **Ρύθμιση passband (εύρος συχνοτήτων):** Να αξιολογηθεί ποιο εύρος συχνοτήτων οδηγεί σε πιο ευχάριστη, «ξεκάθαρη» ή/και άνετη δόνηση, ειδικά σε παρατεταμένη χρήση.
- **Αποτίμηση real-time λειτουργίας (μικρόφωνο):** Να αξιολογηθούν η ευκολία ενεργοποίησης, ο χρονικός συγχρονισμός ήχου-δόνησης και η αντιλαμβανόμενη χρησιμότητα στη καθημερινότητα.
- **Συνολική εμπειρία χρήσης (UX):** Να καταγραφούν αντιλήψεις για ευκολία, σαφήνεια, επάρκεια, ελκυστικότητα και καινοτομία, ώστε να εξαχθούν σχεδιαστικές κατευθύνσεις για βελτίωση.

## 8.2 Περιγραφή δείγματος (πληθυσμός, κριτήρια ένταξης, ομάδες)

Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε εξ ολοκλήρου ηλεκτρονικά, μέσω ανώνυμης φόρμας, η οποία επέτρεψε τη συγκέντρωση απαντήσεων με τυποποιημένο τρόπο. Στο πρώτο μέρος υπήρχε ενημερωτικό σημείωμα που εξηγούσε τον στόχο της έρευνας στο πλαίσιο διπλωματικής εργασίας, διασφάλιζε τον ανώνυμο χαρακτήρα και διευκρίνιζε τον ακαδημαϊκό σκοπό αξιοποίησης των δεδομένων.

Η περιγραφική χαρτογράφηση του δείγματος στηρίχθηκε σε βασικά δημογραφικά στοιχεία (φύλο, ηλικιακή ομάδα, επίπεδο σπουδών), ώστε να καταστεί δυνατή η συνοπτική παρουσίαση των συμμετεχόντων. Ενσωματώθηκε επίσης ερώτηση προηγούμενης εμπειρίας με εφαρμογές μετατροπής ήχου σε δόνηση, για να εκτιμηθεί η εξοικείωση με το συγκεκριμένο τεχνολογικό αντικείμενο.

## 8.3 Διαδικασία πειραματισμού

Η πειραματική ροή οργανώθηκε με τρόπο ώστε κάθε κρίσιμη λειτουργία να αξιολογείται ξεχωριστά και με σαφήνεια. Αρχικά εξετάστηκε η απτική απόδοση μουσικής, ως «βασική λειτουργία» πάνω στην οποία βασίζονται οι υπόλοιπες ρυθμίσεις. Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε εναλλαγή φίλτρων, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών ρυθμίσεων στην ποιότητα της απτικής απόδοσης και την ανάδειξη πιθανής «βέλτιστης» επιλογής. Η τρίτη φάση εστίασε στο passband, αξιολογώντας πώς διαφορετικά εύρη συχνοτήτων επηρεάζουν την υποκειμενική αίσθηση και την άνεση. Τέλος ακολούθησε η δοκιμή real-time μικροφώνου ως πιο «ρεαλιστικό» σενάριο χρήσης.

Στο πλαίσιο αυτό, αξίζει να αναφερθεί πως πέραν της συσκευής ανάπτυξης (Realme GT2 Pro), πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εγκατάστασης και εκτέλεσης της εφαρμογής και σε επιπλέον συσκευές Android διαφορετικών κατασκευαστών, συγκεκριμένα Samsung και Nothing. Ως προϋπόθεση για τη λειτουργία τέθηκε η ύπαρξη απτικού μηχανισμού δόνησης και η δυνατότητα παραγωγής δονήσεων μέσω των Android APIs (ενδεικτικά Vibrator/VibrationEffect), καθώς η απτική έξοδος υλοποιείται ως κυματομορφές/μοτίβα δόνησης. Κατά τις δοκιμές επιβεβαιώθηκε η εκτέλεση των βασικών λειτουργιών της εφαρμογής και στις εν λόγω συσκευές, ενώ πιθανές

διαφοροποιήσεις εντοπίζονται κυρίως στη συνολική αίσθηση/ένταση της δόνησης, λόγω διαφορών στο υλικό (ERM/LRA) και/ή στις παραμετροποιήσεις του vibration stack ανά κατασκευαστή και έκδοση Android.

Η διάρθρωση σε διακριτές δοκιμές/σενάρια και η σύγκριση πολλαπλών συνθηκών από τους ίδιους συμμετέχοντες ευθυγραμμίζεται με τη λογική ενδοϋποκειμενικού σχεδιασμού (repeated measures), ο οποίος χρησιμοποιείται για να μειωθεί η επίδραση ατομικών διαφορών στις συγκρίσεις μεταξύ συνθηκών.[49]

Το ερωτηματολόγιο αποτελείται από συνολικά 28 ερωτήσεις και 6 ενότητες. Στην αξιολόγηση της εφαρμογής περιλαμβάνονται ερωτήσεις τύπου Linkert (1 έως 5 και 1 έως 7), πολλαπλής επιλογής, σύντομης ανάπτυξης αλλά και κείμενο μακροσκελούς απάντησης για να δοθεί η ευκαιρία οι ερωτώμενοι να παραθέσουν σχόλια και βελτιώσεις για την εφαρμογή στις εκάστοτε ενότητες.

## 8.4 Ερωτηματολόγιο

Οι πέντε κατηγορίες που χωρίζεται το ερωτηματολόγιο είναι οι εξής:

- **Δημογραφικά Στοιχεία**
- **Αξιολόγηση της εφαρμογής**
- **Αξιολόγηση φίλτρων δόνησης**
- **Αξιολόγηση Passband**
- **Αξιολόγηση real-time καταγραφής και μετατροπής του ήχου σε δόνηση μέσω μικροφώνου**

### Δημογραφικά στοιχεία:

#### 1. Ηλικία

Απαντήσεις:

- 18-24
- 25 - 34
- 35 - 44
- 45+

#### 2. Φύλλο Απαντήσεις:

- Άνδρας
- Γυναίκα

#### 3. Επίπεδο σπουδών

Απαντήσεις:

- Λύκειο
- ΙΕΚ
- ΑΕΙ/ΤΕΙ
- Μεταπτυχιακό
- Άλλο

#### 4. Έχετε χρησιμοποιήσει στο παρελθόν παρόμοιες εφαρμογές σε κινητό ή tablet (π.χ. εφαρμογές που μετατρέπουν τον ήχο σε δονήσεις);

Απαντήσεις:

- Ναι, συχνά

- Ναι, περιστασιακά
- Όχι, ποτέ

**Αξιολόγηση της εφαρμογής:**

**1. Χαρακτηρίστε την εφαρμογή.**

(1:Βαρετή– 7:Συναρπαστική)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

**2. Χαρακτηρίστε την εφαρμογή**

(1:Αδιάφορη – 7:Ενδιαφέρουσα)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

**3. Χαρακτηρίστε την εφαρμογή**

(1:Συμβατική – 7:Εφευρετική)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

4. Χαρακτηρίστε την εφαρμογή

(1:Παρελκυστική – 7:Υποστηρικτική)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

5. Χαρακτηρίστε την εφαρμογή

(1:Περίπλοκη – 7:Εύκολη)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

6. Χαρακτηρίστε την εφαρμογή

(1:Συνηθισμένη – 7:Πρωτοπόρα)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

7. Χαρακτηρίστε την εφαρμογή

(1:Ανεπαρκής – 7:Επαρκής)

- 1
- 2
- 3

- 4
- 5
- 6
- 7

**8. Χαρακτηρίστε την εφαρμογή**

(1:Μπερδεμένη – 7:Σαφής)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

**Αξιολόγηση φίλτρων δόνησης:**

**1. Νιώσατε καθαρά τον ρυθμό της μουσικήςχωρίς φίλτρο (Flat);. (1:**

**Καθόλου – 5: Πάρα πολύ καθαρά)**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

**2. Νιώσατε καθαρά τον ρυθμό της μουσικήςμε το φίλτρο A-weight;**

**(1: Καθόλου – 5: Πάρα πολύ καθαρά)**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

**3. Νιώσατε καθαρά τον ρυθμό της μουσικήςμε το φίλτρο C-weight;**

**(1: Καθόλου – 5: Πάρα πολύ καθαρά)**

- 1
- 2

- 3
- 4
- 5

4. Νιώσατε καθαρά τον ρυθμό της μουσικής με το φίλτρο Z-weight;

(1: Καθόλου – 5: Πάρα πολύ καθαρά)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

5. Ποιο φίλτρο δόνησης σας φάνηκε συνολικά καλύτερο;

- Flat
- A-weight
- C-weight
- Z-weight
- Δεν παρατήρησα διαφορά
- Άλλο

6. Τι σας άρεσε περισσότερο ή λιγότερο φίλτρο που διαλέξατε;

#### **Αξιολόγηση Passband:**

1. Ποιο passband ήταν πιο ευχάριστο κατά τη χρήση (π.χ. 30-300);

2. Με ποιο passband νιώσατε πιο καθαρά τον ρυθμό της μουσικής μέσα από τη δόνηση (π.χ. 30-300);

3. Με ποιο passband η ένταση της δόνησης σας φάνηκε πιο άνετη για παρατεταμένη χρήση (π.χ. 30-300);

4. Περιγράψτε με λίγα λόγια πώς αισθανόσασταν τη δόνηση με διαφορετικά passband (π.χ. πιο “βαθιά”, πιο “αιχμηρή”, πιο “ξεκάθαρη”).

#### **Αξιολόγηση real-time καταγραφής και μετατροπής του ήχου σε δόνηση μέσω μικροφώνου:**

1. Πόσο εύκολο ήταν να ενεργοποιήσεις και να χρησιμοποιήσεις τη

λειτουργία real-time καταγραφής μέσω μικροφώνου; (1:

Καθόλου εύκολο – 5: Πολύ εύκολο)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

2. Πόσο καλά ταίριαζαν χρονικά οι δονήσεις με τον ήχο από το μικρόφωνο;

(1: Καθόλου συγχρονισμένες– 5: Πολύ καλά συγχρονισμένες)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

3. Πόσο χρήσιμη θεωρείτε γενικά τη λειτουργία real-time καταγραφής μέσω μικροφώνου;

(1: Καθόλου χρήσιμη – 5: Πολύ χρήσιμη)

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

4. Σε τι είδους ήχους χρησιμοποιήσατε κυρίως τη λειτουργία real-time καταγραφής μέσω μικροφώνου

- Ομιλία
- Μουσική
- Ήχοι περιβάλλοντος (π.χ. κυκλοφορία, θόρυβος χώρου)
- Άλλο:

5. Θα χρησιμοποιούσατε ξανά τη λειτουργία Live (μικρόφωνο) στην καθημερινότητά σας;

- Ναι
- Όχι

- Δεν είμαι σίγουρος/η

## 8.5 Μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων

Η ανάλυση μπορεί να τεκμηριωθεί ως «μικτή μεθοδολογία»: ποσοτικά δεδομένα για τη σύγκριση φίλτρων/λειτουργιών και ποιοτικά δεδομένα για την ερμηνεία των υποκειμενικών προτιμήσεων και προτάσεων βελτίωσης. Επειδή οι κλίμακες Likert αντιμετωπίζονται ως τακτικές (ordinal), η παρουσίαση με συχνότητες/ποσοστά και η χρήση της διάμεσου (και ενδεχομένως IQR) θεωρείται περιγραφικά πιο κατάλληλη από την αποκλειστική χρήση μέσων τιμών.

Προτεινόμενα βήματα:

- **Περιγραφικά στατιστικά:** Ποσοστά ανά επιλογή, μέτρα κεντρικής τάσης (διάμεσος/μέσος όπου τεκμηριώνεται) και διασποράς ανά συνθήκη (φίλτρο, real-time).
- **Συγκρίσεις μεταξύ συνθηκών:** Εφόσον η ίδια ομάδα συμμετεχόντων αξιολογεί πολλαπλές συνθήκες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές repeated measures (παραμετρικές ή μη παραμετρικές ανάλογα με τις προϋποθέσεις), αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα του ενδοϋποκειμενικού σχεδιασμού (μείωση σφάλματος από ατομικές διαφορές, αυξημένη ισχύς).
- **Θεματική ανάλυση ανοικτών απαντήσεων:** Κωδικοποίηση σχολίων για φίλτρα, passband και real-time βελτιώσεις σε θεματικές κατηγορίες και, όπου χρειάζεται, παράθεση σύντομων ενδεικτικών αποσπασμάτων (με προσοχή σε προσωπικά δεδομένα).

## Κεφάλαιο 9ο: Αποτέλεσμα

### 9.1 Περιγραφή δείγματος (Πίνακες/Διαγράμματα)

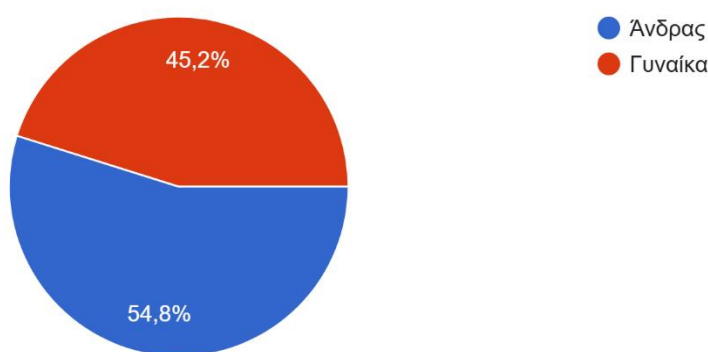
Στην παρούσα υποενότητα περιγράφονται τα βασικά δημογραφικά χαρακτηριστικά των συμμετεχόντων και η προηγούμενη εμπειρία τους με παρόμοιες εφαρμογές, ώστε να είναι σαφές το προφίλ των αξιολογητών. Τα δημογραφικά προκύπτουν από τις 31 καταγραφές απαντήσεων του ερωτηματολογίου.

#### 9.1.1 Φύλο

Όπως φαίνεται στο αντίστοιχο διάγραμμα, το δείγμα αποτελείται από 54,8% άνδρες και 45,2% γυναίκες (N=31). Η κατανομή είναι σχετικά ισορροπημένη, κάτι που βοηθά ώστε τα αποτελέσματα χρήσης να μην αντανακλούν υπερβολικά μία μόνο ομάδα φύλου.

#### Φύλο

31 απαντήσεις



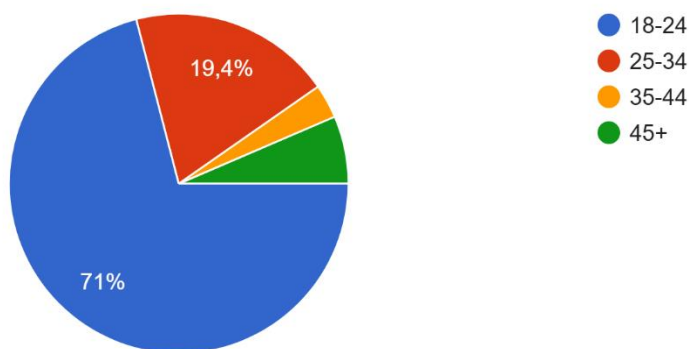
Εικόνα 9.1 Διάγραμμα φύλου

#### 9.1.2 Ηλικιακή ομάδα

Η μεγαλύτερη συγκέντρωση συμμετεχόντων εντοπίζεται στην ηλικιακή ομάδα 18–24 (71,0%), ενώ η ομάδα 25–34 ακολουθεί με 19,4%. Πολύ μικρό ποσοστό καταγράφεται στις ηλικίες 35–44 και 45+, κάτι που δείχνει ότι η αξιολόγηση εκφράζει κυρίως εμπειρία νεότερων χρηστών.

## Ηλικιακή ομάδα

31 απαντήσεις



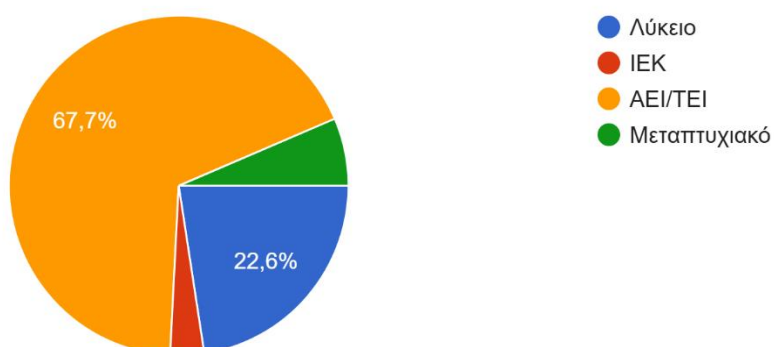
Εικόνα 9.2 Διάγραμμα ηλικιακής ομάδας

### 9.1.3 Επίπεδο σπουδών

Η πλειονότητα δήλωσε ΑΕΙ/ΤΕΙ (67,7%), ενώ ακολουθεί το Λύκειο με 22,6%. Τα υπόλοιπα ποσοστά κατανέμονται σε ΙΕΚ (3,2%) και Μεταπτυχιακό (6,5%).

## Επίπεδο σπουδών

31 απαντήσεις



Εικόνα 9.3 Διάγραμμα επιπέδου σπουδών

### 9.1.4 Εμπειρία με παρόμοιες εφαρμογές

Οι περισσότεροι συμμετέχοντες (61,3%) δήλωσαν ότι δεν έχουν χρησιμοποιήσει στο παρελθόν παρόμοιες εφαρμογές, ενώ το 35,5% έχει χρησιμοποιήσει περιστασιακά και το 3,2% συχνά. Αυτό σημαίνει ότι η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε κυρίως από χρήστες χωρίς ισχυρή προϋπάρχουσα εξοικείωση, άρα οι βαθμολογίες αντανακλούν σε μεγάλο βαθμό “πρώτη εμπειρία” με το σενάριο μετατροπής ήχου σε δόνηση.

Έχετε χρησιμοποιήσει στο παρελθόν παρόμοιες εφαρμογές σε κινητό ή tablet (π.χ. εφαρμογές που μετατρέπουν τον ήχο σε δονήσεις);

31 απαντήσεις



Εικόνα 9.4 Διάγραμμα χρήσης παρόμοιων εφαρμογών

## 9.2 Αποτελέσματα για τη συνολική εφαρμογή

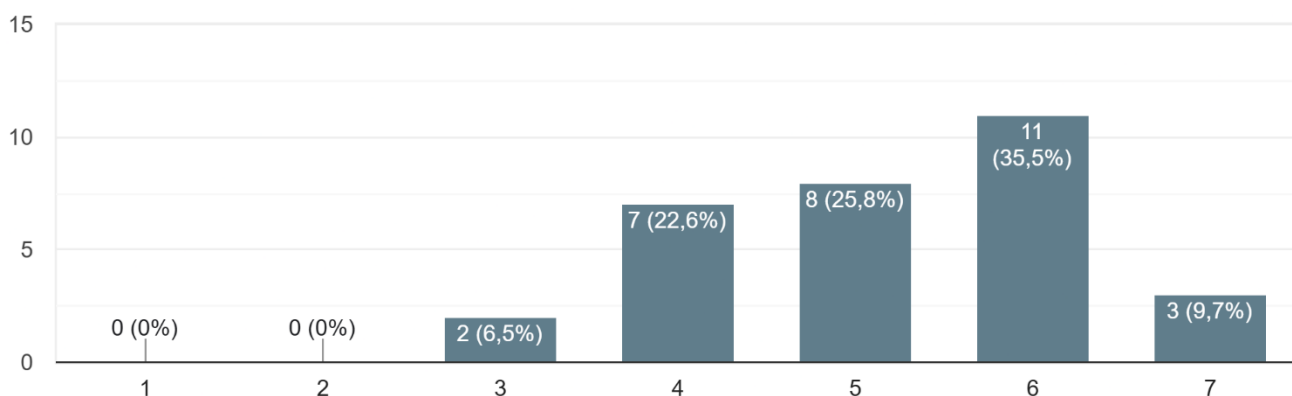
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της συνολικής αξιολόγησης της εφαρμογής μέσω οκτώ ερωτημάτων τύπου Likert 1–7 («Χαρακτηρίστε την εφαρμογή»), από  $N=31$  συμμετέχοντες. Γενικά, οι απαντήσεις συγκεντρώνονται κυρίως στις υψηλές τιμές (5–7), γεγονός που υποδηλώνει θετική συνολική αποτίμηση της εφαρμογής στα επιμέρους κριτήρια που αξιολογήθηκαν.

### 9.2.1 Ερώτημα 1 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Βαρετή – Συναρπαστική” (Γράφημα 1)

Παρατηρείται ισχυρή συγκέντρωση στις τιμές 5–6, με συχνότερη επιλογή την τιμή 6 (35,5%). Η απουσία απαντήσεων στις τιμές 1–2 δείχνει ότι δεν καταγράφηκαν ιδιαίτερα αρνητικές αξιολογήσεις σε αυτό το κριτήριο.

Χαρακτηρίστε την εφαρμογή

31 απαντήσεις



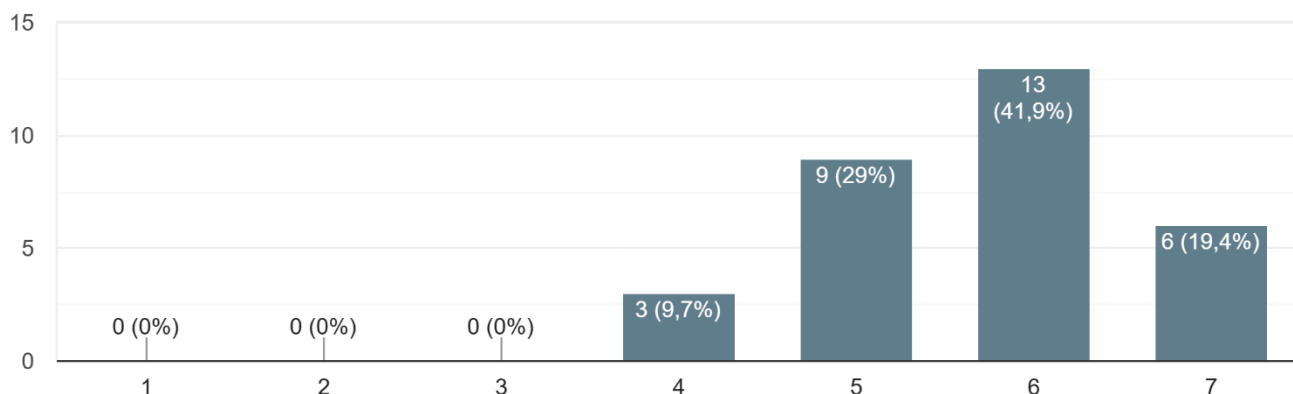
Εικόνα 9.5 Διάγραμμα Ερωτήματος 1

### 9.2.2 Ερώτημα 2 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Αδιάφορη - Ενδιαφέρουσα” (Γράφημα 2)

Η πλειονότητα των απαντήσεων βρίσκεται στις τιμές 5–7, με κορύφωση στην τιμή 6 (41,9%). Οι τιμές κάτω από 4 δεν εμφανίζονται, κάτι που ενισχύει την εικόνα θετικής αξιολόγησης για το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό.

Χαρακτηρίστε την εφαρμογή

31 απαντήσεις



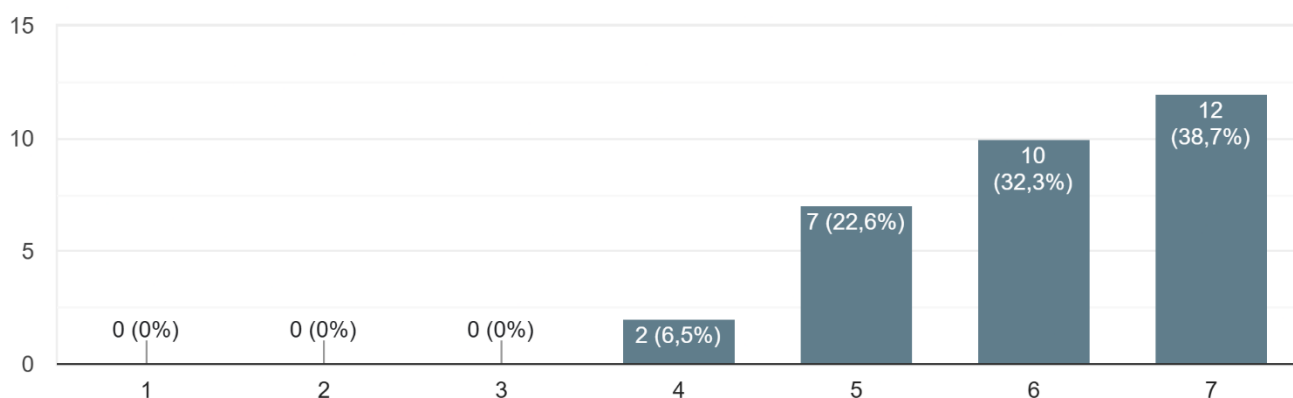
Εικόνα 9.6 Διάγραμμα Ερωτήματος 2

### 9.2.3 Ερώτημα 3 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Συμβατική - Εφευρετική” (Γράφημα 3)

Το υψηλότερο ποσοστό παρατηρείται στην τιμή 7 (38,7%), ενώ ακολουθεί η τιμή 6 (32,3%). Συνολικά, οι απαντήσεις 6–7 αποτελούν την πλειονότητα, δείχνοντας ιδιαίτερα θετική στάση σε αυτό το κριτήριο.

Χαρακτηρίστε την εφαρμογή

31 απαντήσεις



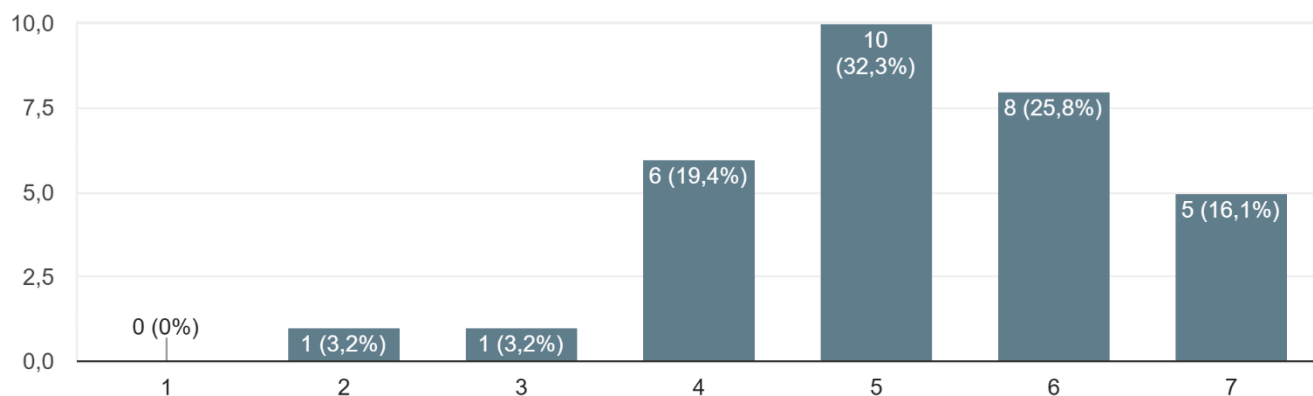
Εικόνα 9.7 Διάγραμμα Ερωτήματος 3

#### 9.2.4 Ερώτημα 4 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Παρελκυστική - Υποστηρικτική” (Γράφημα 4)

Η κατανομή είναι πιο «απλωμένη», όμως το κέντρο βάρους παραμένει στις τιμές 5–7, με συχνότερη επιλογή την τιμή 5 (32,3%). Παρότι εμφανίζονται μεμονωμένες χαμηλές τιμές (2 και 3), αυτές αποτελούν μικρό ποσοστό του δείγματος.

Χαρακτηρίστε την εφαρμογή

31 απαντήσεις



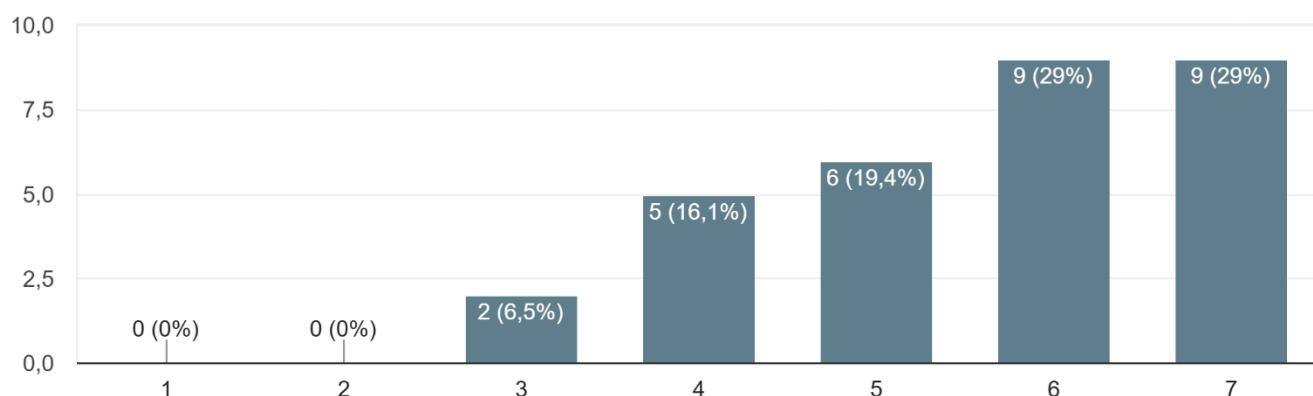
Εικόνα 9.8 Διάγραμμα Ερωτήματος 4

#### 9.2.5 Ερώτημα 5 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Περίπλοκη - Εύκολη” (Γράφημα 5)

Και εδώ οι απαντήσεις συγκεντρώνονται κυρίως στις τιμές 6–7, με την τιμή 6 να είναι η συχνότερη (38,7%). Οι τιμές 1–2 δεν εμφανίζονται, ενώ οι τιμές 3–5 έχουν μικρότερη αλλά υπαρκτή παρουσία.

Χαρακτηρίστε την εφαρμογή

31 απαντήσεις



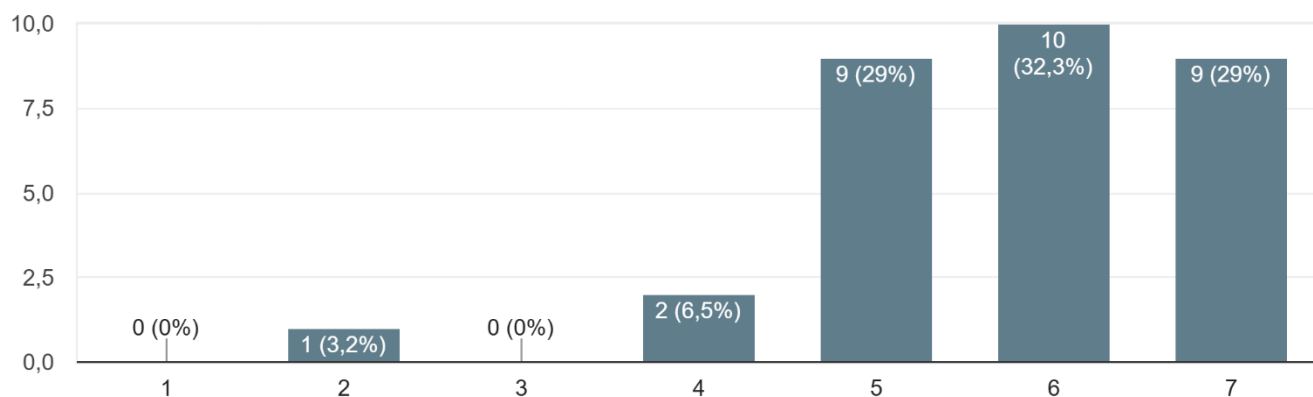
Εικόνα 9.9 Διάγραμμα Ερωτήματος 5

### 9.2.6 Ερώτημα 6 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Συνηθισμένη - Πρωτοπόρα” (Γράφημα 6)

Η μεγαλύτερη συγκέντρωση βρίσκεται στην τιμή 7 (38,7%), ενώ σημαντικές είναι και οι τιμές 4 και 6 (25,8% η καθεμία). Αυτό δείχνει ότι αρκετοί χρήστες έδωσαν «πολύ υψηλή» αξιολόγηση, αλλά υπάρχει και μια μερίδα που κινείται στη μεσαία προς υψηλή περιοχή (4–6).

#### Χαρακτηρίστε την εφαρμογή

31 απαντήσεις



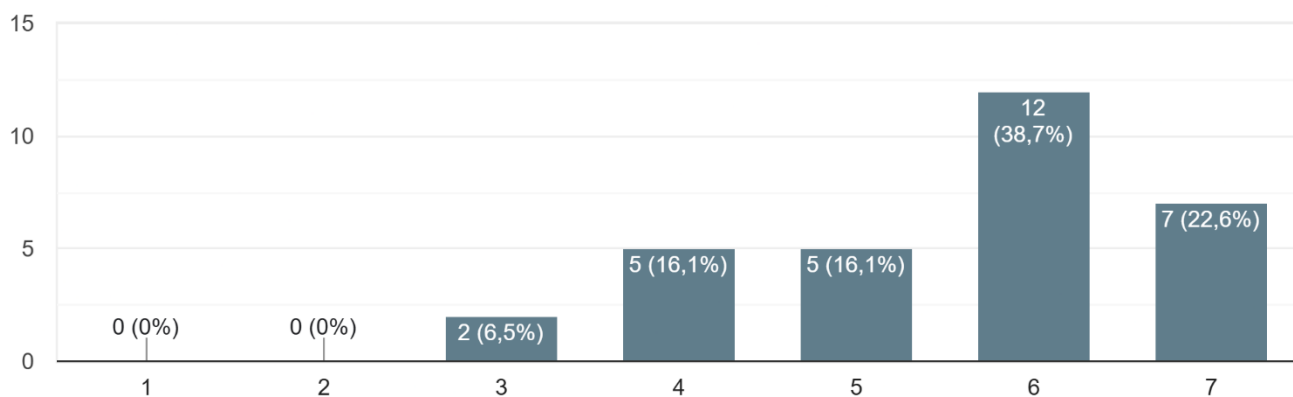
Εικόνα 9.10 Διάγραμμα Ερωτήματος 6

### 9.2.7 Ερώτημα 7 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Ανεπαρκής - Επαρκής” (Γράφημα 7)

Οι απαντήσεις συγκεντρώνονται στις τιμές 6 και 7 (29,0% η καθεμία), με τις τιμές 4–5 να ακολουθούν. Η απουσία των πολύ χαμηλών τιμών (1–2) υποστηρίζει ότι η αξιολόγηση παραμένει συνολικά θετική και σε αυτό το χαρακτηριστικό.

#### Χαρακτηρίστε την εφαρμογή

31 απαντήσεις



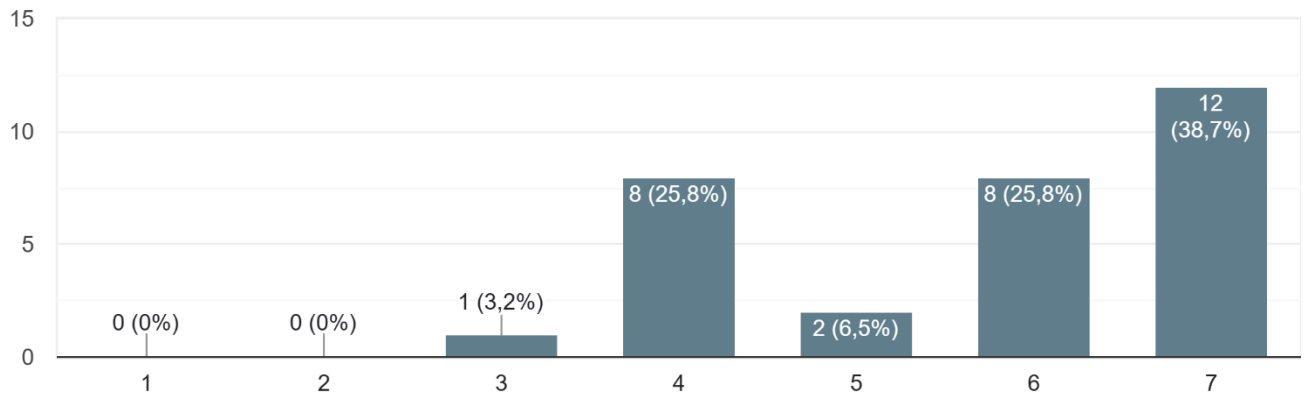
Εικόνα 9.11 Διάγραμμα Ερωτήματος 7

### 9.2.8 Ερώτημα 8 – “Χαρακτηρίστε την εφαρμογή Μπερδεμένη - Σαφής” (Γράφημα 8)

Στο τελευταίο γράφημα, οι τιμές 5–7 κυριαρχούν, με κορύφωση στην τιμή 6 (32,3%) και ισχυρή παρουσία στις τιμές 5 και 7 (29,0% η καθεμία). Υπάρχουν ελάχιστες χαμηλές αξιολογήσεις (π.χ. τιμή 2), οι οποίες ωστόσο αποτελούν μικρή μειοψηφία του δείγματος.

#### Χαρακτηρίστε την εφαρμογή

31 απαντήσεις



Εικόνα 9.12 Διάγραμμα Ερωτήματος 8

### 9.3 Αποτελέσματα για φίλτρα δόνησης

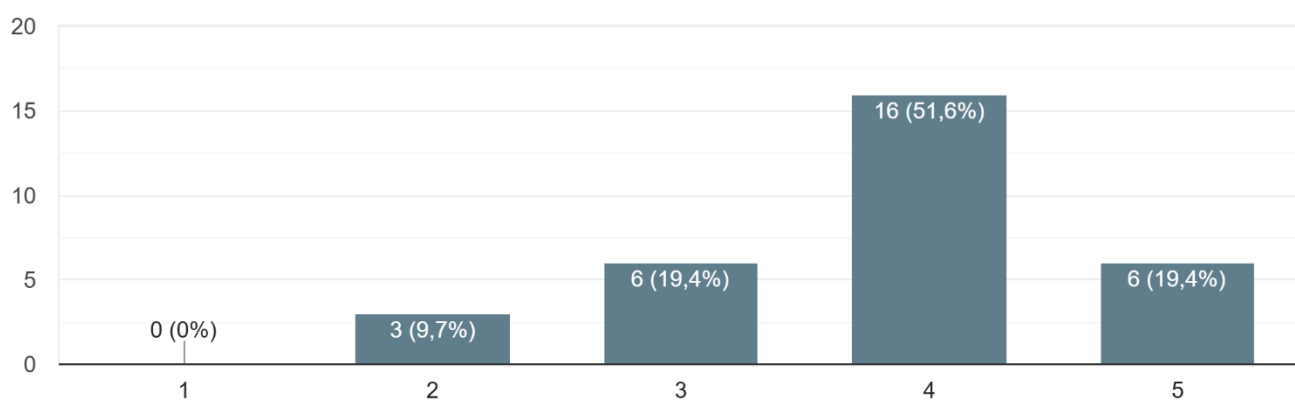
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το πόσο καθαρά έγινε αντιληπτός ο ρυθμός της μουσικής μέσω δόνησης για τέσσερα φίλτρα (Flat, A-weight, C-weight, Z-weight), καθώς και ποιο φίλτρο θεωρήθηκε συνολικά καλύτερο. Οι απαντήσεις δίνονται σε κλίμακα 1–5 για την «καθαρότητα ρυθμού» και σε μία ερώτηση επιλογής για το «καλύτερο φίλτρο».

#### 9.3.1 Καθαρότητα ρυθμού – Flat (χωρίς φίλτρο)

Στο Flat, η συχνότερη τιμή είναι το 4 (51,6%), ενώ οι τιμές 3 και 5 εμφανίζονται με 19,4% η καθεμία. Αυτό δείχνει ότι, χωρίς φίλτρο, ο ρυθμός γίνεται γενικά αντιληπτός σε ικανοποιητικό βαθμό, αλλά όχι με «κορύφωση» στην ανώτατη τιμή (5).

Νιώσατε καθαρά τον ρυθμό της μουσικής χωρίς φίλτρο (Flat);

31 απαντήσεις



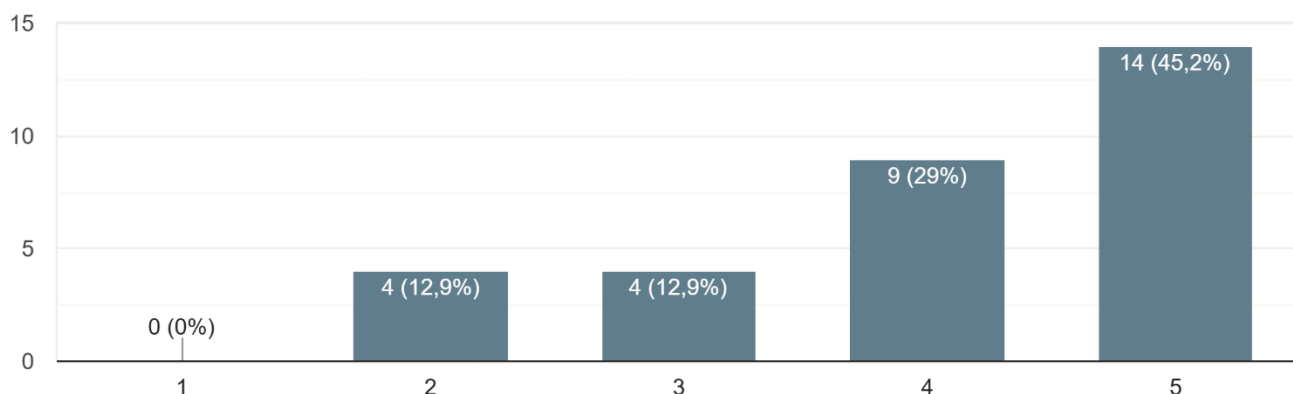
Εικόνα 9.13 Διάγραμμα καθαρότητας ρυθμού Flat

#### 9.3.2 Καθαρότητα ρυθμού – A-weight

Στο A-weight, οι υψηλές τιμές είναι πιο έντονες, με 45,2% στην τιμή 5 και 29,0% στην τιμή 4. Η κατανομή αυτή υποδηλώνει ότι το συγκεκριμένο φίλτρο βοήθησε περισσότερους χρήστες να αντιληφθούν τον ρυθμό «πιο καθαρά» σε σχέση με το Flat.

Νιώσατε καθαρά τον ρυθμό της μουσικής με το φίλτρο A-weight;

31 απαντήσεις



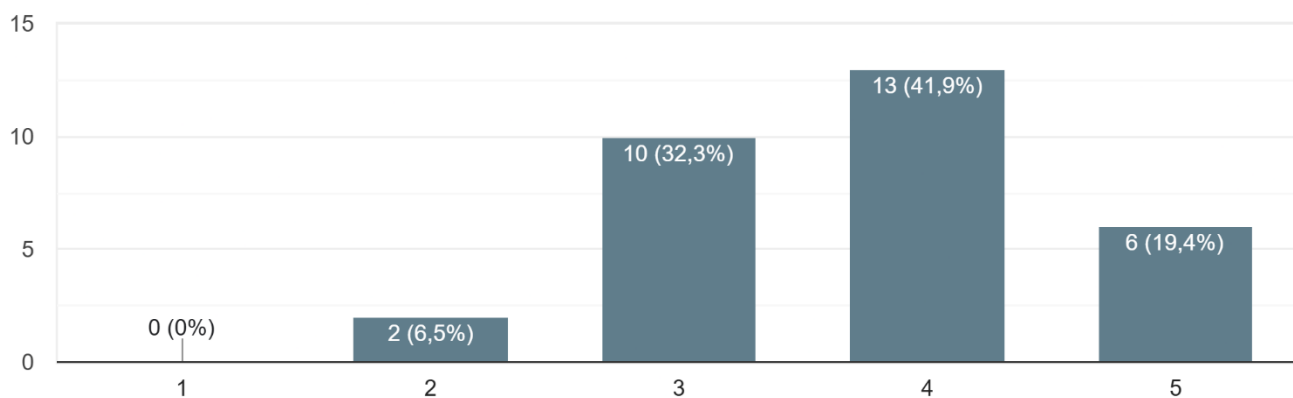
Εικόνα 9.14 Διάγραμμα καθαρότητας ρυθμού A-weight

### 9.3.3 Καθαρότητα ρυθμού – C-weight

Στο C-weight, η συχνότερη τιμή είναι το 4 (41,9%), ακολουθούμενη από το 3 (32,3%) και το 5 (19,4%). Η εικόνα δείχνει θετική αξιολόγηση (κυρίως 3–4), αλλά με μικρότερη συγκέντρωση στο 5 σε σχέση με το A-weight.

Νιώσατε καθαρά τον ρυθμό της μουσικής με το φίλτρο C-weight;

31 απαντήσεις



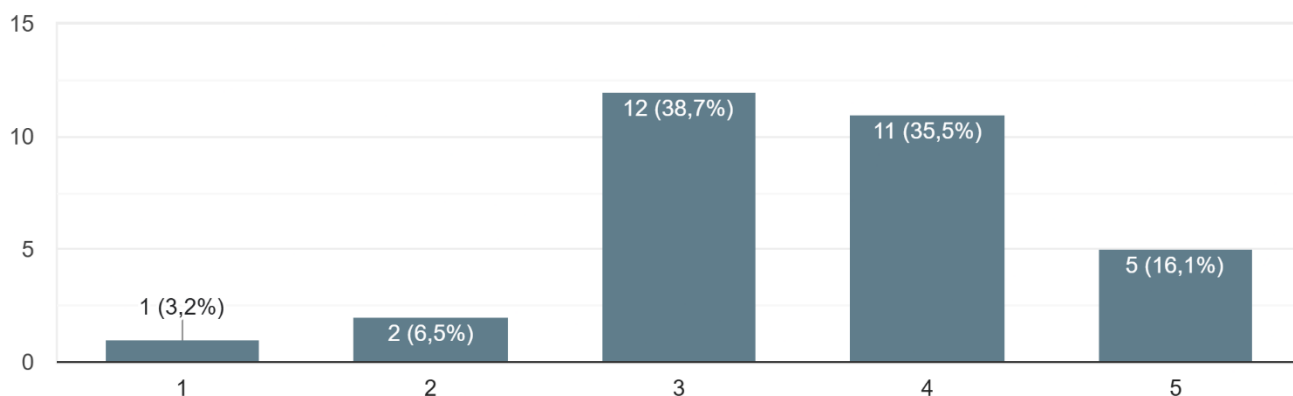
Εικόνα 9.15 Διάγραμμα καθαρότητας ρυθμού C-weight

### 9.3.4 Καθαρότητα ρυθμού – Z-weight

Στο Z-weight, οι συχνότερες τιμές είναι το 3 (38,7%) και το 4 (35,5%), ενώ εμφανίζονται και χαμηλότερες αξιολογήσεις (1–2) σε μικρό ποσοστό. Αυτό υποδηλώνει ότι το Z-weight λειτούργησε “μέτρια προς καλή” επιλογή για αρκετούς, αλλά όχι τόσο ισχυρά όσο το A-weight στο συγκεκριμένο δείγμα.

Νιώσατε καθαρά τον ρυθμό της μουσικής με το φίλτρο Z-weight;

31 απαντήσεις



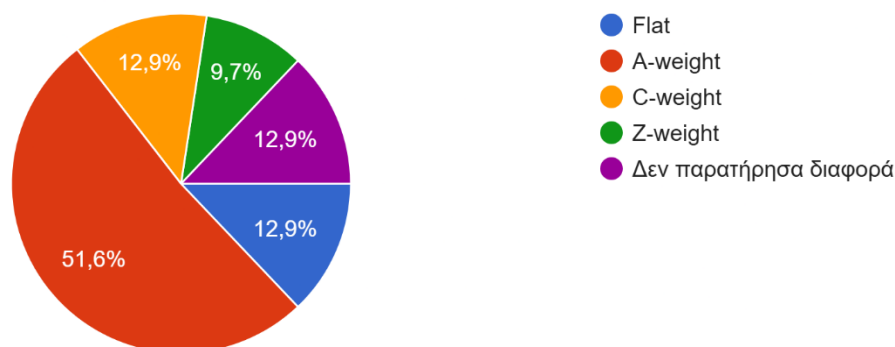
Εικόνα 9.16 Διάγραμμα καθαρότητας ρυθμού Z-weight

### 9.3.4 Συνολικά καλύτερο φίλτρο

Στην ερώτηση «Ποιο φίλτρο δόνησης σας φάνηκε συνολικά καλύτερο;», το **A-weight** επιλέχθηκε από 51,6% (16/31). Ακολουθούν Flat και C-weight με 12,9% (4/31) το καθένα, Z-weight με 9,7% (3/31), ενώ 12,9% (4/31) δήλωσαν ότι δεν παρατήρησαν διαφορά.

Ποιο φίλτρο δόνησης σας φάνηκε συνολικά καλύτερο;

31 απαντήσεις



Εικόνα 9.17 Διάγραμμα συνολικά καλύτερου φίλτρου

### 9.3.5 Ενδεικτικά σχόλια και συμπεράσματα

Συγκριτικά, το A-weight αναδείχθηκε ως η επικρατέστερη επιλογή, καθώς συγκέντρωσε το 51,6% των προτιμήσεων ως «συνολικά καλύτερο φίλτρο», ενώ παράλληλα είχε και υψηλότερες αξιολογήσεις στην κλίμακα “καθαρότητας ρυθμού” (με 45,2% στην τιμή 5). Σε ποιοτικό επίπεδο, η προτίμηση αυτή συνδέεται με περιγραφές που τονίζουν μεγαλύτερη ευκρίνεια/αντιστοίχιση και καθαρότητα με τον ρυθμό και τη μελωδία, π.χ. «Η μελωδία ήταν πιο ξεκάθαρη στο φίλτρο A-weight συγκριτικά με τα άλλα φίλτρα.» και «Τα ύψη και οι διάρκειες της δόνησης ήταν πιο κοντά στην μελωδία».

Παράλληλα, εμφανίζεται και υποστήριξη για το Flat, κυρίως λόγω της “φυσικής” αίσθησης που δίνει σε μέρος των χρηστών, όπως: «Το Flat δίνει μια πιο “ρεαλιστική” αίσθηση του ήχου, χωρίς ενίσχυση ή αλλοίωση. Επομένως, μπορώ να καταλάβω καλύτερα τη φυσική ροή του ρυθμού, εν αντιθέσει με τα άλλα φίλτρα, παρότι η διαφορά δεν είναι μεγάλη.» Τέλος, ένα τμήμα του δείγματος δεν αντιλήφθηκε ουσιαστικές διαφορές μεταξύ φίλτρων (12,9%), κάτι που αποτυπώνεται και σε σχόλια όπως «Δεν παρατήρησα διαφορά... τα ένιωσα ίδια, πολύ μικρές οι διαφορές» ή «Το φίλτρο Flat είχε πιο αιχμηρή δόνηση. Ωστόσο, δεν θεωρώ πως υπήρχαν ιδιαίτερα διαφορές.»

## 9.4 Αποτελέσματα για passband

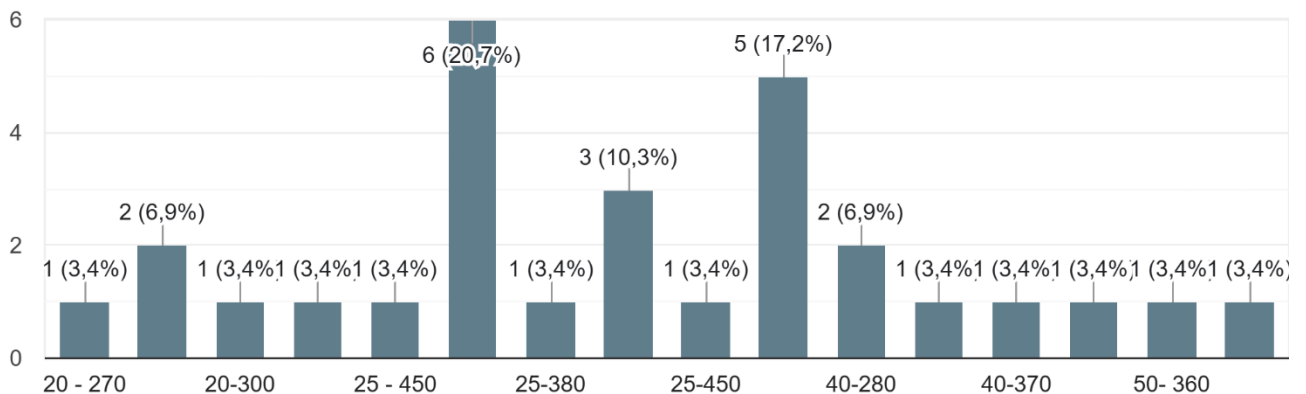
Η ενότητα αυτή εξετάζει τις προτιμήσεις των χρηστών σχετικά με το passband (εύρος συχνοτήτων) που τους φάνηκε πιο κατάλληλο, καθώς και το πώς περιέγραψαν υποκειμενικά την αίσθηση της δόνησης με διαφορετικές επιλογές passband. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από N=31 απαντήσεις και παρουσιάζονται με συχνότητες/ποσοστά και ενδεικτικά αποσπάσματα σχολίων.

### 9.4.1 Ευχάριστο κατά τη χρήση

Στο ερώτημα «Ποιο passband ήταν πιο ευχάριστο κατά τη χρήση», η συχνότερη επιλογή ήταν το 25–250 (6 απαντήσεις, 19,4%). Οι υπόλοιπες επιλογές διασπείρονται σε αρκετές κατηγορίες, αλλά υπάρχουν και τιμές με αρκετά μεγάλο ποσοστό, όπως το 30–300 (5 απαντήσεις, 17,2). Το φαινόμενο αυτό δείχνει ότι η “άνεση” εξαρτάται αρκετά από την ατομική αίσθηση/προτίμηση.

Ποιο passband ήταν πιο ευχάριστο κατά τη χρήση (π.χ. 30-300);

29 απαντήσεις



Εικόνα 9.18 Διάγραμμα πιο ευχάριστου passband

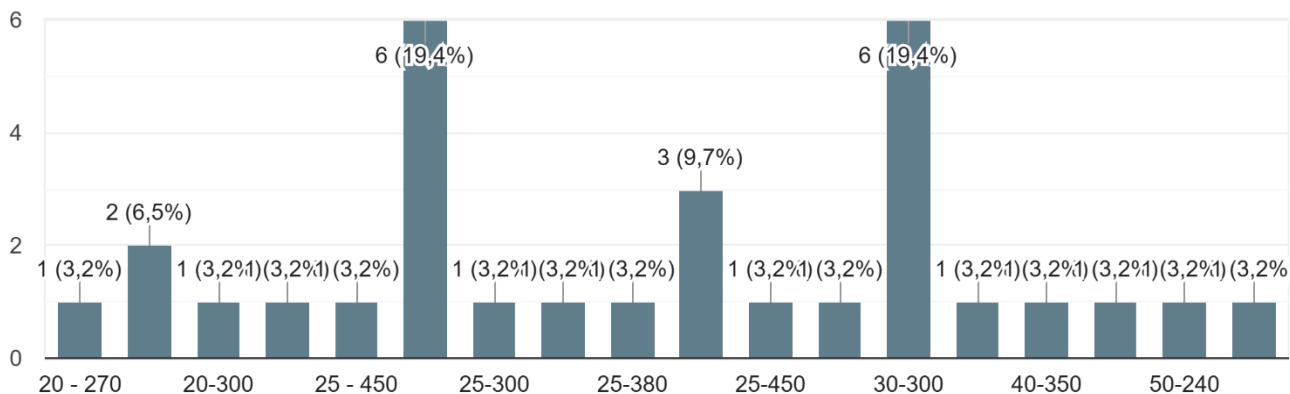
### 9.4.2 Καθαρότητα του ρυθμού

Στο ερώτημα «Με ποιο passband νιώσατε πιο καθαρά τον ρυθμό της μουσικής μέσα από τη δόνηση (π.χ. 30-300);», η συχνότερη επιλογή ήταν το 25–250 και το 30–300 (6 απαντήσεις στο καθένα, από 19,4%).

Παρομοίως και εδώ όμως οι υπόλοιπες επιλογές διασπείρονται σε αρκετές κατηγορίες (πολλά διαφορετικά passband με μικρό αριθμό εμφανίσεων).

Με ποιο passband νιώσατε πιο καθαρά τον ρυθμό της μουσικής μέσα από τη δόνηση (π.χ. 30-300);

31 απαντήσεις



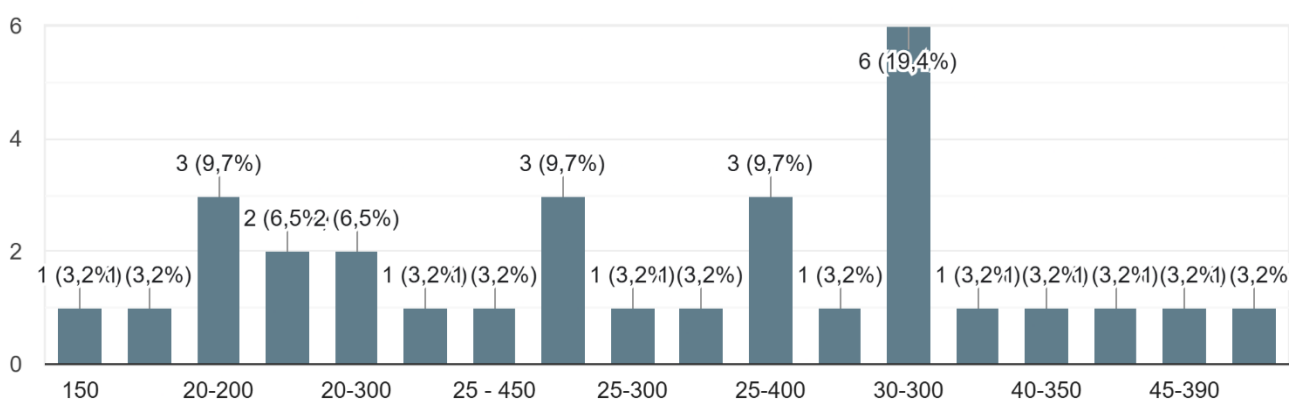
Εικόνα 9.19 Διάγραμμα πιο καθαρού passband στον ρυθμό

### 9.4.3 Άνεση σε παρατεταμένη χρήση

Στο ερώτημα «Με ποιο passband η ένταση της δόνησης σας φάνηκε πιο άνετη για παρατεταμένη χρήση», η συχνότερη επιλογή ήταν το **30–300** (6 απαντήσεις, 19,4%). Σε ισοβαθμία υπάρχουν και οι τιμές 20-200, 25-250 και 25-400 με 3 απαντήσεις η κάθε μια και ποσοστό της τάξης το 9,7%.

Με ποιο passband η ένταση της δόνησης σας φάνηκε πιο άνετη για παρατεταμένη χρήση (π.χ. 30-300);

31 απαντήσεις



Εικόνα 9.20 Διάγραμμα πιο άνετου passband

#### 9.4.4 Ποιοτική περιγραφή αίσθησης

Στην ανοιχτή ερώτηση «Περιγράψτε με λίγα λόγια πώς αισθανόσασταν τη δόνηση με διαφορετικά passband», οι απαντήσεις συγκλίνουν σε λίγες επαναλαμβανόμενες “λέξεις-κλειδιά”, όπως «ξεκάθαρη», «αιχμηρή», «βαθιά» ή «δυνατή». Επίσης εμφανίζεται η ιδέα ότι η επιλογή passband επηρεάζει το αν “χάνονται” στοιχεία της δόνησης, π.χ. «Μ υψηλότερο low passband ή χαμηλότερο high ένιωθα τη δόνηση να χάνεται».

#### 9.4.5 Σύντομη ερμηνεία

Το γεγονός ότι το 30–300 εμφανίζεται συχνότερα ως “άνετο” passband, ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν πολλές μεμονωμένες επιλογές, υποδηλώνει ότι ένα μεσαίο εύρος συχνοτήτων λειτουργεί ως “ασφαλής” επιλογή για αρκετούς χρήστες, αλλά δεν καλύπτει όλους. Τα ποιοτικά σχόλια δείχνουν ότι οι χρήστες αποδίδουν στο passband χαρακτηρισμούς που σχετίζονται με καθαρότητα/ευκρίνεια και με την “υφή” της δόνησης (αιχμηρή–βαθιά), άρα η βελτίωση της εφαρμογής μπορεί να στοχεύσει σε πιο κατανοητές προεπιλογές και οδηγίες επιλογής ανά χρήση (π.χ. μουσική/ομιλία).

### 9.5 Αποτελέσματα για λειτουργία μικροφώνου (Live/real-time)

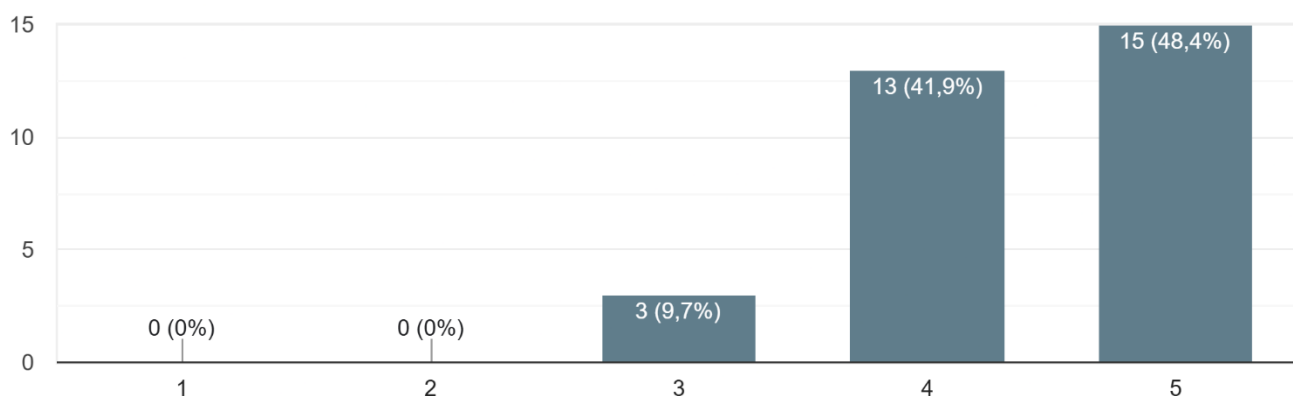
Η ενότητα αυτή αποτυπώνει την αξιολόγηση της λειτουργίας real-time καταγραφής μέσω μικροφώνου ως προς: (α) ευκολία ενεργοποίησης/χρήσης, (β) χρονικό συγχρονισμό δόνησης–ήχου, (γ) γενική χρησιμότητα, (δ) είδη ήχων στους οποίους δοκιμάστηκε, (ε) πρόθεση επαναχρήσης, και (στ) προτάσεις βελτίωσης από ανοιχτές απαντήσεις. Το σύνολο των κλειστών ερωτήσεων απαντήθηκε από  $N=31$  συμμετέχοντες.

#### 9.5.1 Ευκολία ενεργοποίησης/χρήσης

Στην ερώτηση «Πόσο εύκολο ήταν να ενεργοποιήσεις και να χρησιμοποιήσεις τη λειτουργία real-time καταγραφής μέσω μικροφώνου;» (κλίμακα 1–5), οι απαντήσεις συγκεντρώνονται στις υψηλές τιμές 4–5. Συγκεκριμένα, η τιμή 5 συγκεντρώνει 48,4% (15/31) και η τιμή 4 συγκεντρώνει 41,9% (13/31).

Πόσο εύκολο ήταν να ενεργοποιήσεις και να χρησιμοποιήσεις τη λειτουργία real-time καταγραφής μέσω μικροφώνου;

31 απαντήσεις

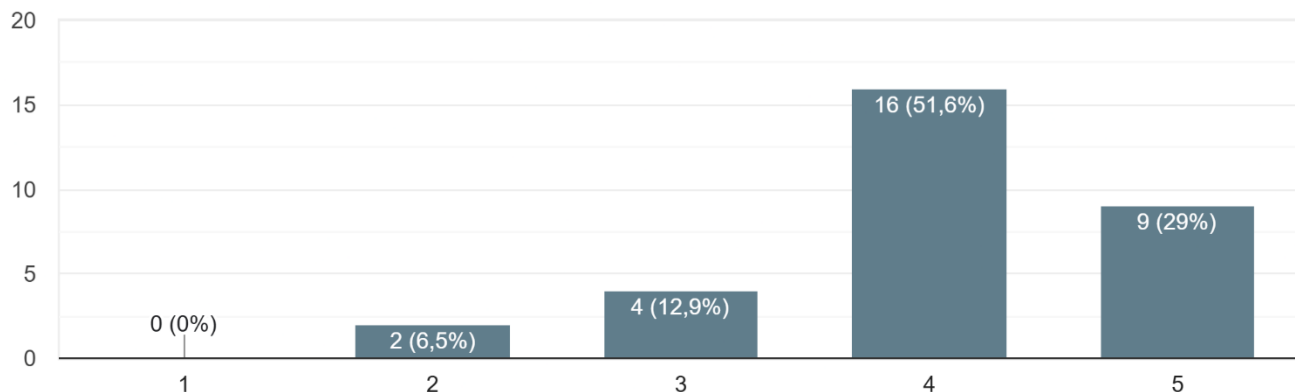


Εικόνα 9.21 Διάγραμμα ευκολίας ενεργοποίησης και χρήσης της real time λειτουργίας

### 9.5.2 Χρονικός συγχρονισμός δόνησης-ήχου

Στην ερώτηση «Πόσο καλά ταίριαζαν χρονικά οι δονήσεις με τον ήχο από το μικρόφωνο;» (κλίμακα 1–5), η πλειονότητα βρίσκεται στις τιμές 4 και 5. Η τιμή 4 συγκεντρώνει 51,6% (16/31) και η τιμή 5 το 29,0% (9/31), ενώ μικρότερα ποσοστά εμφανίζονται στις τιμές 2–3.

Πόσο καλά ταίριαζαν χρονικά οι δονήσεις με τον ήχο από το μικρόφωνο;  
31 απαντήσεις

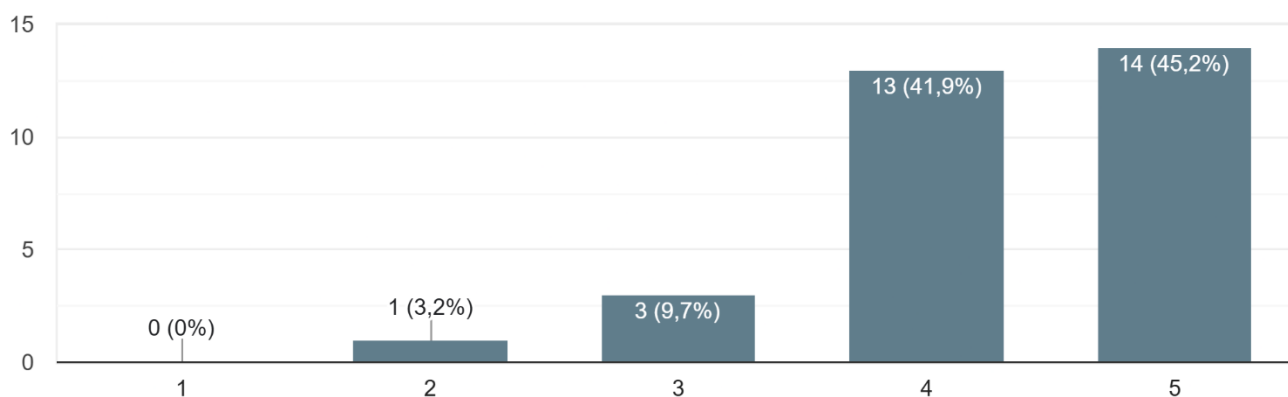


Εικόνα 9.22 Διάγραμμα ποσοστού ταύτισης δόνησης με ήχου από το μικρόφωνο

### 9.5.3 Γενική χρησιμότητα

Στην ερώτηση «Πόσο χρήσιμη θεωρείτε γενικά τη λειτουργία real-time καταγραφής μέσω μικροφώνου;» (κλίμακα 1–5), οι απαντήσεις είναι επίσης υψηλές, με τις τιμές 4 και 5 να υπερिशύουν. Η τιμή 5 συγκεντρώνει 45,2% (14/31) και η τιμή 4 συγκεντρώνει 41,9% (13/31), ενώ η τιμή 1 δεν εμφανίζεται.

Πόσο χρήσιμη θεωρείτε γενικά τη λειτουργία real-time καταγραφής μέσω μικροφώνου  
31 απαντήσεις



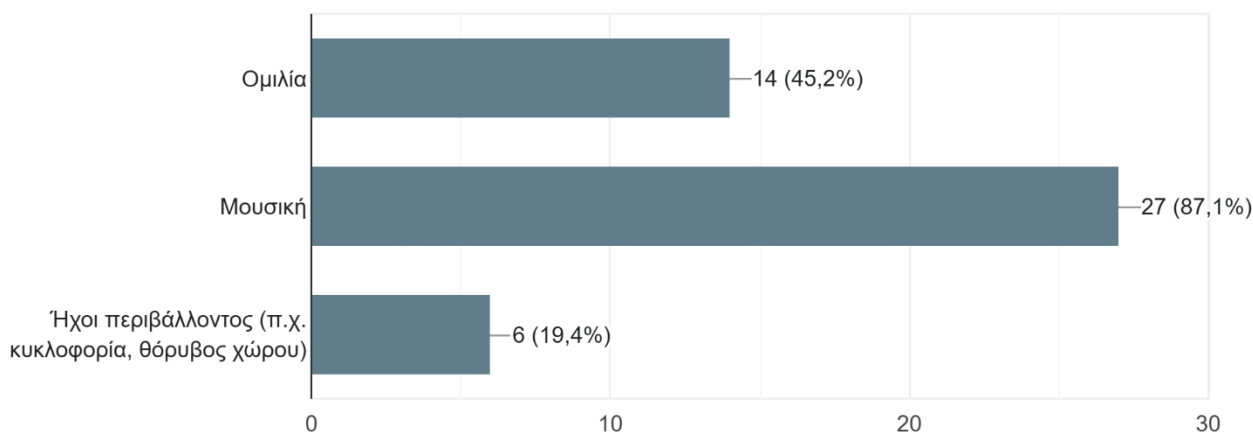
Εικόνα 9.23 Διάγραμμα χρησιμότητας της real time λειτουργίας

### 9.5.4 Είδη ήχων που χρησιμοποιήθηκαν (πολλαπλή επιλογή)

Στην ερώτηση «Σε τι είδους ήχους χρησιμοποιήσατε κυρίως τη λειτουργία real-time καταγραφής μέσω μικροφώνου;» (πολλαπλή επιλογή), η μουσική είναι η συχνότερη κατηγορία. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν: Μουσική 87,1% (27/31), Ομιλία 45,2% (14/31), Ήχοι περιβάλλοντος (π.χ. κυκλοφορία, θόρυβος χώρου) 19,4% (6/31).

Σε τι είδους ήχους χρησιμοποιήσατε κυρίως τη λειτουργία real-time καταγραφής μέσω μικροφώνου

31 απαντήσεις



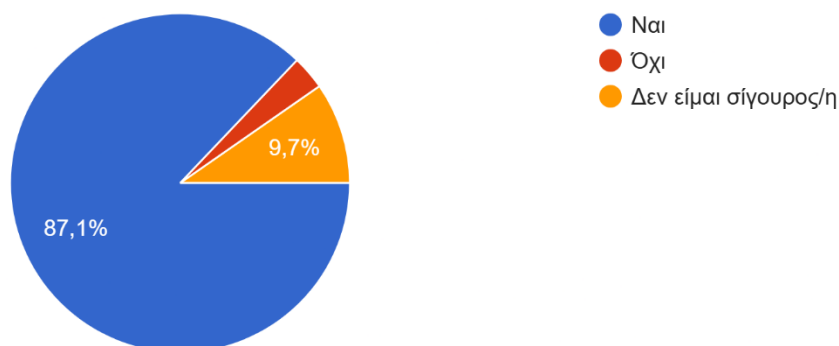
Εικόνα 9.24 Διάγραμμα ειδών ήχου χρήσης της real-time λειτουργίας

### 9.5.5 Πρόθεση επαναχρήσης (Live)

Στην ερώτηση «Θα χρησιμοποιούσατε ξανά τη λειτουργία Live (μικρόφωνο) στην καθημερινότητά σας;», η πλειονότητα απαντά «Ναι» (87,1%). Οι υπόλοιπες απαντήσεις κατανέμονται σε «Όχι» και «Δεν είμαι σίγουρος/η» σε αρκετά μικρότερα ποσοστά.

Θα χρησιμοποιούσατε ξανά τη λειτουργία Live (μικρόφωνο) στην καθημερινότητά σας;

31 απαντήσεις



Εικόνα 9.25 Διάγραμμα πιθανότητας επαναχρησιμοποίησης της real-time λειτουργίας

### 9.5.5 Σχόλια χρηστών

Στα ανοιχτά σχόλια, εμφανίζονται θετικές αξιολογήσεις που συνδέουν τη real-time λειτουργία με πιο “ζωντανή” και αλληλεπιδραστική εμπειρία, π.χ. «Η real-time λειτουργία κάνει την εφαρμογή πιο αλληλεπιδραστική και διασκεδαστική...» Παράλληλα, στις προτάσεις βελτίωσης επαναλαμβάνονται θέματα όπως περισσότερη καθοδήγηση/οδηγίες χρήσης και μείωση καθυστέρησης, π.χ. «Να υπάρχουν παραπάνω οδηγίες για ευκολότερη χρήση...» και «Λιγότερη καθυστέρηση». Τέλος, εμφανίζεται και παρατήρηση για σαφέστερη ένδειξη/οδηγία τερματισμού της καταγραφής, π.χ. «Να είναι πιο ξεκάθαρο πότε τελειώνει η καταγραφή...».

## 9.6 Συσχετίσεις του δείγματος με τα αποτελέσματα

### 9.6.1 Συσχετίσεις με Βαθμολογίες (Αξιολόγηση της Εφαρμογής)

Δημογραφικό	Ομάδα	Μέσος Όρος Αξιολόγησης (1-7)
Φύλο	Άνδρας	5.46
Φύλο	Γυναίκα	5.75
Ηλικία	18-24	5.49
Ηλικία	25-34	6.15
Ηλικία	35-44	6.00
Ηλικία	45+	4.81
Εκπαίδευση	ΑΕΙ/ΤΕΙ	5.64
Εκπαίδευση	ΙΕΚ	4.75
Εκπαίδευση	Λύκειο	5.45
Εκπαίδευση	Μεταπτυχιακό	6.06
Προηγούμενη Εμπειρία	Όχι, ποτέ	5.56
Προηγούμενη Εμπειρία	Ναι, περιστασιακά	5.65
Προηγούμενη Εμπειρία	Ναι, συχνά	5.62

Εικόνα 9.26 Πίνακας Συσχετίσεων 1

#### Βασικά Συμπεράσματα:

- Συσχέτιση με την **Ηλικία**
  1. **Κορυφαία Αξιολόγηση (6.15):** Η ομάδα **25-34** έδωσε τον υψηλότερο μέσο όρο αξιολόγησης για τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής.
  2. **Υψηλές Βαθμολογίες:** Η αμέσως επόμενη ομάδα, **35-44 (6.00)**, διατήρησε επίσης πολύ υψηλή βαθμολογία.
  3. **Χαμηλότερη Αξιολόγηση (4.81):** Η ομάδα **45+** βαθμολόγησε την εφαρμογή σημαντικά χαμηλότερα από όλες τις άλλες ομάδες, υποδεικνύοντας ότι τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής ίσως ταιριάζουν λιγότερο στις ανάγκες ή τις προσδοκίες αυτής της ηλικιακής ομάδας.

**Συμπέρασμα:** Υπάρχει μια τάση όπου οι ενδιάμεσες ηλικίες (25-44) έχουν την πιο θετική συνολική άποψη για την εφαρμογή.

- Συσχέτιση με το **Επίπεδο Σπουδών**
  1. **Κορυφαία Αξιολόγηση (6.06):** Οι χρήστες με **Μεταπτυχιακό** έδωσαν τον υψηλότερο μέσο όρο αξιολόγησης, ακολουθούμενοι από τους κατόχους πτυχίου **ΑΕΙ/ΤΕΙ** (5.64).
  2. **Χαμηλότερη Αξιολόγηση (4.75):** Οι χρήστες με εκπαίδευση **ΙΕΚ** έδωσαν τη χαμηλότερη βαθμολογία, παρόμοια με την τάση που παρατηρήθηκε στην ομάδα 45+.
  3. **Τάση:** Η συνολική αξιολόγηση της εφαρμογής φαίνεται να αυξάνεται όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο σπουδών του συμμετέχοντα.
- Συσχέτιση με το **Φύλο** και την **Προηγούμενη Εμπειρία**
  1. **Φύλο:** Οι **Γυναίκες** έδωσαν ελαφρώς υψηλότερο μέσο όρο αξιολόγησης (5.75) σε σχέση με τους **Ανδρες** (5.46).
  2. **Προηγούμενη Εμπειρία:** Η προηγούμενη εμπειρία με παρόμοιες εφαρμογές δεν φαίνεται να αποτελεί καθοριστικό παράγοντα. Όλες οι ομάδες (Ναι, συχνά / Ναι, περιστασιακά / Όχι, ποτέ) έχουν παρόμοιους μέσους όρους (περίπου 5.60), υποδηλώνοντας ότι η εφαρμογή αξιολογήθηκε θετικά ανεξάρτητα από την εξοικείωση των χρηστών με αυτό το είδος τεχνολογίας.

## 9.6.2 Συσχετίσεις με Κατηγορικές Επιλογές (Φίλτρα, Passband, Real-Time)

### A. Καλύτερο Φίλτρο Δόνησης

Δημογραφικό	A-weight	C-weight	Flat	Z-weight	Δεν παρατήρησα διαφορά
Φύλο (Γυναίκα)	64.3%	7.1%	14.3%	7.1%	7.1%
Φύλο (Ανδρας)	41.2%	17.6%	11.8%	11.8%	17.6%
Ηλικία (18-24)	63.6%	18.2%	13.6%	0.0%	4.5%
Ηλικία (25-34)	0.0%	0.0%	16.7%	50.0%	33.3%
Εκπαίδευση (Μεταπτυχιακό)	0.0%	0.0%	50.0%	50.0%	0.0%
Προηγ. Εμπειρία (Περιστασιακά)	72.7%	0.0%	18.2%	9.1%	0.0%

Εικόνα 9.27 Πίνακας Συσχετίσεων 2

### Βασικά Συμπεράσματα (Φίλτρο):

1. **Φύλο/Ηλικία:** Οι **Γυναίκες** και η ομάδα 18-24 προτίμησαν συντριπτικά το **A-weight** ως καλύτερο φίλτρο.
2. **Ηλικία/Εκπαίδευση:** Οι ομάδες 25-34 και οι χρήστες με **Μεταπτυχιακό** έδειξαν μια σαφή προτίμηση στα φίλτρα **Z-weight** και **Flat**, με το 50% της κάθε ομάδας να το επιλέγει. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τον γενικό πληθυσμό του δείγματος που προτίμησε το A-weight.

## B. Passband (Άνεση/Ευχαρίστηση/Καθαρός Ρυθμός)

Λόγω του μεγάλου αριθμού διαφορετικών επιλογών passband, η ανάλυση βασίζεται στην κατανομή συχνοτήτων (ποσοστά) των επιλογών σε κάθε δημογραφική ομάδα.

Δημογραφικό	Ομάδα	Πιο Άνετο Passband (Ένταση)	Πιο Ευχάριστο Passband	Πιο Καθαρός Ρυθμός Passband
Φύλο	Άνδρας	30-300 (17.6%)	30-300 (18.8%)	30-300 (17.6%)
	Γυναίκα	25-400 (21.4%)	25-400 (23.1%)	25-400 (21.4%)
Ηλικία	18-24	30-300 (18.2%)	30-300 (13.6%)	30-300 (18.2%)
	25-34	30-300 (33.3%)	30-300 (33.3%)	30-300 (33.3%)
	35-44	30-300 (100.0%)	30-300 (100.0%)	30-300 (100.0%)
	45+	30-300 (50.0%)	30-300 (50.0%)	30-300 (50.0%)
Εκπαίδευση	ΑΕΙ/ΤΕΙ	30-300 (23.8%)	30-300 (19.0%)	30-300 (23.8%)
	ΙΕΚ	20-250 (100.0%)	20-250 (100.0%)	20-250 (100.0%)
	Λύκειο	30-300 (42.9%)	30-300 (33.3%)	30-300 (42.9%)
	Μεταπτυχιακό	25-400 (50.0%)	25-400 (50.0%)	25-400 (50.0%)
Προηγ. Εμπειρία	Όχι, ποτέ	30-300 (21.1%)	30-300 (15.8%)	30-300 (21.1%)
	Ναι, περιστασιακά	25-400 (27.3%)	25-400 (27.3%)	25-400 (27.3%)
	Ναι, συχνά	25-400 (50.0%)	25-400 (50.0%)	25-400 (50.0%)

Εικόνα 9.28 Πίνακας Συσχετίσεων 3

Η ανάλυση δείχνει ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ των δημογραφικών στοιχείων και της επιλογής του βέλτιστου Passband, με το 30-300 να είναι η συνολικά κυρίαρχη επιλογή στο δείγμα.

### 1. Συσχέτιση με το Φύλο

- **Γυναίκες & Άνδρες:** Υπάρχει σαφής διαφορά στις προτιμήσεις. Οι **Άνδρες** είχαν ως επικρατέστερη επιλογή το φάσμα **30-300** και στις τρεις ερωτήσεις. Αντίθετα, οι **Γυναίκες** είχαν ως επικρατέστερο το φάσμα **25-400**, δηλαδή ένα ελαφρώς ευρύτερο και υψηλότερο φάσμα συχνοτήτων.

### 2. Συσχέτιση με την Ηλικία

- **Απόλυτη Συσχέτιση (35-44):** Η ηλικιακή ομάδα **35-44** είχε μια απόλυτη προτίμηση (**100%**) στο φάσμα **30-300** και για τις τρεις κατηγορίες (Άνεση, Ευχαρίστηση, Καθαρός Ρυθμός).
- **Γενική Τάση:** Όλες οι ηλικιακές ομάδες, με εξαίρεση τις επιμέρους επιλογές, είχαν ως κυρίαρχη επιλογή το **30-300**.

### 3. Συσχέτιση με το Επίπεδο Σπουδών

- **Ισχυρές Προτιμήσεις:**
  - Οι χρήστες με εκπαίδευση **Λυκείου** έδειξαν την ισχυρότερη προτίμηση στο **30-300** (42.9% στην Άνεση/Ρυθμό).
  - Οι χρήστες με **Μεταπτυχιακό** έδειξαν την ισχυρότερη προτίμηση στο **25-400** (50.0%), αποφεύγοντας το 30-300 ως την πιο συχνή τους επιλογή.
- **Αποκλίνουσα Επιλογή (ΙΕΚ):** Η ομάδα **ΙΕΚ** είχε μια μοναδική προτίμηση στο στενότερο φάσμα **20-250** (100.0%), υποδηλώνοντας ίσως διαφορετική ευαισθησία ή εστίαση σε χαμηλότερες συχνότητες.

#### 4. Συσχέτιση με την Προηγούμενη Εμπειρία

- **Χωρίς Εμπειρία:** Οι χρήστες που απάντησαν "**Όχι, ποτέ**" είχαν ως επικρατέστερη επιλογή το **30-300**.
- **Με Εμπειρία:** Οι χρήστες με **περιστασιακή ή συχνή** εμπειρία έδειξαν μια σαφή στροφή προς το φάσμα **25-400** ως το πιο άνετο, ευχάριστο και καθαρό σε ρυθμό.

**Συμπερασματική Τάση:** Οι χρήστες με **Μεταπτυχιακό** και όσοι είχαν **προηγούμενη εμπειρία** με παρόμοιες εφαρμογές τείνουν να προτιμούν το ελαφρώς ευρύτερο και υψηλότερο φάσμα **25-400**, ενώ οι απόφοιτοι **Λυκείου και άνδρες** προτιμούν το **30-300**.

#### Βασικά Συμπεράσματα (Passband):

1. **Ηλικία/Εκπαίδευση & Passband 30-300:** Υπάρχει μια ισχυρή συσχέτιση (ίσως λόγω μικρού δείγματος) μεταξύ της ομάδας 45+ και των χρηστών με εκπαίδευση Λυκείου με το Passband 30-300, το οποίο επέλεξαν ως το πλέον άνετο, ευχάριστο και καθαρό σε ρυθμό.
2. **Εκπαίδευση (Μεταπτυχιακό):** Η ομάδα με Μεταπτυχιακό παρουσίασε τελείως διαφορετικές προτιμήσεις, επιλέγοντας πιο περιορισμένα ή υψηλότερα passbands (π.χ. 20-270, 25-400), αποφεύγοντας το 30-300.

#### Γ. Μέσοι όροι αξιολόγησης Real-Time λειτουργίας (Κλίμακα 1-5)

Δημογραφικό	Ομάδα	RT_Ευκολία	RT_Χρονική_Ταύτιση	RT_Χρησιμότητα
<b>Φύλο</b>	Ανδρας	4.53	4.00	4.18
	Γυναίκα	4.21	<b>4.07</b>	<b>4.43</b>
<b>Ηλικία</b>	18-24	4.36	4.00	4.23
	25-34	<b>4.83</b>	4.00	4.67
	35-44	4.00	<b>5.00</b>	<b>5.00</b>
	45+	3.50	4.00	3.50
<b>Εκπαίδευση</b>	ΑΕΙ/ΤΕΙ	4.33	4.05	4.33
	ΙΕΚ	4.00	<b>2.00</b>	<b>2.00</b>
	Λύκειο	4.43	4.29	4.29
	Μεταπτυχιακό	<b>5.00</b>	4.00	<b>5.00</b>
<b>Προηγ. Εμπειρία</b>	Όχι, ποτέ	4.37	3.89	4.11
	Ναι, περιστασιακά	4.36	<b>4.27</b>	4.55
	Ναι, συχνά	<b>5.00</b>	4.00	<b>5.00</b>

Εικόνα 9.29 Πίνακας Συσχετίσεων 4

#### Βασικά Συμπεράσματα (αξιολόγησης Real-Time λειτουργίας):

- **Ηλικία:**
  1. Η ηλικιακή ομάδα **35-44** ξεχώρισε δίνοντας την άριστη βαθμολογία (5.00) τόσο στη χρονική ταύτιση όσο και στη γενική χρησιμότητα, υποδηλώνοντας την καλύτερη συνολική εμπειρία από όλες τις ομάδες.
  2. Η ηλικιακή ομάδα **25-34** αξιολόγησε την ευκολία χρήσης με τον υψηλότερο μέσο όρο (4.83) μαζί με τους χρήστες μεταπτυχιακού και συχνής προηγούμενης εμπειρίας.
  3. Η ηλικιακή ομάδα **45+** έδωσε τις χαμηλότερες βαθμολογίες στη λειτουργία (3.50).

- **Εκπαίδευση & Εμπειρία**

1. Οι χρήστες με **Μεταπτυχιακό** και αυτοί με συχνή προηγούμενη εμπειρία έδωσαν άριστη βαθμολογία (5.00) στην ευκολία και τη χρησιμότητα, δείχνοντας ότι είτε η υψηλή εκπαίδευση είτε η εξοικείωση με παρόμοιες εφαρμογές οδηγεί σε πιο θετική αξιολόγηση.
2. Η χρήστες με πτυχίο **ΙΕΚ** βαθμολόγησαν χαμηλότερα τη χρονική ταύτιση (2.00) και τη χρησιμότητα (2.00), κάτι που υποδηλώνει ότι η εφαρμογή δεν λειτούργησε αποτελεσματικά για αυτούς τους χρήστες.

- **Φύλο**

Οι **Γυναίκες** αξιολόγησαν τη γενική χρησιμότητα ελαφρώς υψηλότερα (4.43) από τους **άνδρες** (4.18), ενώ οι Άνδρες βρήκαν τη λειτουργία ελαφρώς πιο εύκολη χρήση (4.53).

#### Δ. Επαναχρησιμοποίηση Real-Time Λειτουργίας

Δημογραφικό	Όχι	Δεν είμαι σίγουρος/η	Ναι
Φύλο (Γυναίκα)	0.0%	0.0%	100.0%
Φύλο (Άνδρας)	5.9%	17.6%	76.5%
Ηλικία (18-24)	0.0%	9.1%	90.9%
Ηλικία (25-34)	16.7%	16.7%	66.7%
Εκπαίδευση (ΑΕΙ/ΤΕΙ)	4.8%	9.5%	85.7%
Εκπαίδευση (ΙΕΚ)	0.0%	100.0%	0.0%
Προηγ. Εμπειρία (Όχι, ποτέ)	5.3%	15.8%	78.9%

Εικόνα 9.30 Πίνακας Συσχετίσεων 5

#### Βασικά Συμπεράσματα (Real-Time Επαναχρησιμοποίηση):

1. **Φύλο/Ηλικία/Εκπαίδευση:** Οι Γυναίκες, η ηλικιακή ομάδα 35-44 (100% Ναι) και οι χρήστες με Λύκειο/Μεταπτυχιακό δηλώνουν 100% πρόθεση για επαναχρησιμοποίηση της λειτουργίας.
2. **Ηλικία/Εκπαίδευση:** Η ηλικιακή ομάδα 25-34 (16.7% Όχι/16.7% Ίσως) και η ομάδα αποφοίτων ΙΕΚ (100% Δεν είμαι σίγουρος/η - λόγω μικρού δείγματος) ήταν οι πιο επιφυλακτικές ομάδες ως προς την επαναχρησιμοποίηση, παρόλο που η ομάδα 25-34 είχε υψηλή βαθμολογία ευκολίας. Αυτό υποδηλώνει ότι η ευκολία δεν μεταφράζεται απαραίτητα σε χρησιμότητα για αυτή την ομάδα.

## Κεφάλαιο 10ο: Συζήτηση

### 10.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων σε σχέση με βιβλιογραφία

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει μια ερμηνευτική ανάγνωση της αξιολόγησης, εστιάζοντας σε στοιχεία που επηρεάζουν άμεσα το αίσθημα ελέγχου και κατανόησης του χρήστη: φίλτρα, passband και real-time λειτουργία από μικρόφωνο. Ειδικό βάρος δίνεται στις επιλογές φίλτρων και passband, καθώς και στη ζωντανή λειτουργία μέσω μικροφώνου, όπου η χρηστικότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον συγχρονισμό. Σε συμφωνία με προηγούμενες μελέτες, τονίζεται ότι η αποτελεσματικότητα τέτοιων συστημάτων δεν κρίνεται μόνο από την τεχνική υλοποίηση, αλλά και από τον τρόπο χαρτογράφησης των μουσικών χαρακτηριστικών, την αντιληπτική άνεση και τη σταθερότητα συγχρονισμού σε πραγματικό χρόνο.

#### 10.1.1 Ρυθμός ως “πυρήνας” της απτικής μουσικής

Από τα δεδομένα της παρούσας αξιολόγησης—ιδίως από τα ποιοτικά σχόλια—φαίνεται ότι οι συμμετέχοντες έκριναν την απτική απόδοση με βάση το πόσο καθαρά γίνονται αντιληπτά ο ρυθμός/η μελωδία και κατά πόσο η δόνηση μοιάζει «σωστή» για αυτό που ακούγεται. Αυτό συμβαδίζει με τη βιβλιογραφία, στην οποία ο ρυθμός χαρακτηρίζεται συχνά ως το πιο άμεσα αποδιδόμενο μουσικό στοιχείο στο απτικό κανάλι, ενώ πιο σύνθετα χαρακτηριστικά (όπως timbre ή μελωδία) εμφανίζουν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε επεξεργασία/παραμετροποίηση. Παράλληλα, αναφέρεται ότι φίλτρα και ισοστάθμιση μπορούν να τονίσουν πληροφορία που μεταφέρει το beat, αλλά ενδέχεται να επιφέρουν αλλαγές στην ποιότητα ή/και στη φυσικότητα της απτικής αίσθησης.

Η παραπάνω παρατήρηση ευθυγραμμίζεται με προηγούμενα συμπεράσματα από οπτικο-απτικά συστήματα για κωφούς/βαρήκοους, όπου έχει διατυπωθεί ρητά ότι η μουσική αναπαράσταση θα πρέπει να προσεγγίζει το πρωτότυπο όσο το δυνατόν περισσότερο, αποφεύγοντας υπερβολικές μετατροπές του σήματος πό αυτή τη γραμμή ερμηνείας, το A-weight μπορεί να αποδοθεί ως «λειτουργικό» κέρδος σε clarity, ενώ το Flat ως baseline/ουδέτερη αναφορά για άμεση αντιστοίχιση με το αρχικό σήμα. Έτσι, το A-weight μπορεί να θεωρηθεί ότι ενισχύει την αναγνωσιμότητα της απτικής πληροφορίας, ενώ το Flat παραμένει ισχυρή ουδέτερη επιλογή αναφοράς.[14]

#### 10.1.2 Επιλογή φίλτρου δόνησης (A-weight vs Flat κ.ά.)

Ως προς την επιλογή φίλτρου, το A-weight συγκεντρώνει την υψηλότερη προτίμηση (51,6%), ενώ 12,9% δεν αναφέρει σαφή διαφοροποίηση ανάμεσα στις διαθέσιμες ρυθμίσεις. Σε επίπεδο ποιοτικής διερεύνησης, το A-weight φαίνεται να συσχετίζεται με αίσθηση αυξημένης σαφήνειας και καλύτερης μελωδικής αντιστοίχισης, στοιχείο που ερμηνεύεται ως ενίσχυση της «αναγνωσιμότητας» της δόνησης. Παράλληλα, η θετική αποτίμηση της απουσίας φίλτρου (Flat) προκύπτει κυρίως όταν η αξιολόγηση βασίζεται στη φυσικότητα της απτικής αναπαράστασης και στην ελάχιστη απόκλιση από το αρχικό ακουστικό ερέθισμα.

Το μοτίβο αυτό σχετίζεται με ευρήματα προηγούμενων μελετών σε haptic chairs/οπτικο-απτικά συστήματα, όπου οι συμμετέχοντες προτιμούν λύσεις που “μένουν κοντά στο πρωτότυπο” και δεν αλλοιώνουν υπερβολικά το μουσικό υλικό, ειδικά όταν ο στόχος είναι η μουσική εμπειρία και όχι η τεχνική επίδειξη ενός mapping. Έτσι, μπορεί να ερμηνευθεί ότι το A-weight πιθανόν έδωσε λειτουργικό πλεονέκτημα ως προς την “αναγνωσιμότητα” της δόνησης (clarity), ενώ το Flat διατηρεί πλεονέκτημα ως baseline/ουδέτερη επιλογή όταν ο χρήστης θέλει πιο “άμεση” αντιστοίχιση με το αρχικό σήμα.[17]

#### 10.1.3 Passband και αντιληπτική άνεση

Στην αξιολόγηση άνεσης για παρατεταμένη χρήση, το passband 30–300 εμφανίζεται ως η επικρατέστερη επιλογή (19,4%), παρά το γεγονός ότι συνολικά παρατηρείται έντονη ετερογένεια στις προτιμήσεις. Παράλληλα, η μεγάλη διασπορά στις επιλογές υποδηλώνει ότι οι κρίσεις άνεσης και κόπωσης δεν συγκλίνουν σε μία σαφή προτίμηση, αλλά εξαρτώνται έντονα από την υποκειμενική εμπειρία. Το εύρημα είναι συμβατό με τη βιβλιογραφική θέση ότι η απτική πρόσληψη δονήσεων μεταβάλλεται με βάση τη συχνότητα και την ένταση του ερεθίσματος, αλλά και με βάση τη θέση εφαρμογής, όπου τα κατώφλια αντίληψης και η ευαισθησία διαφέρουν σημαντικά. Σε αυτό το πλαίσιο, η επιλογή 30–

300 μπορεί να ερμηνευθεί ως συμβιβασμός που αποφεύγει «βαριές» χαμηλές συνιστώσες, ενώ ταυτόχρονα περιορίζει την εξάρτηση από υψηλές συνιστώσες που μπορεί να μην προσλαμβάνονται εξίσου καθαρά μέσω αφής.[14]

#### 10.1.4 Real-time μικρόφωνο: χρηστικότητα, συγχρονισμός, πρόθεση χρήσης

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η real-time λειτουργία μέσω μικροφώνου έγινε δεκτή ιδιαίτερα θετικά: 90,3% των αξιολογήσεων κινήθηκε στις τιμές 4–5 για την ευκολία χρήσης και 87,1% στις τιμές 4–5 για τη γενική χρησιμότητα. Ο συγχρονισμός δόνησης-ήχου αποτιμήθηκε επίσης υψηλά (80,6% σε 4–5), ενώ η πρόθεση επαναχρήσης στην καθημερινότητα καταγράφηκε στο 87,1% («Ναι»). Οι προτάσεις βελτίωσης συγκεντρώνονται στην ανάγκη μεγαλύτερης σαφήνειας/οδηγιών για τα βήματα λειτουργίας και στην ανάγκη περιορισμού της καθυστέρησης, δηλαδή σε ζητήματα latency και επαρκούς feedback για το αν/πότε γίνεται καταγραφή ή αναπαραγωγή.

Η βιβλιογραφία τονίζει ότι, όταν το μικρόφωνο χρησιμοποιείται ως είσοδος σε haptic music players, η χρονική παράμετρος (onset/asynchrony) και η αίσθηση αιτιακής αντιστοίχισης με το ηχητικό γεγονός είναι κομβικής σημασίας. Επομένως, τα ευρήματα μπορούν να αναγνωστούν ως ένδειξη υψηλής αξίας της λειτουργίας, αλλά και ως υπόδειξη ότι οι βασικές βελτιώσεις θα προκύψουν από μείωση latency/σταθερότητα και από καθαρή καθοδήγηση για το βρίσκεται σε λειτουργία.[14]

#### 10.1.5 Εξατομίκευση και “νοηματοδότηση” του mapping

Το γεγονός ότι ένας αριθμός χρηστών δεν αναγνωρίζει σαφείς διαφορές μεταξύ επιλογών, ενώ άλλοι αξιολογούν διαφορετικά την «ευκρίνεια» έναντι της «φυσικότητας», αναδεικνύει ότι η εμπειρία είναι ισχυρά εξατομικευμένη και δεν εξαντλείται σε μία γενική προεπιλογή. Μελέτες στον χώρο της cross-modal μουσικής προσβασιμότητας για DHH επισημαίνουν ότι η εξοικείωσης, ως διαδικασία κατανόησης/εσωτερίκευσης των αντιστοιχίσεων, λειτουργεί ως προϋπόθεση ώστε οι αναπαραστάσεις να αποκτήσουν μουσικό νόημα και να αποφευχθεί η αίσθηση «απλών ερεθισμάτων». Επιπλέον, η παραμετροποίηση υποστηρίζεται ως βασική στρατηγική, δεδομένου ότι οι αισθητηριακές προτιμήσεις και ευαισθησίες διαφοροποιούνται σημαντικά και επηρεάζουν την αποδοχή. Με βάση αυτό, η παρούσα αξιολόγηση στηρίζει την υλοποίηση presets με απλές, κατανοητές περιγραφές και την παροχή στοιχειώδους εξατομίκευσης, όπως έλεγχος έντασης, ευαισθησίας και latency tuning.[20]

#### 10.1.6 Ενοποιημένη ερμηνεία

Οι απαντήσεις των συμμετεχόντων υποδεικνύουν ότι τόσο οι ρυθμίσεις φίλτρου όσο και οι επιλογές passband δεν οδηγούν σε μοναδική, καθολικά προτιμητέα παραμετροποίηση, αλλά χαρακτηρίζονται από μερική συγκέντρωση προτιμήσεων και ταυτόχρονη έντονη διατομική μεταβλητότητα. Το γεγονός αυτό είναι συνεπές με τα πορίσματα της βιβλιογραφίας, όπου η απτική αντίληψη περιγράφεται ως πολυπαραγοντική.

- Η έντονη παρουσία επιλογών τύπου A-weight/Flat στις απαντήσεις μπορεί να ερμηνευθεί ως αναζήτηση ισορροπίας ανάμεσα σε “καθαρότητα” (πιο εύκολα αντιληπτά χαρακτηριστικά) και “φυσικότητα” (ελάχιστη αλλοίωση του σήματος), κάτι που έχει αναφερθεί ως σημαντικό κριτήριο σε συστήματα haptic chair/οπτικο-απτικής ενίσχυσης για άτομα με απώλεια ακοής. [14]
- Η συχνή εμφάνιση passband με άνω όριο γύρω στις λίγες εκατοντάδες Hz (π.χ. 250–450 Hz σε αρκετές καταγραφές) είναι συμβατή με προτάσεις της βιβλιογραφίας ότι μια “πρακτική” ζώνη υψηλής ευαισθησίας/αντιληπτότητας του απτικού καναλιού βρίσκεται σε μεσαίες συχνότητες (με κορυφώσεις κοντά σε ~250 Hz και προτεινόμενα εύρη όπως 50–500 Hz, ανάλογα με σώμα/ένταση).[14]

#### 10.1.7 Real-time (μικρόφωνο) ως κριτήριο εμπειρίας

Η ρητή εμφάνιση της real-time/Live χρήσης στις απαντήσεις δείχνει ότι οι συμμετέχοντες αντιμετωπίζουν την εφαρμογή ως εργαλείο λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, πέρα από το σενάριο αναπαραγωγής αρχείων. Στη σχετική βιβλιογραφία, το μικρόφωνο εμφανίζεται ως input transducer που επιτρέπει την απόκτηση ambient ήχου και την άμεση μετατροπή του σε απτικό σήμα. Όταν ο μετασχηματισμός εκτελείται σε πραγματικό χρόνο, ο χρονικός συγχρονισμός μεταξύ ηχητικού και απτικού καναλιού αναδεικνύεται σε βασικό κριτήριο, καθώς το απτικό ερέθισμα προσφέρεται ως ταυτόχρονη αναπαράσταση του ακουστικού περιεχομένου.

Παράλληλα, οι επιλογές παραμετροποίησης (φίλτρα, passband) σε live σενάρια υποδηλώνουν σχεδιασμό που επιτρέπει προσαρμογή του mapping για βελτιωμένη αντιληπτική αντιστοίχιση, αντί για μία σταθερή και υποχρεωτική χαρτογράφηση. Η σχετική τεχνολογία frequency warping προτείνει ακριβώς αυτό: μετατόπιση των συχνοτήτων του audio ώστε το haptic να «ταιριάζει» αντιληπτικά με το audio, ακόμη και όταν οι δύο αισθητηριακές οδοί δεν ευθυγραμμίζονται σε φυσικό επίπεδο συχνοτήτων.[18]

## 10.2 Επιπτώσεις για προσβασιμότητα και εμπειρία μουσικής σε DHH άτομα (εκτεταμένη ανάπτυξη)

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 9 απαιτεί σύνδεση με την προσβασιμότητα και με τις πραγματικές συνθήκες εμπειρίας μουσικής για Deaf και Hard-of-Hearing άτομα. Η βιβλιογραφία υποστηρίζει ότι η «μουσική εμπειρία» περιλαμβάνει αντιληπτικές και χρονικές δομές (ρυθμός/ένταση), γνωστικές προσδοκίες, συναισθηματική απόκριση και κοινωνική διάδραση, άρα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ως απλή πληροφοριακή αναπαράσταση. Συνεπώς, τα αποτελέσματα οφείλουν να διαβαστούν ως δείκτες του βαθμού με τον οποίο η πολυαισθητηριακή υποστήριξη (οπτική/απτική) μπορεί να λειτουργήσει ως μηχανισμός μείωσης φραγμών και ενίσχυσης της μουσικής συμμετοχής, πέρα από την «ορθή λειτουργία» του τεχνικού συστήματος.[20][17][14]

Η βιβλιογραφία για Haptic Music Players (HMPs) και γενικότερα για πολυαισθητηριακές προσεγγίσεις πρόσβασης στη μουσική δείχνει ότι η επιτυχία μιας λύσης εξαρτάται τόσο από τους φυσιολογικούς/ψυχοφυσικούς περιορισμούς της απτικής αντίληψης (π.χ. εύρος συχνοτήτων, κατώφλια, χωρική/χρονική ανάλυση) όσο και από ζητήματα σχεδίασης διεπαφής, εκμάθησης και εξατομίκευσης. Κατ' επέκταση, ένα σύστημα μπορεί να είναι σωστό ως προς το mapping δονήσεων και οπτικών μεταφορών, αλλά να αποτυγχάνει ως προς τη βιωματική «μουσικότητα» και τη συγκρότηση νοήματος. Επομένως, οι επιπτώσεις των ευρημάτων είναι σκόπιμο να αξιολογηθούν σε τρία επίπεδα προσβασιμότητας: (α) πρόσβαση (availability), (β) νοηματοδότηση (meaning-making), (γ) ποιότητα εμπειρίας (enjoyment, βιωσιμότητα χρήσης, κοινωνική συμμετοχή).[20][17][14]

### 10.2.1 Προσβασιμότητα ως “πρόσβαση” (availability)

Το πρώτο επίπεδο επίπτωσης αφορά το κατά πόσο το σύστημα αυξάνει έμπρακτα την πρόσβαση στη μουσική για DHH άτομα, δηλαδή αν καθιστά «περισσότερη μουσική» διαθέσιμη σε περισσότερα περιβάλλοντα και περιστάσεις, χωρίς προϋπόθεση ειδικά επιμελημένου υλικού. Η κυριαρχία οπτικών στρατηγικών (υπότιτλοι/lyric/sign-language/dance videos) δείχνει μια υφιστάμενη οδό πρόσβασης, αλλά αυτή παραμένει εξαρτημένη από το αν το περιεχόμενο έχει ήδη μετασηματιστεί οπτικά και συχνά δεν μεταφέρει αποτελεσματικά ρυθμική και δυναμική πληροφορία. Αντίθετα, η δυνατότητα αυτόματης μετατροπής οποιουδήποτε μουσικού σήματος σε απτική και οπτική αναπαράσταση συνιστά θεωρητικά λύση καθολικής πρόσβασης, αφού υποκαθιστά την ανάγκη ειδικής επιμέλειας περιεχομένου με μια επαναχρησιμοποιήσιμη τεχνολογική υποδομή.[20][14]

Στη σχετική έρευνα, οι HMPs συγκροτούνται ως αλυσίδα εισόδου-επεξεργασίας-εξόδου: (α) λήψη audio (αρχείο ή μικρόφωνο), (β) εξαγωγή/μετασηματισμός χαρακτηριστικών και χαρτογράφηση σε απτικές/οπτικές παραμέτρους και (γ) διέγερση απτικών μετατροπέων για απόδοση vibrotactile πληροφορίας. Η δυνατότητα λήψης από μικρόφωνο, ή γενικότερα η real-time ροή εισόδου, ενισχύει την προσβασιμότητα επειδή επιτρέπει σύνδεση με ζωντανές μουσικής (τηλεόραση, συναυλίες, δημόσιες εκδηλώσεις) αντί να περιορίζεται σε επιλεγμένη δισκοθήκη. Με αυτόν τον τρόπο, η προσβασιμότητα αποκτά κοινωνική διάσταση, καθώς διευκολύνει συμμετοχή σε συλλογικά πλαίσια όπου η μουσική είναι μέρος της αλληλεπίδρασης και της κοινής εμπειρίας.[17][14]

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης, τα ευρήματα μπορούν να ερμηνευτούν ως αποδείξεις σταθερότητας και επαναληψιμότητας της απτικής απόδοσης, δηλαδή ως ένδειξη ότι η προσβασιμότητα δεν προκύπτει συγκυριακά. Μια τέτοια ανάγνωση είναι συμβατή τόσο με την τυπική αρχιτεκτονική HMP (audio είσοδος → επεξεργασία → actuators) όσο και με ευρήματα προηγούμενων αξιολογήσεων όπου η θετική εμπειρία διατηρήθηκε σε παρατεταμένη χρήση.[17][14]

### 10.2.2 Προσβασιμότητα ως “κατανόηση” και νοηματοδότηση (meaning-making)

Στο πλαίσιο του δεύτερου επιπέδου επίπτωσης, κρίσιμο είναι αν το σύστημα μετατρέπει την πολυαισθητηριακή έξοδο σε μουσικό νόημα για τον χρήστη, αντί για μια απλή «παρουσίαση ερεθισμάτων». Σύμφωνα με το CHI'24, τα έντονα visuals και οι ισχυρές δονήσεις δεν γίνονται κατ' ανάγκην αντιληπτά ως μουσική, όταν δεν υπάρχει ένα συνεπές

mapping που ο χρήστης έχει ήδη εσωτερικεύσει ή μπορεί να κατακτήσει. Συνεπώς, ο σχεδιασμός δεν πρέπει να προϋποθέτει ότι ένας εντυπωσιακός visualizer ή μια δυνατή δόνηση παράγουν αυτομάτως μουσικό νόημα, διότι χωρίς αντιληπτή σχέση αίτιου-αποτελέσματος μπορεί να προκύψουν εμπειρίες όπως αμηχανία, πλήξη ή ακόμη και απόρριψη του συστήματος.[20]

Στο CHI'24, το *conceptualization* τοποθετείται ως απαραίτητη συνθήκη για να αποκτήσει η οπτικο-απτική αναπαράσταση μουσική σημασία για DHH χρήστες. Αυτό καθιστά εφικτή μια πιο αιτιοκρατική ερμηνεία των αποτελεσμάτων του Κεφαλαίου 9: ένα σύστημα μπορεί να είναι τεχνικά συνεπές, αλλά να μην είναι ερμηνεύσιμο ως μουσική. Το πλαίσιο εισάγει ότι η cross-modal αντιστοίχιση πρέπει να εσωτερικευτεί, και αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενεργής εξερεύνησης (*exploration*) των mappings και μέσω εξατομίκευσης (*customization*) των παραμέτρων της αναπαράστασης. Ως αποτέλεσμα, η cross-modal αντιστοίχιση δεν θεωρείται αυτονόητη, αλλά κάτι που μαθαίνεται και σταθεροποιείται μέσω εμπλοκής. Έτσι, η κατανόηση δεν αποδίδεται σε παθητική έκθεση, αλλά σε σταδιακή εσωτερικήυση του mapping μέχρι να λειτουργεί ως προσωπικό σύστημα αναφοράς («γλώσσα») για μουσική ερμηνεία.[20]

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του Κεφαλαίου 9 ως προς τη μαθησιακή διάσταση μπορεί να συνδεθεί με το ερώτημα αν οι αναπαραστάσεις «κρατούν» σταθερές αντιστοιχίσεις στο χρόνο και σε διαφορετικά ερεθίσματα, διότι αυτό διευκολύνει εσωτερικήυση. Η έμφαση βρίσκεται στη διακρίσιμότητα, συνέπεια και προβλεψιμότητα των οπτικο-απτικών ενδείξεων, στοιχεία που καθιστούν δυνατή την εσωτερικήυση της αντιστοίχισης μέσω *exploration* και *customization*. Άρα, τα αποτελέσματα πρέπει να εξεταστούν ως προς το αν οι οπτικο-απτικές μεταβολές είναι αρκετά «δομημένες» ώστε να γίνονται αντικείμενο μάθησης/εξοικείωσης, και όχι ως προς το αν είναι απλώς εντυπωσιακές.[20][17]

### 10.2.3 Προσβασιμότητα ως ποιότητα εμπειρίας (enjoyment, βιωσιμότητα, συμμετοχή)

Το τρίτο επίπεδο επίπτωσης αφορά το αν, πέρα από την τεχνική πρόσβαση και τη βασική κατανόηση, η εμπειρία παραμένει ευχάριστη, «ουσιαστικά μουσική» και βιώσιμη ως πρακτική χρήση. Στη μελέτη του Haptic Chair, οι συμμετέχοντες με απώλεια ακοής έδειξαν καθαρή προτίμηση προς την απτική έξοδο (μόνη της ή μαζί με οπτικό κανάλι), σε αντίθεση με προσεγγίσεις που στηρίζονται αποκλειστικά σε visuals. Επιπλέον, η διατήρηση της ικανοποίησης μετά από εβδομάδες συνεχούς χρήσης λειτουργεί ως αντίβαρο στην υπόθεση ότι «απλώς τους άρεσε επειδή ήταν καινούριο». Αυτό είναι κεντρικό για μια συζήτηση προσβασιμότητας, διότι χωρίς βιώσιμη ευχαρίστηση η πρόσβαση παραμένει θεωρητική και όχι πρακτικά υιοθετήσιμη.[17][20]

Η ποιότητα εμπειρίας μπορεί να οριστεί ως το σύνολο των χαρακτηριστικών που καθιστούν την υποκατάσταση «μουσικά βιώσιμη»: ρυθμική ώθηση, αίσθηση ενέργειας, κινητική ανταπόκριση και συναισθηματική συμμετοχή. Η προσέγγιση της Haptic Chair μελέτης χρησιμοποίησε έννοιες όπως “flow” με προσαρμοσμένες αυτοαναφορές, ώστε να διερευνηθεί η εμπλοκή/ευχαρίστηση σε κατάσταση ακρόασης. Αυτό ενισχύει το επιχείρημα ότι η ποιότητα εμπειρίας μπορεί να οριστεί λειτουργικά και να αξιολογηθεί εμπειρικά, αντί να συγχέεται με τη «σωστή» παραγωγή ερεθισμάτων.[20][17]

### 10.2.3 Ψυχοφυσικοί περιορισμοί της αφής και συνέπειες για το mapping

Προκειμένου να αποτιμηθούν οι επιπτώσεις των ευρημάτων, απαιτείται να αναγνωριστεί ότι η απτική αντίληψη έχει πεπερασμένο «εύρος ζώνης» σε σύγκριση με το ακουστικό. Στο σχετικό υπόβαθρο αναφέρεται ότι η απτική ευαισθησία έχει διερευνηθεί εκτενώς και ότι, για λόγους ανθρώπινης αντίληψης, πολλά απτικά συστήματα στοχεύουν σε συχνότητες κάτω από περίπου 1000 Hz, με συχνή έμφαση στην περιοχή μέγιστης ευαισθησίας γύρω από 250 Hz. Συνεπώς, δεν μπορεί να αναμένεται πλήρης μεταφορά της ακουστικής πληροφορίας «ως έχει», ιδίως όταν η μουσική πληροφορία εξαρτάται από υψηλοσυχνοτικές συνιστώσες ή λεπτές φασματικές διαφοροποιήσεις που δεν αποδίδονται αποτελεσματικά από το απτικό κανάλι.[17]

Το συμπέρασμα που πρέπει να μεταφερθεί στη συζήτηση των αποτελεσμάτων είναι ότι η απτική αναπαράσταση οφείλει να σχεδιάζεται ως αναγνώσιμο σύστημα σημείων, δηλαδή ως «κώδικας» που ο χρήστης μπορεί να μάθει και να χρησιμοποιήσει πρακτικά, όχι ως γενική ενίσχυση δονήσεων. Στη βιβλιογραφία των HMPs, η διαδικασία modality translation περιγράφεται με σαφή βήματα (key features → mapping/processing → παρουσίαση), ακριβώς επειδή η

αναπαράσταση χρειάζεται σχεδιαστικές αποφάσεις για το τι είναι σημαντικό και πώς θα μετατραπεί σε απτική εμπειρία. Αυτό το σχήμα υποδεικνύει ότι «περισσότερα δεδομένα» δεν ισοδυναμούν με «περισσότερο νόημα», καθώς η ουσία είναι ποια χαρακτηριστικά επιλέγονται και πώς γίνονται αντιληπτά στο νέο κανάλι. Το CHI'24 προσθέτει ότι η εμπειρική επιτυχία ενισχύεται όταν ο χρήστης έχει δυνατότητα exploration και customization, ώστε το mapping να εσωτερικευτεί ως σταθερή γλώσσα αντίληψης και να παραμένει ευχάριστο στη χρήση.[14][20]

Ένα επιχείρημα που ενισχύει τη συζήτηση είναι ότι το απτικό κανάλι δεν «μεταφέρει» απλώς σήμα, αλλά συνθέτει εμπειρία μέσω χωρικής διάταξης και χρονισμού, κάτι που απαιτεί σχεδιαστικές αποφάσεις αντίστοιχες με σύνθεση/ενορχήστρωση. Η χωρική ανάλυση ορίζει τις πόσες ανεξάρτητες τοποθεσίες μπορούν να λειτουργήσουν ως διακριτοί φορείς πληροφορίας, ενώ η τοποθέτηση actuators επηρεάζει την αντιληπτική απόσταση μεταξύ ερεθισμάτων. Επιπρόσθετα, οι χρονικοί χειρισμοί (διάρκεια και onset asynchrony) μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως μηχανισμός αποσαφήνισης (π.χ. διακριτοποίηση γεγονότων) είτε ως μηχανισμός masking (π.χ. όταν πολλά γεγονότα συμπίπτουν). Στη σχετική βιβλιογραφία, η διαφοροποίηση αντίληψης ανά σημείο σώματος και η πολυσημιακή διέγερση αντιμετωπίζονται ως κεντρικά συστατικά σχεδιασμού (όχι ως λεπτομέρειες υλοποίησης). Άρα, είναι εύλογο να κριθεί το σύστημα ως προς το αν η στρατηγική του αποδίδει καθαρές εμπειρίες ή μειώνει τη διαύγεια μέσω υπερ-συγχρονισμού.[14]

#### 10.2.4 Ρυθμός, χρονισμός και συγχρονισμός ως κριτήρια επιτυχίας

Ο ρυθμός θεωρείται συχνά το πλέον άμεσα μεταφέρσιμο μουσικό στοιχείο στο απτικό κανάλι, επειδή μπορεί να κωδικοποιηθεί ως διακριτά γεγονότα (onsets) και παλμικές μεταβολές που ο χρήστης ανιχνεύει σωματικά. Η σαφήνεια των onsets λειτουργεί ως βασικός «φορέας» ρυθμικής πληροφορίας, επειδή επιτρέπει στον χρήστη να οικοδομεί προσδοκίες και να αντιλαμβάνεται παλμό. Αναφορές σε audio-tactile simultaneity στη βιβλιογραφία υποδεικνύουν ότι η αντίληψη υποβαθμίζεται όταν ο συγχρονισμός μεταξύ καναλιών διαρρηγνύεται, επειδή το σύστημα παύει να βιώνεται ως ενιαία αναπαράσταση. Υπό αυτή την οπτική, η χρονική συνοχή συνιστά κριτήριο μουσικότητας επειδή ο παλμός και η πρόβλεψη είναι κεντρικά για την εμπειρία ρυθμού και ροής.[17][14]

Τα ευρήματα της μελέτης Hartic Chair μπορούν να αξιοποιηθούν ως θεωρητικό στήριγμα για την υπόθεση ότι η απτική αναπαράσταση αποκτά αξία όταν επιτρέπει στον χρήστη να οργανώνει την εμπειρία σε «ακολουθίες» και «φράσεις» που θυμίζουν μουσική ροή. Το ίδιο έργο αναφέρει ότι η ικανοποίηση των χρηστών διατηρήθηκε ακόμη και μετά από παρατεταμένη χρήση εβδομάδων, γεγονός που μειώνει την πιθανότητα οι θετικές κρίσεις να οφείλονται αποκλειστικά σε αρχική περιέργεια ή εντυπωσιασμό. Επομένως, ο περιορισμός latency/jitter και η αξιόπιστη παραγωγή παλμών πρέπει να παρουσιαστούν ως πολιτικές προσβασιμότητας στο επίπεδο σχεδιασμού: είναι η υποδομή που κάνει εφικτό τον συγχρονισμό κίνησης (tapping/κίνηση σώματος). Αντίθετα, όταν ο χρονισμός είναι σταθερός και τα ρυθμικά στοιχεία αναπαράγονται με συνέπεια, ο χρήστης μπορεί να συγχρονίσει κίνηση, κάτι που λειτουργεί ως γέφυρα προς κοινωνική συμμετοχή στη μουσική (σε παρέα, σε εκδήλωση, σε χορευτική συνθήκη), ενισχύοντας την προσβασιμότητα με τρόπο που συχνά υπερβαίνει τα στενά τεχνικά metrics.[17][14]

#### 10.2.5 Ένταση, άνεση, κόπωση και ατομικές διαφορές

Η διαχείριση της έντασης στην απτική μουσική αναπαράσταση πρέπει να προσεγγίζεται ως πρόβλημα ισορροπίας: σε χαμηλά επίπεδα έντασης η πληροφορία καθίσταται ασαφής ή μη ανιχνεύσιμη, ενώ σε υψηλά επίπεδα η εμπειρία μπορεί να γίνει κουραστική, ενοχλητική ή να αποσυνδεθεί από την «μουσική» πρόθεση. Η σχετική βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η απτική ευαισθησία μεταβάλλεται με τη συχνότητα και εξαρτάται από το σημείο εφαρμογής στο σώμα, ενώ τα κατώφλια ανιχνεύσης και η αντιληπτή ένταση δεν είναι σταθερά μεταξύ ατόμων ή περιοχών. Κατά συνέπεια, η «σωστή» ένταση οφείλει να οριστεί ως προσαρμοστικό εύρος, το οποίο ρυθμίζεται ανά χρήστη και ανά μουσικό πλαίσιο, ώστε η εμπειρία να παραμένει αναγνώσιμη ως μουσική και όχι να εκτρέπεται σε μηχανιστική διέγερση.[20][14]

Η εργασία “A way for Deaf and Hard of Hearing...” τεκμηριώνει ότι, σε πραγματικές συνθήκες χρήσης, οι DHH χρήστες εμφανίζουν μεγάλες ατομικές διαφοροποιήσεις ως προς την προτιμώμενη ένταση και την αντιληπτική «ευαισθησία» της απτικής ανάδρασης, γεγονός που καθιστά προβληματική οποιαδήποτε υπόθεση ενιαίας ρύθμισης. Η δυνατότητα παραμετροποίησης δεν λειτουργεί μόνο ως εργαλείο άνεσης, αλλά και ως εργαλείο νοηματοδότησης, επειδή επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει συνεκτικές σχέσεις ανάμεσα σε μουσικά γεγονότα και απτικές/οπτικές

ενδείξεις. Η σχετική βιβλιογραφία για audio-tactile rendering ενισχύει το σκεπτικό ότι η απτική απόδοση απαιτεί επιλεκτικές αποφάσεις για το τι μεταφέρεται και πώς παρουσιάζεται, ώστε να είναι αντιληπτό στο απτικό modality. Με βάση αυτά, στη συζήτηση μετά το Κεφάλαιο 9 είναι εύλογο να διατυπωθεί ως σχεδιαστική συνέπεια ότι η τεχνική υλοποίηση χρειάζεται ρυθμίσεις άμεσης προσαρμογής (intensity, sensitivity/thresholds) και πιθανώς εναλλακτικά «προφίλ» που διευκολύνουν γρήγορη μεταβολή ανά μουσικό πλαίσιο. Έτσι μειώνεται το ρίσκο ενός συστήματος που είναι προσβάσιμο μόνο θεωρητικά.[20][14]

### 10.2.6 Επιπτώσεις για UI/UX και πρακτικές επιλογές υλοποίησης

Μια συνεπής πρακτική προέκταση των ευρημάτων του Κεφαλαίου 9 είναι να αντιμετωπιστεί ο σχεδιασμός ως διαδικασία που οργανώνει την εμπειρία μάθησης, και όχι μόνο ως pipeline παραγωγής οπτικο-απτικών ερεθισμάτων. Στο άρθρο “A way for Deaf and Hard of Hearing...”, η ανάγκη conceptualization αναδεικνύει ότι η εμπειρική επιτυχία προκύπτει όταν το mapping γίνεται εκμαθήσιμο και εξατομικεύσιμο, άρα η διεπαφή πρέπει να υποστηρίζει εύκολη δοκιμή εναλλακτικών ρυθμίσεων. Από αυτή τη σκοπιά, τα presets λειτουργούν ως «χαμηλού κόστους» είσοδος στην εξατομίκευση, επιτρέποντας στον χρήστη να εναλλάσσει συνολικά στυλ αντιστοίχισης χωρίς να χρειάζεται να χειριστεί κάθε τεχνική παράμετρο ξεχωριστά. Επίσης, το review για audio-tactile rendering υπογραμμίζει ότι η απτική αντίληψη επηρεάζεται από amplitude, συχνότητα και θέση στο σώμα, γεγονός που επιβάλλει άμεση πρόσβαση σε ρυθμίσεις έντασης/ευαισθησίας και όχι «κρυμμένα» μενού ρυθμίσεων.[20][14]

Η απτική σχεδίαση πρέπει να αντιμετωπίζεται ως χωρική κατανομή πληροφορίας πάνω στο σώμα και όχι ως μονοδιάστατη παράμετρος «έντασης», διότι η ίδια δόνηση μπορεί να γίνεται αντιληπτή διαφορετικά σε διαφορετικά σημεία και με διαφορετική μηχανική μετάδοση. Ως αποτέλεσμα, έχουν προταθεί συσκευές και διατάξεις που οργανώνουν την απτική αναπαράσταση χωρικά, όπως καρέκλες/καθίσματα με πολλαπλά σημεία διέγερσης, ώστε η πληροφορία να κατανέμεται αντί να «συμπιέζεται» σε ένα μόνο σημείο. Η Haptic Chair αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της προσέγγισης, όπου η απτική αναπαράσταση ενσωματώνεται σε κάθισμα ώστε να εμπλέκονται διαφορετικές περιοχές σώματος και να δημιουργείται αίσθηση «ολόσωμης» μουσικής. Επομένως, είναι σκόπιμο να τεθεί ως πρακτική κατευθυντήρια αρχή ότι τα «αποτελεσματικότερα» σημεία/διεγέρτες (σύμφωνα με τα δεδομένα σου) πρέπει να γίνουν σχεδιαστική προτεραιότητα: καθαρότερο κανάλι ρυθμού, πιο προσεκτική κατανομή έντασης, και πιο ξεκάθαρη οργάνωση του τι πληροφορία φέρει κάθε σημείο, ώστε η συνολική εμπειρία να γίνεται πιο αναγνώσιμη και ευχάριστη.[14][17]

### 10.2.7 Κοινωνική και πολιτισμική διάσταση της προσβασιμότητας

Η προσβασιμότητα στη μουσική μπορεί να οριστεί πιο απαιτητικά από μια απλή τεχνική «μετατροπή» ή από την παροχή πληροφορίας, καθώς περιλαμβάνει το αν ένα DHH άτομο μπορεί να συμμετέχει σε κοινές εμπειρίες (παρέες, εκδηλώσεις, χώρους ακρόασης) με τρόπο που να έχει προσωπικό και κοινωνικό νόημα. Η Haptic Chair μελέτη δείχνει ότι οι χρήστες προτίμησαν την απτική εμπειρία και ότι η ικανοποίηση μπορεί να διατηρείται για εβδομάδες, κάτι που υποδηλώνει πως η απτική αναπαράσταση μπορεί να γίνει σταθερή βάση εμπλοκής και όχι ευκαιριακή τεχνική δοκιμή. Η κοινωνική διάσταση ενισχύεται όταν ο χρήστης μπορεί να βασίζεται σε σταθερό απτικό στήριγμα για να «ακολουθεί» τη ροή και να νιώθει ότι συμμετέχει, αντί να βρίσκεται σε θέση παρατήρησης χωρίς πρόσβαση στη μουσική κίνηση. Έτσι, η προσβασιμότητα μπορεί να ερμηνευθεί ως δυνατότητα ένταξης σε κοινές πρακτικές (π.χ. συντονισμός κίνησης ή συμμετοχή σε χώρο μουσικής), όπου η τεχνολογία δεν αντικαθιστά τη μουσική αλλά επιτρέπει τη συμμετοχή σε αυτήν.[20][17]

Η αυτονομία του χρήστη αποτελεί κεντρικό κριτήριο προσβασιμότητας όταν ο στόχος είναι η μουσική εμπειρία ως καθημερινή πρακτική και όχι ως εφάπαξ επίδειξη τεχνολογίας. Η Haptic Chair μελέτη, με διατηρούμενη ικανοποίηση σε εβδομάδες, δείχνει ότι η επαναλαμβανόμενη χρήση αποτελεί ουσιώδες κριτήριο, επειδή μειώνει την πιθανότητα το αποτέλεσμα να οφείλεται μόνο σε καινοτομία. Η ανασκόπηση για απτικο-ακουστική απόδοση περιγράφει ότι η επιλογή βασικών χαρακτηριστικών και η κατάλληλη παρουσίασή τους στο απτικό μέσο είναι προϋποθέσεις επιτυχίας, άρα υποστηρίζει τη λογική ότι ο χρήστης μπορεί να επιλέγει έμφαση (π.χ. ρυθμική δομή έναντι δυναμικής) χωρίς να αυξάνει άσκοπα την πολυπλοκότητα. Συνεπώς, τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 9 είναι σκόπιμο να συζητηθούν και ως προς το αν το σύστημα μπορεί να κλιμακώνεται σε πραγματικές συνθήκες (σπίτι, εκδήλωση, παρέα) χωρίς να απαιτεί εργαστηριακή ρύθμιση ή ειδική προετοιμασία.[20][17][14]

### 10.2.8 Συνολική ερμηνεία των αποτελεσμάτων του Κεφαλαίου 9

Συνολικά, τα ευρήματα του Κεφαλαίου 9 μπορούν να στηρίξουν τη θέση ότι ένα σύστημα απτικής μετάφρασης μουσικής για DHH χρήστες είναι επιτυχημένο όταν αυξάνει την πρόσβαση σε πραγματικές συνθήκες χρήσης, πέρα από ειδικά επιμελημένο περιεχόμενο. Στο επίπεδο πρόσβασης, η τεκμηρίωση του CHI'24 βασίζεται στη κατανόηση του μουσικού περιεχομένου μέσω εναλλακτικών αισθήσεων όπου απαιτείται να γίνει εσωτερικευμένη η σχέση μουσικού γεγονότος και ένδειξης, ενώ η διερεύνηση/εξατομίκευση αποτελούν βασικά εργαλεία αυτής της διαδικασίας. Η μελέτη Hartic Chair προσφέρει συμπληρωματική ένδειξη ότι η απτική αναπαράσταση μπορεί να έχει πρωτεύον ρόλο στην προτίμηση των DHH χρηστών και ότι η ικανοποίηση μπορεί να διατηρείται σε συνεχή χρήση εβδομάδων, κάτι που ενισχύει τη διάσταση της βιωσιμότητας. Η ανασκόπηση τεκμηριώνει ότι για να μεταφερθεί μουσική πληροφορία στην αφή απαιτείται να εντοπιστούν τα βασικά χαρακτηριστικά, να γίνει κατάλληλη επεξεργασία/αντιστοίχιση και να παρουσιαστούν με τρόπο που σέβεται τους περιορισμούς του απτικού μέσου, άρα η σχεδίαση οφείλει να είναι επιλεκτική και προσαρμοστική. [14][20][17]

### 10.3 Τεχνικοί και Μεθοδολογικοί περιορισμοί

Η παρούσα ενότητα καταγράφει περιορισμούς που σχετίζονται (α) με την τεχνική υλοποίηση της εφαρμογής (αλυσίδα σήματος, real-time επεξεργασία, συγχρονισμός, απτική/οπτική απόδοση) και (β) με τη μεθοδολογία αξιολόγησης (δείγμα, διαδικασία, μετρικές, συνθήκες δοκιμής). Σκοπός δεν είναι να μειωθεί η αξία των αποτελεσμάτων, αλλά να οριοθετηθεί το πλαίσιο μέσα στο οποίο τα συμπεράσματα είναι έγκυρα και να αιτιολογηθούν συγκεκριμένες προτάσεις βελτίωσης που ακολουθούν στην 10.4.

Η ανάγκη για σαφή αποτύπωση περιορισμών είναι ιδιαίτερα έντονη σε συστήματα πολυαισθητηριακής υποκατάστασης/ενίσχυσης μουσικής (οπτικο-απτικά), επειδή η εμπειρία προκύπτει από αλληλεπίδραση ανθρώπινων ορίων (απτική αντίληψη), τεχνολογικών ορίων (actuators, APIs, καθυστερήσεις) και διαδικασιών μάθησης/εξοικείωσης (conceptualization). Ειδικά σε DHH χρήστες, η βιβλιογραφία δείχνει ότι η κατανόηση των cross-modal αντιστοιχίσεων δεν είναι αυτονόητη και απαιτεί exploration/customization για να μετατραπεί το ερέθισμα σε “μουσική έννοια”, άρα ο σχεδιασμός αξιολόγησης επηρεάζει άμεσα το τι μετράται ως επιτυχία.

#### 10.3.1 Τεχνικοί περιορισμοί

##### Περιορισμοί real-time αλυσίδας σήματος

Η άμεση σύζευξη ήχου-αφής σε πραγματικό χρόνο μετατρέπει τον χρονισμό σε κρίσιμο παράγοντα ποιότητας, διότι μικρές αποκλίσεις χρονικής συνέπειας είναι ικανές να αλλοιώσουν τη ρυθμική αναγνωσιμότητα και την αντιληπτή συνοχή της εμπειρίας. Για τον λόγο αυτό, η εργασία επισημαίνει ότι τέτοιες διεργασίες (με χαρακτηριστικό παράδειγμα την FFT) αποτελούν μία από τις πηγές που επηρεάζουν το συνολικό latency και το jitter σε αρχιτεκτονικές HMP πραγματικού χρόνου, ενώ εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι το υποσύστημα απτικής οδήγησης (driver/API), το οποίο καθορίζει πότε και με ποια συνέπεια θα εκτελεστούν τελικά οι εντολές δόνησης.

Η επίδοση ενός συστήματος πραγματικού χρόνου σε κινητή συσκευή εξαρτάται από την αλληλεπίδραση τριών στρωμάτων: ανάλυση/προσωρινή αποθήκευση, διεπαφή χρήστη και λειτουργικό σύστημα. Το buffering, μέσω των παραθύρων ανάλυσης, εισάγει δομική καθυστέρηση και επιβάλλει συγκεκριμένο ρυθμό παραγωγής ενημερώσεων, ο οποίος δεν μπορεί να είναι συνεχής αλλά διακριτός. Στο επίπεδο της διεπαφής χρήστη, ο ρυθμός ανανέωσης και οι χειρισμοί γεγονότων εισάγουν επιπλέον φόρτο, που ενδέχεται να ανταγωνίζεται την επεξεργασία σήματος και να δημιουργεί διακυμάνσεις στον χρονισμό. Επιπλέον, ο χρονοπρογραμματισμός του λειτουργικού συστήματος δεν είναι πλήρως ελέγξιμος και επηρεάζεται από διεργασίες παρασκήνιου, με αποτέλεσμα η εκτέλεση του ίδιου κώδικα να μην είναι χρονικά ταυτόσημη σε κάθε χρήση. Ως εκ τούτου, το ίδιο mapping μπορεί να αποδίδει διαφορετικά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, γεγονός που πρέπει να αναγνωριστεί ως συστημικός περιορισμός και όχι ως σφάλμα υλοποίησης.

##### Περιορισμοί εξαγωγής χαρακτηριστικών (feature extraction)

Η υλοποίηση μπορεί να περιγραφεί ως μια ιεραρχική αλυσίδα εξαγωγής και χαρτογράφησης χαρακτηριστικών: το ηχητικό σήμα μετασχηματίζεται σε φάσμα (FFT), εξάγονται magnitudes, αυτά επιμερίζονται σε bands, και στη

συνέχεια παράγονται σήματα εξόδου που οδηγούν δύο κανάλια ανατροφοδότησης (visual και haptic). Στη συνέχεια, τα μεγέθη αυτά συγκεντρώνονται σε επιλεγμένες ζώνες συχνοτήτων, και μέσω κατωφλίωσης (ενδεχομένως προσαρμοστικής) παράγεται ένα σύνολο οδηγητικών σημάτων που ενεργοποιούν την οπτική αναπαράσταση τύπου bars και την απτική δόνηση. Η ροή “Audio Signal → FFT → Frequency magnitudes → Band partitioning → Visual display (bars) → Haptic vibration” περιγράφει σωστά το τεχνικό pipeline και αποσαφηνίζει τα σημεία μετασχηματισμού δεδομένων. Εντούτοις, η ροή αυτή εμπεριέχει την παραδοχή ότι η μεταφορά των επιδιωκόμενων μουσικών χαρακτηριστικών επιτυγχάνεται επαρκώς μέσω αυτής της φασματικής περίληψης.

Ένα κρίσιμο μειονέκτημα της προσέγγισης αναδεικνύεται όταν η μουσική δομή δεν εκφράζεται κυρίως ως σαφείς, απότομες μεταβολές έντασης. Σε τέτοια μουσικά είδη, τα κατώφλια μπορούν να «κυνηγούν» μικρές διακυμάνσεις, δημιουργώντας αστάθεια και ψευδείς ενεργοποιήσεις, ή να παραμένουν υπερβολικά υψηλά, με αποτέλεσμα σημαντικά γεγονότα να μην καταγράφονται. Η πολυφωνία επιτείνει το ζήτημα, επειδή η ενέργεια ανά μπάντα δεν διακρίνει πηγές, άρα συγχωνεύει πληροφορίες με διαφορετικό μουσικό ρόλο. Επιπρόσθετα, το band partitioning σε λίγες ευρείες ζώνες μειώνει τη λεπτομερή περιγραφή του φάσματος· αυτό ενισχύει τη συνοπτική απεικόνιση, αλλά περιορίζει την απτική απόδοση λεπτών διαφορών, ιδίως σε μελωδικά και ηχοχρωματικά γνωρίσματα.

### **Περιορισμοί mapping ζωνών σε δόνηση**

Η προσέγγιση βασίζεται σε μια κατηγορική κωδικοποίηση, όπου οι συχνοτικές ζώνες δεν διαφοροποιούνται μόνο ως προς την ένταση, αλλά και ως προς τη χρονική διάρκεια της δόνησης. Η χρήση προκαθορισμένων διαρκειών (π.χ. 500ms/300ms/150ms) είναι πρακτική, διότι επιτρέπει γρήγορη εκμάθηση και σταθερή εμπειρία χρήσης, χωρίς ανάγκη πολύπλοκης ερμηνείας. Η επιλογή είναι πρακτική και αποφεύγει την ανάγκη πιο σύνθετης χρονικής ανάλυσης, καθώς η «κατηγορία» κωδικοποιείται απευθείας από τη διάρκεια. Παράλληλα, όμως, ελλοχεύει ο κίνδυνος η σταθερή κωδικοποίηση διάρκειας να επιβάλλει τεχνητή ρυθμικότητα ή επαναληπτικά μοτίβα, τα οποία δεν υπάρχουν απαραίτητα στο μουσικό υλικό, ειδικά όταν η φασματική ενέργεια μεταβάλλεται γρήγορα ή παρουσιάζει συχνές εναλλαγές μεταξύ ζωνών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η χαρτογράφηση της εννοιολογικής «έντασης» σε amplitude ή/και χρονικές παραμέτρους δεν είναι πλήρως αναπαραγωγίμη, διότι μεσολαβεί η κβάντιση του συστήματος απτικής ανάδρασης. Σε επίπεδο διεπαφής, η κβάντιση των τιμών (π.χ. amplitude ως ακέραιος) μετατρέπει μια συνεχή κλιμάκωση σε διακριτές βαθμίδες, άρα η εφαρμογή δεν μπορεί να εγγραφεί λεπτό έλεγχο της απτικής ισχύος. Επιπρόσθετα, η αντιστοίχιση είναι ευαίσθητη στη διαφοροποίηση του απτικού hardware: διαφορετικά μοτοράκια δόνησης παρουσιάζουν διαφορετική αδράνεια, διαφορετικό εύρος πλάτους και διαφορετική αίσθηση στο άγγιγμα. Επιπρόσθετα, είναι πιθανό το λειτουργικό σύστημα ή ο κατασκευαστής να επιβάλλουν κανόνες που μεταβάλλουν τη συμπεριφορά (π.χ. μέγιστη ένταση, χρονικοί περιορισμοί). Επομένως, το λογισμικό ορίζει πρότυπο και επίπεδο, αλλά το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από το hardware και από τις πολιτικές του κατασκευαστή και του λειτουργικού συστήματος.

### **Περιορισμοί Android Haptics API**

Όπως προκύπτει από τη δομή της λύσης, η παραγωγή δόνησης υλοποιείται μέσω των τυπικών διεπαφών του Android, με χρήση VibrationEffect και κυματομορφικών προτύπων (waveforms), ενώ ενσωματώνεται λογική σύνθεσης παλμών με προκαθορισμένα timings και αντίστοιχες τιμές amplitude. Σε αυτό το πλαίσιο, παράγονται παλμοί με ρητά καθορισμένες διάρκειες και στάθμες amplitude, επιτρέποντας την άμεση μετάφραση μιας αφηρημένης περιγραφής σε εκτελέσιμη απτική έξοδο. Εντούτοις, η χρήση του API συνεπάγεται λειτουργικούς περιορισμούς, καθώς η ακρίβεια του χρονοπρογραμματισμού δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτη, ιδιαίτερα υπό φόρτο ή σε περιβάλλοντα όπου ο scheduler του λειτουργικού προτεραιοποιεί άλλες διεργασίες. Τέλος, η συμπεριφορά της δόνησης δεν είναι πλήρως ανεξάρτητη από την κατάσταση του συστήματος: λειτουργίες όπως battery saver, καθώς και παρεμβολές από ειδοποιήσεις ή άλλες υψηλής προτεραιότητας διεργασίες, μπορούν να επιφέρουν καθυστερήσεις, διακοπές ή διαφοροποιήσεις στην εκτέλεση του waveform.

Επιπλέον, το γεγονός ότι η εφαρμογή υποστηρίζει τόσο λειτουργία «vibrate to beat» όσο και λειτουργία σύνθετων waveform ακολουθιών (με ρητά καθορισμένη ακολουθία timings και amplitudes) εντείνει την εξάρτηση από την ποιότητα του εκάστοτε vibration stack της συσκευής. Ειδικότερα, η μετατόπιση από απλούστερα μοτίβα προς

προγραμματιζόμενες ακολουθίες αυξάνει το εύρος των σημείων όπου μπορούν να εισαχθούν ασυνέχειες (π.χ. rounding σε χρονισμούς, εσωτερική εξομάλυνση, προτεραιοποίηση διεργασιών). Στην πράξη, ακόμη και όταν οι παράμετροι οριστούν πανομοιότυπα από το λογισμικό, διαφοροποιήσεις στο hardware/firmware ή στον τρόπο που το λειτουργικό προγραμματίζει την απτική έξοδο μπορούν να αλλάξουν τον «χαρακτήρα» της δόνησης, καθιστώντας την πιο «κοφτή», πιο «απλωμένη» ή λιγότερο διακριτή. Αυτό έχει σημασία μεθοδολογικά, διότι αξιολόγηση σε μία συσκευή ή υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας ενδέχεται να αποτυπώσει μόνο μία «στιγμιότυπη» συμπεριφορά και όχι το εύρος αποκλίσεων που μπορεί να προκύψει σε διαφορετικές συσκευές, εκδόσεις OS ή συνθήκες φόρτου.

### **Περιορισμοί μηχανικής σύζευξης (coupling) με το σώμα**

Η σχετική βιβλιογραφική τεκμηρίωση αναδεικνύει ότι η απτική αντίληψη δεν αποτελεί μονοδιάστατο φαινόμενο, αλλά συναρτάται από παραμέτρους όπως η συχνότητα, η ένταση, η θέση εφαρμογής στο σώμα και οι χωροχρονικές συνθήκες παρουσίας του ερεθίσματος. Στην πράξη, όμως, η απόδοση της δόνησης δεν καθορίζεται μόνο από τα παραπάνω, αλλά και από το υλικό υπόστρωμα (π.χ. θήκη σιλικόνης, γυαλί, ύφασμα τσέπης), την πραγματική επιφάνεια επαφής και τη δύναμη σύσφιξης του χρήστη. Στα smartphone-based συστήματα, η σύζευξη αυτή είναι ιδιαίτερα ευμετάβλητη, διότι ο χρήστης αλλάζει φυσικά τη χρήση της συσκευής ανάλογα με το πλαίσιο (ορθία στάση, καθιστός, περπάτημα), αλλά και με την εργονομία (χρήση ενός χεριού, δύο χεριών, διαφορετική γωνία/προσανατολισμός). Έτσι, αλλαγές όπως διαφορετική λαβή (δάχτυλα έναντι παλάμης), διαφορετική πίεση επαφής (σφιχτή ή χαλαρή), ύπαρξη θήκης, ή χρήση μέσα από τσέπη/ρούχο, ενδέχεται να μεταβάλλουν ριζικά την αντιληπτή ποιότητα του ίδιου σήματος.[14]

### **Περιορισμοί κλιμάκωσης σε διαφορετικές συσκευές**

Η αξιολόγηση σε μία και μόνο συσκευή (Realme GT2 Pro) προσδίδει ισχυρή εσωτερική τεκμηρίωση ως προς το συγκεκριμένο περιβάλλον εκτέλεσης, αλλά ταυτόχρονα περιορίζει το εύρος στο οποίο μπορούν να γενικευθούν τα συμπεράσματα προς άλλες Android υλοποιήσεις. Η γενίκευση απαιτεί εμπειρική επιβεβαίωση σε διαφορετικές υλοποιήσεις δόνησης, καθώς η συμπεριφορά του vibrator δεν είναι μόνο θέμα API κλήσεων αλλά και θέμα φυσικής απόκρισης του actuator, οδηγών και χρονοπρογραμματισμού της πλατφόρμας. Στο πλαίσιο αυτό, ορθώς περιγράφεται ήδη ότι διαφορετικοί ενεργοποιητές και διαφορετικές υλοποιήσεις API οδηγούν σε διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά και δύνανται να επηρεάσουν το latency. Με βάση αυτό, η διαλειτουργικότητα πρέπει να τεθεί ρητά ως μελλοντική εργασία, όχι μόνο ως «δοκιμή σε περισσότερες συσκευές», αλλά ως συστηματική διερεύνηση του εύρους απόκλισης και των παραγόντων που την προκαλούν. Η παραδοχή αυτή δεν αποδυναμώνει τα τρέχοντα αποτελέσματα, αλλά τα οριοθετεί επιστημονικά, αυξάνοντας τη διαφάνεια και την αξιοπιστία της συνολικής τεκμηρίωσης.

## **10.3.2 Μεθοδολογικοί περιορισμοί**

### **Μέγεθος/σύνθεση δείγματος και ετερογένεια DHH**

Η συχνά περιορισμένη διαθεσιμότητα DHH συμμετεχόντων, σε συνδυασμό με πρακτικά εμπόδια (π.χ. γεωγραφική διασπορά, ανάγκη υποστήριξης επικοινωνίας), καθιστά δυσχερή την επίτευξη μεγάλων και αντιπροσωπευτικών δειγμάτων σε μελέτες προσβασιμότητας. Παράλληλα, η συγκεκριμένη κοινότητα χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλομορφία (βαθμός απώλειας, HA/CI, μουσική εμπειρία, ανοχή/ευαισθησία σε δονήσεις), η οποία μπορεί να επηρεάσει τόσο την αντίληψη όσο και την προτίμηση έναντι συγκεκριμένων απτικών παραμέτρων. Η βιβλιογραφία τεκμηριώνει ότι η αποτελεσματική εμπειρία μουσικής μέσω απτικών υποκαταστάτων εξαρτάται από τη δυνατότητα του χρήστη να αντιληφθεί και να νοηματοδοτήσει τις αντιστοιχίσεις, καθώς χωρίς φάση εννοιολόγησης τα ερεθίσματα συχνά βιώνονται ως ανιαρά ή «κρυπτικά». Επομένως, οι ατομικές διαφορές στη μάθηση, στην ερμηνεία και στην απτική ανοχή είναι δυνατόν να μεταφραστούν σε μεγάλη διασπορά μετρήσεων και αξιολογήσεων, καθιστώντας αναγκαία τη ρητή αναφορά αυτού του παράγοντα ως περιορισμού και ως κινήτρου για μελλοντικές μελέτες με πιο διαφοροποιημένα δείγματα.[20]

Σε περιπτώσεις όπου η μελέτη βασίζεται κυρίως σε ακουόντες συμμετέχοντες, η αναφορά σε «συμπεράσματα για άτομα με προβλήματα ακοής» οφείλει να περιοριστεί σε προσεκτικά οριοθετημένα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, είναι σκόπιμο τα αποτελέσματα να παρουσιαστούν ως ενδεικτικά, υποδεικνύοντας πιθανές κατευθύνσεις και όχι ως ισχυρισμοί καθολικής ισχύος. Η παραπάνω προσεκτική στάση δεν ακυρώνει το γεγονός ότι η αξιολόγηση παράγει

ουσιώδη δεδομένα για τη λειτουργία του συστήματος και για την εμπειρία χρήσης στο εξεταζόμενο δείγμα. Αυτή η διάκριση δεν υποβαθμίζει την αξιολόγηση: αντιθέτως, ενισχύει τη διαφάνεια και την επιστημονική ακρίβεια, επειδή δηλώνει σαφώς το claim score και τις προϋποθέσεις υπό τις οποίες ισχύουν τα συμπεράσματα.[20]

### **Χρόνος εξοικείωσης (conceptualization) και novelty effects**

Η βιβλιογραφική ένδειξη από την εργασία της CHI'24 είναι ότι η cross-modal κατανόηση μουσικών εννοιών προκύπτει μέσω προοδευτικής διαδικασίας, όπου η exploration διευκολύνει την ανακάλυψη των σχέσεων και η customization επιτρέπει την ευθυγράμμιση του mapping με τις αντιληπτικές προτιμήσεις του χρήστη. Κατά συνέπεια, όταν η αξιολόγηση διεξάγεται σε μία συνεδρία, προκύπτει ζήτημα οικολογικής εγκυρότητας ως προς το αν μετράται η πραγματική εμπειρία χρήσης ή ένα μεταβατικό στάδιο. Συνεπώς, η ανάλυση των δεδομένων χρειάζεται να αναγνωρίσει ότι πιθανές αποκλίσεις—θετικές ή αρνητικές—μπορεί να οφείλονται στο στάδιο ωρίμανσης της ερμηνείας και όχι απαραίτητα στην τελική ποιότητα του συστήματος. Συνεπώς, απαιτείται προσεκτική διατύπωση ότι τα ευρήματα αφορούν την εμπειρία πριν από μάθηση και ότι η μετα-μαθησιακή εμπειρία δεν έχει αποτυπωθεί επαρκώς χωρίς επαναληπτικό πρωτόκολλο.[20]

Η κρισιμότητα του σημείου εντείνεται στα συστήματα πραγματικού χρόνου, διότι η αξία τους αναδεικνύεται όταν λειτουργούν ως καθημερινά εργαλεία και όχι ως τεχνολογικά artefacts επίδειξης, δηλαδή όταν καλούνται να υποστηρίξουν χρήστες σε πραγματικές ροές δραστηριοτήτων και σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα. Σε τέτοιες καταστάσεις, η εμπειρία εξαρτάται από την ικανότητα του χρήστη να οργανώνει τη ρύθμιση του συστήματος μέσω presets (δηλαδή προκαθορισμένων προφίλ) και να εναλλάσσεται μεταξύ τους χωρίς να χάνει τον έλεγχο ή την κατανόηση της τρέχουσας κατάστασης. Κατά συνέπεια, η ύπαρξη presets και μηχανισμών ρύθμισης αποκτά λειτουργικό χαρακτήρα: επιτρέπει γρήγορη προσαρμογή της συμπεριφοράς του συστήματος και συμβάλλει στη σταθεροποίηση του mapping ανάμεσα στην έξοδο και την ερμηνεία του χρήστη. Ταυτόχρονα, η αναγνώριση μοτίβων αποτελεί το γνωστικό θεμέλιο για την ανάπτυξη εμπιστοσύνης και προβλεψιμότητας, στοιχεία που καθορίζουν εάν το σύστημα θα παραμείνει χρήσιμο μακροπρόθεσμα ή θα εγκαταλειφθεί.[17][20]

### **Επιλογή μουσικών ερεθισμάτων/σεναρίων**

Η επιλογή μουσικών αποσπασμάτων σε πειράματα ή πιλοτικές δοκιμές επηρεάζει ουσιαστικά το τελικό συμπέρασμα, διότι το ίδιο το μουσικό περιεχόμενο καθορίζει τη δυσκολία της ανάλυσης σήματος. Κομμάτια με εμφανείς κρουστικές επιθέσεις και σαφή ρυθμική δομή προσφέρουν ευνοϊκές συνθήκες για beat detection, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν στον χρήστη πιο συνεπείς απτικές ενδείξεις. Στη σχετική βιβλιογραφία επισημαίνεται ότι οι τυπικοί onset detectors τείνουν να αποδίδουν καλά σε δημοφιλή δυτικά είδη (π.χ. rock/pop/dance) όπου η ρυθμική πληροφορία είναι σαφής, αλλά η αποτελεσματικότητα περιορίζεται όταν το στυλ δεν ακολουθεί αυτή την υπόθεση (π.χ. έντονα syncopated συμβάντα ή μη-κρουστική οδήγηση του παλμού). Εφόσον η υλοποίηση στηρίζεται σε FFT magnitudes και σε band partitioning, το μουσικό είδος δρα ως παράγοντας δυσκολίας: οι φασματικές κορυφές, οι μεταβατικές συνιστώσες και η ενεργειακή κατανομή ανά ζώνη καθορίζουν τη σταθερότητα των εξαγόμενων χαρακτηριστικών. Η πρακτική συνάθροισης βραχυχρόνιας φασματικής ενέργειας (μέσω FFT) σε ζώνες συχνοτήτων είναι κεντρική σε πολλές προσεγγίσεις feature extraction και άρα ευαίσθητη στις ιδιότητες του είδους. Κατά συνέπεια, χωρίς συστηματικό έλεγχο ειδών/χαρακτηριστικών, η γενίκευση των αποτελεσμάτων παραμένει περιορισμένη.

Η επιρροή της αισθητικής προτίμησης στη διαμόρφωση υποκειμενικών κρίσεων αποτελεί γνωστή πηγή μεροληψίας σε πειραματικές διαδικασίες που βασίζονται σε self-report κλίμακες. Σε αντίθετη περίπτωση, μπορεί να προκύψει τεχνητή συσχέτιση: το αγαπημένο είδος οδηγεί σε υψηλότερη ευχαρίστηση, η ευχαρίστηση οδηγεί σε υψηλότερη «χρησιμότητα», και τελικά συμπεραίνεται εσφαλμένα ότι το σύστημα βελτιώνει την πρόσβαση. Για να ελαχιστοποιηθεί η σύγχυση, είναι χρήσιμη η προσέγγιση δύο σταδίων: (α) μέτρηση προτίμησης/οικειότητας ανά κομμάτι και (β) μέτρηση προσβασιμότητας μέσω ερωτήσεων που αναφέρονται ρητά στη δυνατότητα παρακολούθησης, κατανόησης και ελέγχου. Επομένως, οι αναλύσεις θα πρέπει να τεκμηριώνουν ότι οι δείκτες χρησιμότητας αφορούν την προσβασιμότητα (π.χ. «μπορώ να εντοπίσω αλλαγές», «μπορώ να ακολουθήσω τον ρυθμό», «μπορώ να ελέγξω τις ρυθμίσεις») και όχι την αισθητική κρίση του κομματιού. Με αυτόν τον διαχωρισμό, τα συμπεράσματα γίνονται πιο ανθεκτικά και ερμηνεύσιμα.[20]

## Μετρικές, αυτοαναφορές και μεροληψίες

Σε μελέτες HCI, οι αυτοαναφορικές μετρήσεις αποτελούν πρακτικό εργαλείο για την αποτίμηση καταστάσεων που είναι εγγενώς εσωτερικές, όπως η ευχαρίστηση, η κόπωση ή η αντιλαμβανόμενη κατανόηση. Παράλληλα όμως, είναι επιρρεπείς σε bias, είτε επειδή οι συμμετέχοντες επιχειρούν να ικανοποιήσουν υποτιθέμενες προσδοκίες (demand characteristics), είτε επειδή θέλουν να δώσουν «θετική» εικόνα (social desirability). Επιπλέον, ερωτήσεις που φαίνονται σαφείς στους ερευνητές μπορεί να έχουν διαφορετικές αναγνώσεις μεταξύ συμμετεχόντων, μειώνοντας τη συγκρισιμότητα. Στους DHH χρήστες, το πρόβλημα γίνεται εντονότερο διότι μουσικοί όροι που θεωρούνται κοινότοποι σε ακουόντες ενδέχεται να έχουν διαφορετικές σημασιολογικές αναφορές ή να συγκροτούνται με εναλλακτικούς τρόπους. Ως αποτέλεσμα, οι απαντήσεις δύνανται να αντανakλούν διαφορετικές νοηματοδοτήσεις των ίδιων όρων και, άρα, να απαιτείται προσαρμοσμένη γλωσσική διατύπωση και επαλήθευση κατανόησης.[20]

Ελλείπει συμπληρωματικών αντικειμενικών δεικτών (π.χ. δοκιμών αναγνώρισης αλλαγών ρυθμού, χρόνων αντίδρασης, καταγραφής tapping και δεικτών συγχρονισμού), η ερμηνεία των ευρημάτων οφείλει να διατηρείται αυστηρά προσεκτική και περιορισμένη ως προς τα συμπεράσματα. Τέτοια ευρήματα μπορούν να θεωρηθούν ισχυρές ενδείξεις ότι η διεπαφή και η μορφή ανατροφοδότησης είναι εφικτές και ότι το σύστημα δεν απορρίπτεται από τους χρήστες. Ωστόσο, χωρίς δοκιμές όπως αναγνώριση ρυθμικών αλλαγών, μέτρηση χρόνων απόκρισης ή ανάλυση tapping συγχρονισμού, δεν μπορεί να υποστηριχθεί με ακρίβεια ότι το σύστημα μετέφερε συγκεκριμένη ποσότητα/ποιότητα μουσικής πληροφορίας. Παρόμοιες προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιήσει ερωτηματολόγια ως κύριο εργαλείο αποτίμησης εμπειρίας, αναγνωρίζοντας ότι καταγράφουν ψυχολογικές διαστάσεις και όχι κατ' ανάγκην επιδόσεις αποκωδικοποίησης. Επομένως, τα θετικά σχόλια πρέπει να διαβαστούν ως ένδειξη ότι το σύστημα είναι αποδεκτό και ενδεχομένως υποστηρικτικό, αλλά δεν πρέπει να ληφθούν ως ποσοτικοποιημένη απόδειξη υψηλής πληροφοριακής μεταφοράς. Συνεπώς, η ακαδημαϊκά συνεπής ερμηνεία είναι ότι επιβεβαιώθηκε η αποδοχή/εντύπωση, ενώ η «ποσότητα μουσικής πληροφορίας» που μεταφέρθηκε παραμένει ασαφής και απαιτεί περαιτέρω μέτρηση.[17]

## Σχεδιασμός πειράματος: order effects και έλεγχος μεταβλητών

Όταν σε μια μελέτη συγκρίνονται πολλαπλές εκδοχές λειτουργίας του ίδιου συστήματος (π.χ. presets με διαφορετικές παραμέτρους, διαφορετικές «γλώσσες» δόνησης ή διαφοροποιημένοι μηχανισμοί ανάδρασης), η διάταξη παρουσίασης των συνθηκών μπορεί να επηρεάσει άμεσα το τελικό συμπέρασμα. Η μετάβαση από ένα mode σε άλλο μπορεί να συνοδεύεται από συσσώρευση μάθησης (καλύτερη κατανόηση του τι σημαίνει κάθε μοτίβο δόνησης ή κάθε preset) ή, αντιστρόφως, από συσσώρευση κόπωσης και κορεσμού, οδηγώντας σε μειωμένη συγκέντρωση και λιγότερο αξιόπιστες αυτοαναφορές. Σε real-time συστήματα, αντίστοιχα, οι εξωτερικές συνθήκες χρήσης λειτουργούν ως παράγοντες που μεταβάλλουν το διαθέσιμο εύρος προσοχής: θόρυβος, φωτισμός, εργονομία, στάση σώματος και ταυτόχρονη χρήση κινητού είναι πρακτικά στοιχεία που συναντώνται στην καθημερινή χρήση και μπορούν να επηρεάσουν άμεσα τόσο τη συγκέντρωση όσο και τη συνολική αξιολόγηση. Επομένως, η μεθοδολογία πρέπει να περιλαμβάνει αντιστάθμιση/τυχαιοποίηση σειράς, πρόβλεψη διαλειμμάτων και συστηματική τεκμηρίωση των περιβαλλοντικών και εργονομικών συνθηκών.

## Περιορισμοί baselines και συγκρίσεων

Η υφιστάμενη βιβλιογραφία σε συστήματα απτικής πρόσβασης στη μουσική (ενδεικτικά, Haptic Chair) αναφέρει ότι οι DHH συμμετέχοντες συχνά προτιμούν λύσεις όπου η απτική ανάδραση είναι είτε αυτόνομη είτε συνδυάζεται με πρόσθετη οπτική πληροφορία, ενώ η αποκλειστικά οπτική συνθήκη τείνει να αξιολογείται χαμηλότερα. Η παρατήρηση αυτή έχει άμεση μεθοδολογική συνέπεια: το συμπέρασμα «το mode X είναι καλύτερο» εξαρτάται από το ποια συνθήκη χρησιμοποιείται ως baseline και από το αν αυτό το baseline είναι πραγματικά αντιπροσωπευτικό. Αν η αξιολόγηση δεν περιέλαβε όλες τις θεμελιώδεις συνθήκες (συμπεριλαμβανομένης μιας control χωρίς υποστήριξη και μιας καθαρά απτικής συνθήκης), τότε δεν είναι δυνατό να απομονωθεί επαρκώς η συνεισφορά κάθε καναλιού ή mode. Ως αποτέλεσμα, οι συγκρίσεις μεταξύ modes είναι ορθότερο να παρουσιαστούν ως ενδεικτικές παρατηρήσεις, με σαφή επισήμανση ότι απαιτείται πλήρης αντιστάθμιση συνθηκών και ίσος χρόνος προσαρμογής.

## 10.4 Προτάσεις βελτίωσης και μελλοντική έρευνα

Τα αποτελέσματα της ενότητας 10.1 υποδεικνύουν ότι επιλογές προεπεξεργασίας όπως A-weight έναντι Flat, καθώς και οι ρυθμίσεις passband, δεν αποτελούν απλές «τεχνικές λεπτομέρειες», αλλά παράγοντες που μεταβάλλουν την αντιληπτική ποιότητα και τη χρηστικότητα του real-time συστήματος. Ταυτόχρονα, οι περιορισμοί της 10.3 (mic-based real-time, μεταβλητότητα περιβάλλοντος, latency/jitter, και περιορισμοί συσκευής/στοίβας δόνησης) υποδεικνύουν ότι ένα μέρος της διακύμανσης στις αξιολογήσεις μπορεί να αποδίδεται σε παράγοντες πλαισίου και πλατφόρμας και όχι αποκλειστικά στον σχεδιασμό του mapping. Με βάση αυτά, οι άξονες βελτίωσης οφείλουν να είναι διττοί: (α) υλοποιητικοί—με έμφαση σε σταθεροποιημένο χρονισμό, ελεγχόμενη κλιμάκωση πλάτους και ανθεκτικότητα σε αλλαγές περιβάλλοντος, και (β) αξιολογητικοί—με καταγραφή των συνθηκών, με δοκιμές επαναληψιμότητας και με μεθοδολογίες που μειώνουν την εξάρτηση από μια συγκεκριμένη συσκευή/στοίβα δόνησης. Στο επίπεδο αξιολόγησης, απαιτούνται πρωτόκολλα που ελέγχουν/καταγράφουν τις συνθήκες και διαχωρίζουν την επίδραση του pipeline από την επίδραση της πλατφόρμας, ώστε τα συμπεράσματα για DHH χρήστες να αποκτούν μεγαλύτερη ισχύ.[14]

Η πρώτη γραμμή παρέμβασης αφορά την ακουστική είσοδο και, ειδικότερα, την ανθεκτικότητα της εφαρμογής όταν εκτίθεται σε πραγματικές συνθήκες χρήσης. Η τρέχουσα αρχιτεκτονική mic mode (AudioRecord/MicHapticsStreamer) χρησιμοποιεί RMS gating/ενίσχυση και συγκεκριμένες παραμέτρους κατωφλίου, όπως micPreGain, gateRms και silenceShareThreshold, οι οποίες δεν είναι βέβαιο ότι μεταφέρονται ισοδύναμα από χώρο σε χώρο. Προτείνεται να προστεθεί αυτόματη διαδικασία βαθμονόμησης (calibration) λίγων δευτερολέπτων στην αρχή κάθε συνεδρίας ή κατά την ανίχνευση αλλαγής περιβάλλοντος, με σκοπό να εκτιμηθεί το τρέχον noise floor και η στατιστική κατανομή του RMS. Η δυναμική αυτή προσαρμογή επιτρέπει διαφορετικά προφίλ για ήσυχο εσωτερικό χώρο, εξωτερικό περιβάλλον ή χώρο με αυξημένο θόρυβο. Με αυτόν τον μηχανισμό περιορίζονται τα ψευδώς ανιχνευμένα απτικά γεγονότα από μη-μουσικούς ήχους και αυξάνεται η συνέπεια της αντιστοίχισης σε διαφορετικούς χώρους.

Η δεύτερη κατεύθυνση βελτίωσης επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση του real-time χρονισμού και, ειδικότερα, στον τρόπο με τον οποίο το σύστημα ομαδοποιεί/πακετάρει τις απτικές τιμές σε κυματομορφές (waveforms). Στην υλοποίηση, οι απτικές τιμές συγκροτούνται σε πακέτα/πλαίσια (frames) και τελικά σε waveforms, με ρυθμίσεις όπως frameMsCfg και packetFramesCfg που οδηγούν σε ομαδοποιήσεις της τάξης των 100 ms. Το σχήμα αυτό διευκολύνει τη διαχείριση overhead, όμως επιβάλλει trade-off: μεγαλύτερα πακέτα μειώνουν την πυκνότητα χρονικών ενημερώσεων, ενώ μικρότερα πακέτα αυξάνουν λειτουργικό κόστος, πιθανώς και αστάθεια. Προτείνεται, συνεπώς, μια πειραματικά καθοδηγούμενη διαδικασία tuning, όπου οι παράμετροι μεταβάλλονται συστηματικά και αξιολογούνται με κριτήριο το αντιληπτό latency, τη διακύμανση jitter και τη σταθερότητα της ροής υπό διαφορετικό φόρτο. Επιπλέον, η ύπαρξη watchdog/restart/mute/fade-in θα πρέπει να συμπληρωθεί με logging, ώστε κάθε stall και επανεκκίνηση να καταγράφεται μαζί με συνθήκες λειτουργίας (φόρτος, power/thermal state), επιτρέποντας στοχευμένη διόρθωση των σημείων που προκαλούν αστάθεια.

Η τρίτη γραμμή βελτίωσης αφορά τη μετάβαση από ένα «τεχνικά ορθό» mapping σε ένα mapping που είναι ερμηνεύσιμο και λειτουργικό για τον χρήστη, μέσω σαφούς οργάνωσης των presets και διεύρυνσης της απτικής κωδικοποίησης. Δεδομένου ότι στην 10.1 αναδεικνύεται διαφοροποίηση εμπειρίας μεταξύ A-weight και Flat και μεταξύ passband παραλλαγών, η πρόταση είναι να μετασχηματιστούν τα presets σε ρητές λειτουργίες χρήσης (ρυθμός-πρώτα, μπάσο-πρώτα, καθαρότητα, χαμηλή κόπωση) με σύντομες οδηγίες. Κάθε κατάσταση πρέπει να τεκμηριώνεται με μικρή περιγραφή που εξηγεί ποια στοιχεία ενισχύονται και ποια καταστέλλονται, ώστε να μειώνεται η γνωστική αβεβαιότητα. Επιπλέον, προτείνεται η απτική «γλώσσα» να εμπλουτιστεί αξιοποιώντας διαθέσιμα δομικά στοιχεία της υλοποίησης: beats/ticks για παλμική σήμανση, section detection για σηματοδότηση μεταβάσεων, ADSR shaping για διαφοροποίηση άρθρωσης και διάρκειας, και όπου υποστηρίζεται, haptic primitives για τυποποιημένα μοτίβα υψηλής διακρίσιμότητας. Τέλος, πρέπει να ενσωματωθούν ρυθμίσεις «άνεσης» (όρια έντασης/διάρκειας και προαιρετικά διαλείμματα), καθώς η συνεχής waveform διέγερση ενδέχεται να αυξήσει την κόπωση και να υποβαθμίσει τη μακροχρόνια αποδοχή του συστήματος.[14]

Η τέταρτη κατεύθυνση αφορά την ενίσχυση της χρηστικότητας μέσω UX μηχανισμών εξατομίκευσης, με προτεραιότητα στους DHH χρήστες, για τους οποίους η σταθερή ερμηνεία μιας πολυαισθητηριακής αντιστοίχισης συχνά προκύπτει μετά από εξερεύνηση, δοκιμή και προσαρμογή. Προτείνεται η ενσωμάτωση σύντομου tutorial που

να παρουσιάζει τη «λογική» των presets/ρυθμίσεων σε πρακτικό επίπεδο: ποιο preset είναι κατάλληλο για αρχική εξοικείωση, ποιο για έντονο περιβάλλον, ποιο για μακρά χρήση, και ποια ρύθμιση επηρεάζει κυρίως την εμπειρία. Παράλληλα, επειδή η mic-based real-time λειτουργία εξαρτάται από το περιβάλλον, προτείνεται η υλοποίηση προφίλ ανά σενάριο με αποθήκευση παραμέτρων και γρήγορη ανάκληση. Σε δεύτερο επίπεδο, προτείνεται η αποθήκευση προφίλ ρυθμίσεων ανά περιβάλλον/σενάριο για τη mic-based real-time λειτουργία, καθώς η είσοδος αλλάζει έντονα ανάλογα με θόρυβο, ακουστική και πηγή. Επιπλέον, μια ένδειξη ποιότητας σήματος ενισχύει την ερμηνευσιμότητα: όταν η ποιότητα είναι χαμηλή, ο χρήστης αντιλαμβάνεται ότι το αποτέλεσμα επηρεάζεται από την είσοδο και όχι από σφάλμα του συστήματος. Η ύπαρξη δυνατότητας προσαρμογής και ένδειξης αξιοπιστίας είναι συνεπής με ζητούμενα χρηστών για προσαρμογή και ενημέρωση ακρίβειας.

Ως κατεύθυνση μελλοντικής εργασίας, προτείνεται η υιοθέτηση αξιολόγησης δύο επιπέδων, όπου το πρώτο επίπεδο αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση συγχυτικών παραγόντων και το δεύτερο στην επιβεβαίωση χρηστικότητας σε πραγματικές συνθήκες. Η εργαστηριακή φάση μπορεί να λειτουργήσει ως «benchmark» με αυστηρή τυποποίηση (κοινό σύνολο ερεθισμάτων, σταθερές συνθήκες αναπαραγωγής, ισοδύναμη διάρκεια και αντιστάθμιση σειράς), ώστε οι διαφορές να αποδίδονται στο σύστημα και όχι στο πλαίσιο. Στο πεδίο, το σύστημα αξιολογείται ως προς την πρακτική βιωσιμότητα και τη συνέπεια εμπειρίας, σε περιβάλλοντα όπου η μεταβλητότητα είναι δομικό χαρακτηριστικό. Επιπλέον, προτείνεται οι αυτοαναφορές να ενισχυθούν με αντικειμενικά καθήκοντα (tapping με beat, αναγνώριση αλλαγής tempo ή/και ενότητας), ώστε να είναι σαφές αν το σύστημα βελτιώνει μετρήσιμα την πρόσβαση στη μουσική πληροφορία ή απλώς αυξάνει την υποκειμενική αποδοχή. Τέλος, κρίνεται απαραίτητη η πιο στοχευμένη αξιολόγηση με DHH συμμετέχοντες, με χρόνο εξοικείωσης και δυνατότητα customization, δεδομένου ότι αντίστοιχες προτιμήσεις έχουν αναφερθεί σε συναφείς προσεγγίσεις.

# Κεφάλαιο 11ο: Συμπεράσματα

## 11.1 Σύνοψη Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη μεταφορά μουσικής πληροφορίας μέσω απτικής ανάδρασης (δόνησης), με σκοπό την ενίσχυση της πρόσβασης και της εμπειρίας ακρόασης, με ιδιαίτερη έμφαση σε χρήστες Deaf and Hard of Hearing (DHH), αλλά και σε περιπτώσεις όπου η απτική αίσθηση μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά προς την ακουστική πληροφορία. Η μεθοδολογία ακολουθεί εφαρμοστικό προσανατολισμό: πέρα από τη θεωρητική τεκμηρίωση, η εργασία καταλήγει σε συγκεκριμένο τεχνολογικό artefact που επιτρέπει επαναληπτικό έλεγχο και μελλοντική επέκταση. Η εφαρμογή αναπτύχθηκε σε Android και σχεδιάστηκε ώστε να μετασχηματίζει παραμέτρους/χαρακτηριστικά του ήχου σε απτικά μοτίβα, τα οποία δύνανται να ερμηνευθούν ως ενδείξεις μουσικών γεγονότων. Επιπλέον, υποστηρίζονται δύο λειτουργικά σενάρια: επεξεργασία κατά την αναπαραγωγή μουσικών αρχείων και real-time λειτουργία μέσω μικροφώνου, ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά του συστήματος τόσο σε ελεγχόμενη αναπαραγωγή όσο και σε δυναμικές συνθήκες περιβάλλοντος.

Στο αρχικό μέρος της εργασίας παρουσιάστηκε η έννοια της audio-tactile απόδοσης και η μεθοδολογική λογική των audio-tactile mappings, δηλαδή των μετασχηματισμών που επιτρέπουν σε ακουστικές ιδιότητες να αποτυπωθούν ως απτική πληροφορία. Περιγράφηκαν βασικές κατηγορίες αντιστοιχίσεων, όπου η ένταση λειτουργεί ως άμεσος οδηγός κλιμάκωσης της δόνησης, οι φασματικές μεταβολές συνδέονται με διαφοροποίηση της απτικής απόδοσης, και τα ρυθμικά γεγονότα (π.χ. παλμός, onsets) αποδίδονται ως χρονικά σαφείς απτικές ενδείξεις. Παράλληλα, υπογραμμίστηκε ότι η απόδοση ενός mapping δεν εξαρτάται μόνο από το αν «ανιχνεύει» σωστά, αλλά από το αν «επικοινωνεί» σωστά, δηλαδή από το αν ο χρήστης μπορεί να το ερμηνεύσει με συνέπεια. Ειδικά για DHH χρήστες, η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι πιο απαιτητική, καθώς οι cross-modal αντιστοιχίσεις συχνά δεν εδράζονται σε κοινές ακουστικές εμπειρίες και απαιτούν εξερεύνηση και εξατομίκευση για να γίνουν λειτουργικά «αναγνώσιμες». Συνεπώς, η θεωρητική εισαγωγή κατέληξε ότι τα mappings πρέπει να σχεδιάζονται ως εργαλεία επικοινωνίας πληροφορίας, τα οποία οφείλουν να υποστηρίζουν εκμάθηση, προσαρμογή και επαναληψιμότητα της εμπειρίας.

Κατόπιν, παρουσιάστηκε η δομή της εφαρμογής σε επίπεδο αρχιτεκτονικής και τεκμηριώθηκαν τα επιμέρους υποσυστήματα επεξεργασίας, με σαφή διαχωρισμό του σκέλους ανάλυσης ήχου (audio pipeline) από το σκέλος παραγωγής δόνησης (haptic pipeline). Στη λειτουργία αναπαραγωγής, η εφαρμογή διαχειρίζεται την επιλογή αρχείου, την αποκωδικοποίηση και την παραγωγή PCM και στη συνέχεια συντονίζει την απτική απόδοση με την τρέχουσα θέση του κομματιού, ώστε οι χειρισμοί του χρήστη (seek, pause/resume) να μην διακόπτουν τη λογική συνέχεια της απτικής εμπειρίας. Οι ενέργειες ελέγχου (seek, pause/resume, επαναφορά από θέση) αντιμετωπίστηκαν ως κρίσιμα σημεία, επειδή απαιτούν ανακαθορισμό της χρονικής αναφοράς και συγχρονισμένη επανεκκίνηση των υποσυστημάτων. Αντίστοιχα, στη λειτουργία live, το AudioRecord παρέχει το εισερχόμενο σήμα, η επεξεργασία γίνεται σε διαδοχικά frames, εφαρμόζεται gating/ενίσχυση και παράγεται απτική έξοδος σε πραγματικό χρόνο. Υπογραμμίστηκε ότι η χρονική εμπειρία στη live λειτουργία εξαρτάται έντονα από το μέγεθος πλαισίων και τον τρόπο πακετοποίησης, δεδομένου ότι τα μεγέθη αυτά καθορίζουν το trade-off μεταξύ λειτουργικού overhead και χρονικής ακρίβειας/αντιληπτού latency.

Για την παραγωγή της δόνησης, υλοποιήθηκε μηχανισμός δημιουργίας waveforms μέσω του vibrator API, με amplitudes κβαντισμένα σε κλίμακα 0–255 και πακετοποίηση σε σταθερού μήκους τμήματα, ώστε να περιορίζεται το overhead κλήσεων και να διατηρείται ρεαλιστική απόκριση σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, ενσωματώθηκαν λειτουργίες επεξεργασίας που στοχεύουν στη βελτίωση της “αναγνωσιμότητας” της δόνησης: διαχωρισμός του σήματος σε ζώνες (band splitting) με υπολογισμό RMS, εφαρμογή διαφορετικών φίλτρων/σταθμίσεων (π.χ. Flat, A-weight, C-weight, Z-weight), καθώς και παραμετροποίηση passband μέσω low/high cut ώστε να ρυθμίζεται τι “περνάει” στη δόνηση. Παράλληλα, υλοποιήθηκαν μηχανισμοί που αποδίδουν χρονική δομή (π.χ. beats) και μορφοποίηση παλμών (envelope shaping όπως ADSR), έτσι ώστε η απτική έξοδος να αποκτά σαφέστερα σημεία αναφοράς και να μην εκλαμβάνεται ως μια συνεχής, αδιάκριτη διέγερση.

Η απτική έξοδος της εφαρμογής υλοποιήθηκε μέσω σύνθεσης waveforms με αξιοποίηση του vibrator API, όπου το πλάτος κβαντίζεται στην τυπική κλίμακα 0–255 και οι ακολουθίες οργανώνονται σε τμήματα σταθερού μήκους. Η

πακετοποίηση αυτή επιλέχθηκε ώστε να περιορίζεται το overhead των επαναλαμβανόμενων κλήσεων προς το υποσύστημα δόνησης και να διατηρείται πρακτικά εφικτή απόκριση σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η επεξεργασία της απτικής πληροφορίας σχεδιάστηκε ώστε να ενισχύει τη διακριτότητα του αποτελέσματος και να αποφεύγει την αίσθηση «μονοτονίας» που προκαλεί μια συνεχής διέγερση. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε διαχωρισμός του σήματος σε ζώνες συχνοτήτων (band splitting) με υπολογισμό RMS ανά ζώνη, ώστε η απτική έξοδος να μπορεί να αντανακλά διαφοροποιήσεις ενέργειας σε επιμέρους περιοχές του φάσματος. Επιπλέον, υλοποιήθηκε εναλλαγή φίλτρων/σταθμίσεων (ενδεικτικά Flat, A-weight, C-weight, Z-weight), επιτρέποντας διαφορετικές «αναγνώσεις» του ίδιου σήματος ανάλογα με το αν προτεραιοποιείται η αντιληπτική στάθμιση ή η φασματική ουδετερότητα. Παράλληλα, η παραμετροποίηση passband μέσω low/high cut δίνει τη δυνατότητα ελέγχου του περιεχομένου που «περνά» στη δόνηση, άρα και της σχετικής έμφασης σε χαμηλές ή υψηλότερες συνιστώσες. Τέλος, ενσωματώθηκαν μηχανισμοί χρονικής οργάνωσης (beats) και envelope shaping τύπου ADSR, ώστε τα απτικά συμβάντα να έχουν σαφή έναρξη, κορύφωση και αποφόρτιση και να λειτουργούν ως αναγνωρίσιμες «μονάδες» πληροφορίας. Με αυτόν τον συνδυασμό (σταθερή πακετοποίηση waveforms, ζωνική ανάλυση RMS, επιλογές στάθμισης/φιλτραρίσματος, passband έλεγχος, beat-based χρονική σήμανση και ADSR), η απτική έξοδος επιδιώκεται να είναι πιο δομημένη, ερμηνεύσιμη και κατάλληλη για παρατεταμένη χρήση.

Τέλος, η εργασία ολοκληρώθηκε με αξιολόγηση της εφαρμογής μέσω ερωτηματολογίου, ώστε να καταγραφούν εντυπώσεις και προτιμήσεις σχετικά με φίλτρα, passband επιλογές και λειτουργία real-time. Η αξιολόγηση αυτή, παρότι δεν αντικαθιστά ένα πλήρως ελεγχόμενο εργαστηριακό πρωτόκολλο, παρείχε πρακτικά δεδομένα χρήσης και ανέδειξε τόσο σημεία στα οποία η εφαρμογή αποδίδει ικανοποιητικά όσο και σημεία που χρειάζονται περαιτέρω βελτίωση.

## 11.2 Κύρια συμπεράσματα

Κεντρικό συμπέρασμα είναι ότι η απτική μεταφορά μουσικής πληροφορίας μέσω smartphone μπορεί να παραγάγει αντιληπτά αποτελέσματα, ιδιαίτερα σε διαστάσεις όπως ο ρυθμός και η δυναμική, όταν το mapping είναι σταθερό και η χρονική συμπεριφορά δεν παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις. Οι απαντήσεις των συμμετεχόντων υποδηλώνουν ικανότητα διάκρισης μεταξύ διαφορετικών επιλογών φιλτραρίσματος, καθώς οι ίδιοι μπορούσαν να περιγράψουν διαφοροποιήσεις στη «μορφή» ή στη «σκληρότητα/απαλότητα» της δόνησης. Αυτό υποστηρίζει ότι οι παραμετροποιήσεις δεν αποτελούν απλώς εσωτερικές λεπτομέρειες υλοποίησης, αλλά δύνανται να διαμορφώνουν την αίσθηση και την ερμηνευσιμότητα της απτικής εξόδου. Συνεπώς, η εμπειρία δεν φαίνεται «επίπεδη» ή αδιαφοροποιήτη ως προς τις τεχνικές παραμέτρους, αλλά εμφανίζει διαφοροποιήσεις που γίνονται αντιληπτές και συγκρίσιμες.

Ως προς τις επιλογές φιλτραρίσματος/στάθμισης, παρατηρείται μια σαφής τάση υπέρ του A-weight ως «καλύτερης συνολικά» ρύθμισης για σημαντικό μέρος των συμμετεχόντων, με αιτιολογήσεις που συνδέουν τη συγκεκριμένη επιλογή με αίσθηση πιο «ξεκάθαρης» και οργανωμένης δόνησης, καθώς και με εντύπωση ότι αποδίδεται πλησιέστερα η μελωδική πληροφορία. Ωστόσο, η εικόνα δεν είναι μονοσήμαντη: εμφανίζονται και σταθερές προτιμήσεις προς το Flat, με βασικό σκεπτικό ότι προσφέρει μια πιο «φυσική» ή «ρεαλιστική» ακολουθία δόνησης, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις περιγράφεται ως περισσότερο «κοφτερή» και δυναμική. Παρά τις παραπάνω τάσεις, αναφέρονται και περιπτώσεις όπου οι διαφοροποιήσεις κρίνονται μικρές, είτε επειδή το μουσικό περιεχόμενο δεν «αναδεικνύει» ισχυρά τη διαφοροποίηση των φίλτρων είτε επειδή η απτική απόδοση εξομαλύνεται από άλλες παραμέτρους. Αυτό το μοτίβο υποδηλώνει ότι η προτίμηση φίλτρου είναι συμφραζόμενη: μεταβάλλεται με το μουσικό περιεχόμενο, με την προσωπική ευαισθησία του χρήστη και με το «τι» θεωρεί ο χρήστης ως χρήσιμη πληροφορία στη δόνηση. Με αυτή τη θεώρηση, η ύπαρξη πολλαπλών presets λειτουργεί ως μηχανισμός κάλυψης ετερογένειας και ως μέσο εξατομίκευσης.

Ως προς την παραμετροποίηση του passband, οι απαντήσεις συγκλίνουν στο ότι πολλά άτομα προτιμούν μεσαία εύρη συχνοτήτων (ενδεικτικά γύρω από 25–400, 30–300, 25–350, 20–270 ή 40–370), καθώς αυτά βιώνονται ως πιο ευχάριστα και συχνά πιο άνετα για παρατεταμένη χρήση. Όταν το passband στενεύει υπερβολικά, περιγράφεται ότι η δόνηση «πέφτει» σε ένταση και χάνει την ικανότητα να σηματοδοτεί γεγονότα, γεγονός που υποδεικνύει ότι η χρήσιμη ενέργεια έχει αποκοπεί από το επιλεγμένο παράθυρο. Αντιθέτως, η υπερβολική διεύρυνση του passband περιγράφεται ως αύξηση της σύγχυσης, δηλαδή ως αίσθηση ότι περισσότερα στοιχεία περνούν ταυτόχρονα στη δόνηση χωρίς σαφή ιεράρχηση. Το συμπέρασμα είναι ότι το passband λειτουργεί ως μηχανισμός επιλογής της φασματικής πληροφορίας

που είναι πιθανότερο να γίνει χρήσιμη απτικά, και όχι ως απλός μοχλός αύξησης/μείωσης έντασης. Συνεπώς, η παραμετροποίηση passband πρέπει να θεωρείται κρίσιμη σχεδιαστική μεταβλητή, επειδή διαμορφώνει τη σημασιολογική πυκνότητα και την αναγνωσιμότητα της δόνησης.

Οι αξιολογήσεις για τη real-time λειτουργία μέσω μικροφώνου αποτυπώνουν μια κατ' αρχήν θετική πρόθεση χρήσης και επαναχρησιμοποίησης σε καθημερινές συνθήκες. Η χρήση περιγράφεται ως ρεαλιστική σε ποικίλα σενάρια, συμπεριλαμβανομένης της ομιλίας, της μουσικής και ευρύτερων περιβαλλοντικών ηχητικών ερεθισμάτων. Παράλληλα, αναδεικνύεται ανάγκη αντιμετώπισης της αίσθησης καθυστέρησης, καθώς και ανάγκη για σαφέστερη καθοδήγηση ή ένδειξη κατάστασης, ώστε η λειτουργία να γίνεται αντιληπτή ως πλήρως ελεγχόμενη. Το εύρημα είναι συνεπές με το ότι η ζωντανή επεξεργασία επηρεάζεται από την οργάνωση σε frames/packets, από το gating και από τη μεταβλητότητα του περιβάλλοντος, παράγοντες που καθιστούν τον αντιληπτό συγχρονισμό ευαίσθητο σε μικρές αλλαγές ρυθμίσεων.

Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει σε συνολικό επίπεδο είναι ότι η εφαρμογή διαμορφώνει μια λειτουργική ισορροπία μεταξύ τεχνικής πολυπλοκότητας και άμεσης αξιοποίησης στην πράξη. Η ευελιξία αυτή προκύπτει επειδή ο χρήστης διαθέτει επιλογές mapping μέσω φίλτρων, επιλογές «εστίασης» μέσω passband και στοιχειώδη χρονική άρθρωση μέσω beats/envelopes, επιτρέποντας τη συγκρότηση μιας προσωποποιημένης εμπειρίας δόνησης. Το πλαίσιο αυτό λειτουργεί ως εργαλείο παραμετροποίησης, μέσα από το οποίο ο χρήστης μπορεί να καταλήξει σε πιο προσωπικά κατάλληλο απτικό αποτέλεσμα, χωρίς να απαιτείται αναγκαστικά πολύπλοκη αλληλεπίδραση. Παρά ταύτα, η αξιολόγηση υπογραμμίζει ότι η απόδοση δεν είναι ανεξάρτητη του πλαισίου, αλλά επηρεάζεται σημαντικά τόσο από την εξατομίκευση όσο και από τις συνθήκες χρήσης, κάτι που ενισχύει την ανάγκη για βελτιωμένο onboarding και για προσαρμοστικούς μηχανισμούς που αντιμετωπίζουν περιβαλλοντικές μεταβολές.

### 11.3 Δυνατότητες επέκτασης της εφαρμογής

Οι δυνατότητες εξέλιξης του συστήματος τεκμηριώνονται ως άμεση συνέπεια του τεχνικού σχεδιασμού που έχει υλοποιηθεί, αλλά και των παρατηρήσεων που προέκυψαν από την αξιολόγηση. Υπό αυτή τη θεώρηση, οι επεκτάσεις δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως αποσπασματικές βελτιώσεις, αλλά ως στοχευμένες παρεμβάσεις που εντάσσονται σε οργανωμένο σχέδιο εξέλιξης. Με γνώμονα την ανάγκη για δομημένη εξέλιξη, οι δυνατότητες αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικούς άξονες, οι οποίοι οριοθετούν σαφώς το πεδίο παρέμβασης και επιτρέπουν ιεράρχηση. Ο πρώτος άξονας αφορά την πραγματικού χρόνου λειτουργία και στοχεύει στη βελτίωση σταθερότητας και χρονισμού, δηλαδή στην αποφυγή ασυνέπειας και στη διατήρηση προβλέψιμης συμπεριφοράς. Δεύτερον, εμπλουτισμός του mapping, με στόχο μεγαλύτερη διαφοροποίηση και σαφέστερη αντιστοίχιση πληροφορίας στην απτική έξοδο. Ο τρίτος άξονας αφορά την εμπειρία χρήστη, με έμφαση στην εξατομίκευση, ώστε οι τεχνικές δυνατότητες να μετατρέπονται σε πρακτικά αξιοποιήσιμες επιλογές για διαφορετικούς χρήστες.

Μια κομβική κατεύθυνση βελτίωσης για τη real-time λειτουργία αφορά την προσαρμογή του pipeline στις δυναμικά μεταβαλλόμενες ακουστικές συνθήκες. Δεδομένου ότι η είσοδος λαμβάνεται από μικρόφωνο, η μεταβλητότητα θορύβου, οι αλλαγές απόστασης και η ακουστική του χώρου μεταβάλλουν τα στατιστικά του σήματος και επηρεάζουν τη λειτουργία του gating, με συνέπεια πιθανές ασυνέπειες στην απτική απόδοση. Μια διαδικασία αυτόματου calibration μπορεί να εκτιμά παραμέτρους περιβάλλοντος και να προσαρμόζει δυναμικά προενίσχυση/thresholds, περιορίζοντας ανεπιθύμητες αποκρίσεις και αυξάνοντας τη συνέπεια. Παράλληλα, η μείωση αντιληπτού latency απαιτεί συστηματικό tuning του frame size και του αριθμού frames ανά packet, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη χρονική ακρίβεια χωρίς δυσανάλογη αύξηση overhead. Τέλος, η εκτενέστερη καταγραφή stalls/restarts και η συσχέτισή τους με συνθήκες λειτουργίας υποστηρίζει στοχευμένη βελτιστοποίηση και επιτρέπει να τεκμηριώνεται η πρόοδος, ειδικά όταν η εφαρμογή τρέχει σε συσκευές με διαφορετικές επιδόσεις.

Ως επέκταση στο επίπεδο mapping, προτείνεται η ανάπτυξη μιας πιο δομημένης απτικής «σύνταξης» που να υπερβαίνει το συνεχές waveform και να εισάγει γεγονότα με σαφή σημασιολογία. Τα διαθέσιμα στοιχεία υποδομής (beats, section detection, envelopes και πιθανή χρήση primitives) παρέχουν επαρκές υπόβαθρο για την κωδικοποίηση μουσικών γεγονότων με αυξημένη σημασιολογική σαφήνεια. Με αυτόν τον τρόπο, το downbeat μπορεί να αποκτήσει σταθερό απτικό «σύμβολο», και οι αλλαγές ενότητας να αποδίδονται με σαφή μεταβατικά μοτίβα, αυξάνοντας τη λειτουργική αναγνωσιμότητα. Η επιλογή αυτή ενισχύει την αναγνωσιμότητα με οικονομία πόρων, δεδομένου ότι δεν

προϋποθέτει απαραίτητα υψηλότερο amplitude. Η κατεύθυνση αυτή είναι συνεπής με την παρατήρηση ότι οι προτιμήσεις μεταξύ A-weight/Flat και μεταξύ passband επιλογών διαφοροποιούνται, άρα απαιτείται σχεδίαση που υποστηρίζει ταχεία και στοχευμένη επιλογή.

Σε όρους σχεδίασης διεπαφής, διαπιστώνεται ανάγκη για σαφέστερη καθοδήγηση και υψηλότερο βαθμό «διαφάνειας» της λειτουργίας, κυρίως στη live λειτουργία όπου ο χρήστης καλείται να ερμηνεύσει δυναμικά αποτελέσματα. Η προσθήκη ενός σύντομου onboarding, το οποίο εξηγεί συστηματικά τις αλλαγές που επιφέρει κάθε φίλτρο, μπορεί να μειώσει την αβεβαιότητα του χρήστη κατά την επιλογή ρυθμίσεων. Η αντίστοιχη ερμηνεία του passband—ως ρύθμιση που επηρεάζει την αίσθηση—μπορεί να επιταχύνει την εξοικείωση και να καταστήσει τις συγκρίσεις μεταξύ επιλογών πιο σταθερές. Επιπλέον, η αποθήκευση προφίλ ανά σενάριο (μουσική, ομιλία, περιβάλλον) και η γρήγορη εναλλαγή μεταξύ τους θα καταστήσει τη διαδικασία επιλογής παραμέτρων περισσότερο πρακτική, μετατρέποντας τη διερευνητική χρήση σε καθημερινά επαναλήψιμη πρακτική.

Μια κρίσιμη προοπτική για μελλοντική ανάπτυξη σχετίζεται με την ενσωμάτωση υποστηρίξιμης εξωτερικών απτικών ενεργοποιητών (wearables ή εναλλακτικές συσκευές), ώστε η απτική απόδοση να μην περιορίζεται αποκλειστικά στον δονητή του smartphone. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν την ισχύ δόνησης που μπορεί να παραχθεί, το εύρος και τη μορφή της φασματικής απόκρισης, καθώς και την αδυναμία παροχής ουσιαστικής χωρικής πληροφορίας μέσω ενός μόνο ενεργοποιητή. Με αυτή την αρχιτεκτονική προϋπόθεση, η προσθήκη επικοινωνίας με εξωτερικό hardware μπορεί να υλοποιηθεί με ελεγχόμενο τρόπο και να επεκτείνει άμεσα τις δυνατότητες εξόδου. Η δυνατότητα αυτή δημιουργεί προϋποθέσεις για πλουσιότερη μεταφορά μουσικής πληροφορίας και για μεγαλύτερη διακριτότητα σε σχέση με τη μονοκαναλική δόνηση που προσφέρει το smartphone.

Στο πλαίσιο μελλοντικής βελτίωσης της μεθοδολογίας, προτείνεται η αξιολόγηση να επεκταθεί ώστε να συνδυάζει αυτοαναφορικές μετρήσεις με αντικειμενικά tasks, ενισχύοντας την τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων με μετρήσιμη απόδοση. Η συμπερίληψη tasks όπως tapping στον ρυθμό και αναγνώριση αλλαγών tempo/section επιτρέπει να αξιολογείται η ακρίβεια μεταφοράς μουσικής πληροφορίας, αποφεύγοντας τη σύγχυση ανάμεσα στη θετική εμπειρία και στη λειτουργική αποτελεσματικότητα. Επιπλέον, η αύξηση της συμμετοχής DHH χρηστών, μαζί με πρόβλεψη επαρκούς χρόνου εξοικείωσης/εκμάθησης, θα επέτρεπε μια πιο δίκαιη αξιολόγηση της νοηματοδότησης των mappings και της πραγματικής συμβολής της εξατομίκευσης, δεδομένου ότι η προσαρμογή αποτελεί κεντρικό στοιχείο της λογικής της εφαρμογής.

## Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Θεοφάνους, “Θεωρία και Πρακτική Ψηφιακών Εφέ Ήχου (Digital Audio Effects - DAFX). Ένα Διδακτικό Βοήθημα για τη Μουσική Πληροφορική.,” *Openarchives.gr*, 2025. <https://www.openarchives.gr/aggregator-openarchives/edm/pergamos/000005-uoadl:1317979> (accessed Jan. 20, 2026).
- [2] Wikipedia Contributors, “Low-pass filter,” *Wikipedia*, Jul. 27, 2019. [https://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass_filter)
- [3] R. Sottek, T. Lobato, M. Bender, and J. Becker, “Modelling the ISO 226:2023 equal-loudness-level contours by standardized loudness methods,” Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.61782/fa.2023.0585>.
- [4] G. Devkota, “The Psychoacoustic Properties Of Sound: An Introduction,” *Indian Journal of Scientific Research*, vol. 10, no. 1, p. 215, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.32606/ijsr.v10.i1.00034>.
- [5] Aker, S. C., Innes-Brown, H., Faulkner, K. F., Vatti, M., and Marozeau, J., “Effect of audio-tactile congruence on vibrotactile music enhancement,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 152, no. 6, pp. 3396–3409, 2022, doi: 10.1121/10.0016444.
- [6] A. Haynes, J. Lawry, C. Kent, and J. Rossiter, “FeelMusic: Enriching Our Emotive Experience of Music through Audio-Tactile Mappings,” *Multimodal Technologies and Interaction*, vol. 5, no. 6, p. 29, May 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/mti5060029>.
- [7] L. Turchet, R. Rosaia, A. Diodati, and M. Carner, “Exposure to vibrotactile music improves audiometric performances in individuals with cochlear implants,” *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, Jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02946-4>.
- [8] M. Giordano, J. Sullivan, and M. M. Wanderley, “Design of Vibrotactile Feedback and Stimulation for Music Performance,” *Springer series on touch and haptic systems*, pp. 193–214, Jan. 2018, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-58316-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58316-7_10).
- [9] Razvan Paisa, Niels Christian Nilsson, and S. Serafin, “Tactile displays for auditory augmentation—A scoping review and reflections on music applications for hearing impaired users,” *Frontiers in computer science*, vol. 5, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.3389/fcomp.2023.1085539>.
- [10] N. Shibata and S. Maeda, “Effect of tool handle diameter on temporary threshold shift (TTS) of vibrotactile perception,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 38, no. 9–10, pp. 697–702, Sep. 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.10.006>.
- [11] C. Hatzfeld, S. Dorsch, C. Neupert, and M. Kupnik, “Influence of surgical gloves on haptic perception thresholds,” *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 14, no. 1, Aug. 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.1852>.
- [12] L. Chauvette *et al.*, “Multichannel Vibrotactile Glove: Validation of a New Device Designed to Sense Vibrations,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 17, no. 4, pp. 913–923, Oct. 2024, doi: <https://doi.org/10.1109/toh.2024.3475740>.
- [13] K. Siedenburg, M. Bürgel, Elif Özgür, Christoph Scheicht, and S. Töpken, “Vibrotactile enhancement of musical engagement,” *Scientific reports*, vol. 14, no. 1, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57961-8>.

- [14] B. Remache-Vinueza, A. Trujillo-León, M. Zapata, F. Sarmiento-Ortiz, and F. Vidal-Verdú, “Audio-Tactile Rendering: A Review on Technology and Methods to Convey Musical Information through the Sense of Touch,” *Sensors*, vol. 21, no. 19, p. 6575, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21196575>.
- [15] R. Lundström, A. Noor Baloch, M. Hagberg, T. Nilsson, and L. Gerhardsson, “Long-term effect of hand-arm vibration on thermotactile perception thresholds,” *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, vol. 13, no. 1, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.1186/s12995-018-0201-1>.
- [16] A. Flores Ramones and M. S. del-Rio-Guerra, “Recent Developments in Haptic Devices Designed for Hearing-Impaired People: A Literature Review,” *Sensors*, vol. 23, no. 6, p. 2968, Mar. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23062968>.
- [17] S. C. Nanayakkara, L. Wyse, and S. H. Ong, “Enhancing Musical Experience for the Hearing-Impaired Using Visual and Haptic Displays,” vol. 28, pp. 115–160, 2013, doi: <https://doi.org/10.1080/07370024.2012.697006>.
- [18] “US10754428B1 - Systems, methods, and devices for audio-tactile mapping - Google Patents,” *Google.com*, Feb. 25, 2019. <https://patents.google.com/patent/US10754428B1/en> (accessed Jan. 20, 2026).
- [19] G.-L. Alvaro, V. B. Ricardo, S. P. Jose Manuel, O. Tomás, and C. Víctor, “New haptic systems for elicit emotions in audio-visual events for hearing impaired people.,” *Procedia Computer Science*, vol. 237, pp. 533–543, May 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.137>.
- [20] Y. Choi, J. Jeon, C. Lee, Y.-G. Noh, and J.-H. Hong, “A Way for Deaf and Hard of Hearing People to Enjoy Music by Exploring and Customizing Cross-modal Music Concepts,” May 2024, doi: <https://doi.org/10.1145/3613904.3642665>.
- [21] I. N. Αβούρης, “ΩΡΑ Πειραιάς | Αβούρης Ιωάννης,” *Αβούρης Ιωάννης*, Oct. 02, 2024. <https://orl-peiraias.gr/> (accessed Jan. 20, 2026).
- [22] “Τύποι βαρηκοΐας | Εξερευνήστε τα 3 κυριότερα είδη | Ακουστικά βαρηκοΐας Philips,” *Philips.com*, 2025. <https://www.hearingsolutions.philips.com/el-gr/hearing-loss/types-of-hearing-loss> (accessed Jan. 20, 2026).
- [23] Συνεισφέροντες στα εγχειρίδια Wikimedia, “Απώλεια ακοής,” *Wikipedia.org*, Aug. 05, 2008. [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%80%CF%8E%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CE%B1\\_%CE%B1%CE%BA%CE%BF%CE%AE%CF%82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%80%CF%8E%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CE%B1_%CE%B1%CE%BA%CE%BF%CE%AE%CF%82) (accessed Jan. 20, 2026).
- [24] Κ. Σουλαντίκας, “Βαρηκοΐα,” <https://soulantikas.gr>, 2026. <https://soulantikas.gr/varikoia/> (accessed Jan. 20, 2026).
- [25] divweb, “Αιτίες & τύποι Βαρηκοΐας,” *auralcare.gr*, 2019. <https://auralcare.gr/peri-akohs/aities-typoi-barekoias.html> (accessed Jan. 20, 2026).
- [26] Texas Instruments, “Haptic Energy Consumption.” Accessed: Jan. 20, 2026. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/sloa194a/sloa194a.pdf>
- [27] “Static behavior of piezoelectric actuators.” Available: [https://www.newport.com/medias/sys\\_master/images/images/hd9/h74/9054030430238/Tech-Note-CH2-Piezo-Theory-Static-Properties.pdf](https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/hd9/h74/9054030430238/Tech-Note-CH2-Piezo-Theory-Static-Properties.pdf)

- [28] Wikipedia Contributors, “High-pass filter,” *Wikipedia*, Nov. 22, 2019. [https://en.wikipedia.org/wiki/High-pass\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/High-pass_filter)
- [29] Wikipedia Contributors, “Band-pass filter,” *Wikipedia*, Apr. 18, 2019. [https://en.wikipedia.org/wiki/Band-pass\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Band-pass_filter)
- [30] Wikipedia Contributors, “A-weighting,” *Wikipedia*, Apr. 08, 2020. <https://en.wikipedia.org/wiki/A-weighting>
- [31] “Analyze vibration waveforms,” *Android Developers*, 2025. <https://developer.android.com/develop/ui/views/haptics/actuators> (accessed Jan. 20, 2026).
- [32] Wikipedia, “Damping,” *Wikipedia*, Oct. 31, 2021. <https://en.wikipedia.org/wiki/Damping>
- [33] “Mass-spring-damper model,” *Wikipedia*, Mar. 03, 2021. [https://en.wikipedia.org/wiki/Mass-spring-damper\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Mass-spring-damper_model)
- [34] Wikipedia Contributors, “Q factor,” *Wikipedia*, Apr. 21, 2019. [https://en.wikipedia.org/wiki/Q\\_factor](https://en.wikipedia.org/wiki/Q_factor)
- [35] “Overshoot (signal),” *Wikipedia*, Dec. 01, 2022. [https://en.wikipedia.org/wiki/Overshoot\\_\(signal\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Overshoot_(signal))
- [36] maa lim, “W4ELEC372 - Chapter 4 Time Response Overview and Key Concepts,” *Studocu*, Sep. 24, 2025. <https://www.studocu.com/en-ca/document/concordia-university/fundamentals-of-control-systems/w4elec372-chapter-4-time-response-overview-and-key-concepts/139490848> (accessed Jan. 20, 2026).
- [37] “AB-004: Understanding ERM Vibration Motor Characteristics,” *Precision Microdrives*, May 12, 2021. <https://www.precisionmicrodrives.com/ab-004>
- [38] WPAdmin, “Unbalance Force,” *Zenco*, Dec. 16, 2021. <https://zencovibrations.com/unbalance-force/>
- [39] “Haptic Actuators: Comparing LRA and ERM With Piezo – Boréas Technologies,” *Boreas.ca*, 2022. <https://pages.boreas.ca/blog/piezo-haptics/haptic-actuators-how-lra-and-erm-stack-up-with-piezo-actuators>
- [40] “Repeated Measures Design,” *explorable.com*. <https://explorable.com/repeated-measures-design>
- [41] “Η βαρηκοΐα αυξάνει τον κίνδυνο πτώσης | akouson,” *akouson*, Mar. 2023. [https://akouson.gr/i\\_varikoia\\_auksanei\\_ton\\_kindyno\\_ptosis/](https://akouson.gr/i_varikoia_auksanei_ton_kindyno_ptosis/) (accessed Jan. 20, 2026).
- [42] H. Team, “Βαρηκοΐα – Απώλεια ακοής: Τι την προκαλεί και σε ποιες περιπτώσεις είναι αναστρέψιμη - hygeia.gr,” *hygeia.gr*, Dec. 24, 2024. <https://www.hygeia.gr/variko-a-apoleia-akois-ti-tin-prokalei-kai-se-poies-periptoseis-einai-anastrepsimi/> (accessed Jan. 20, 2026).
- [43] “ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΑΚΟΗΣ,” *e-meds.gr*. <https://www.e-meds.gr/%CF%84%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%B9-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CE%B2%CE%B1%CE%B8%CE%BC%CE%BF%CE%B9-%CE%B1%CF%80%CF%89%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82-%CE%B1%CE%BA%CE%BF%CE%B7%CF%82/>
- [44] H. Davis, D. Schlundt, K. Bonnet, S. Camarata, B. Hornsby, and F. H. Bess, “Listening-Related Fatigue in Children With Hearing Loss: Perspectives of Children, Parents, and School

Professionals,” *American Journal of Audiology*, vol. 30, no. 4, pp. 1–12, Sep. 2021, doi: [https://doi.org/10.1044/2021\\_aja-20-00216](https://doi.org/10.1044/2021_aja-20-00216).

[45] S. D. Emmett and H. W. Francis, “The Socioeconomic Impact of Hearing Loss in U.S. Adults,” *Otology & Neurotology*, vol. 36, no. 3, pp. 545–550, Mar. 2015, doi: <https://doi.org/10.1097/mao.0000000000000562>.

[46] “Equal-loudness contour,” *Wikipedia*, Sep. 20, 2019. [https://en.wikipedia.org/wiki/Equal-loudness\\_contour](https://en.wikipedia.org/wiki/Equal-loudness_contour)

[47] All About Circuits, “Low-pass Filters | Filters | Electronics Textbook,” *Allaboutcircuits.com*, Jul. 16, 2019. <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/low-pass-filters/>

[48] T. R. Kuphaldt, “High-pass Filters,” *Allaboutcircuits.com*, Feb. 12, 2015. <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/high-pass-filters/>

[50] “Sound Level Measurement,” *Sound-au.com*, 2025. <https://sound-au.com/articles/a-weighting.html>

[51] “Undamped SDOF Response to Harmonic Loading - Dynamics Analysis,” *Structuralengineeringsimplified.com*, 2025. <https://www.structuralengineeringsimplified.com/dynamics/hsdof/responseudsdof>

[52] gd-admin, “Eccentric Rotating Mass Vibration Motors – ERMs,” <https://www.leader-w.com/>, 2024. <https://www.leader-w.com/news/eccentric-rotating-mass-vibration-motors-erms> (accessed Jan. 21, 2026).

[53] “Linear Resonant Actuators – LRAs,” *Precision Microdrives*, Oct. 07, 2021. <https://www.precisionmicrodrives.com/linear-resonant-actuators-lras>

[54] C. Jehle, “Piezo Haptic Actuators for Touch Applications,” *EETechnical Articles*, Sep. 20, 2019. [Online]. Available: <https://www.eepower.com/technical-articles/piezo-haptic-actuators-for-touch-applications/>

[55] J. B. J. Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*. Paris, France: Firmin Didot, 1822.