

**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ ΚΑΛΩΝ ΤΕΧΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**Χρήση χιμαιρικών ήχων στη μελέτη της ακουστικής αντίληψης:  
Μια βιβλιογραφική αναφορά  
“Chimeric sounds in auditory perception: A literature review”**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Στη μουσική ακουστική**

**της φοιτήτριας**

**Νάκα Αγγελική**

**ΑΕΜ: 1956**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:  
Καθηγητής Δρ. Κωνσταντίνος Παστιάδης**

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ, 2025**

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και της ιατρικής έχει δημιουργήσει νέες δυνατότητες για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Στο πλαίσιο αυτό, οι χμιαϊκοί ήχοι αποτελούν ένα καινοτόμο πειραματικό εργαλείο. Οι χμιαϊκοί ήχοι προκύπτουν από τον συνδυασμό της περιβάλλουσας (envelope) ενός ήχου με τη λεπτοδομή (fine structure) ενός άλλου, παράγοντας τεχνητά ερεθίσματα που επιτρέπουν τη μελέτη των μηχανισμών της ακουστικής αντίληψης. Αυτή η ανασκόπηση εξετάζει τη βιβλιογραφία σχετικά με τη φύση και τη χρήση των χμιαϊκών ήχων, καθώς και το πώς αυτοί μπορούν να σχετίζονται με βασικές αρχές της αντίληψης του ήχου. Η βιβλιογραφία που εξετάστηκε δείχνει ότι οι χμιαϊκοί ήχοι μπορούν να συμβάλουν στη βαθύτερη κατανόηση της εγκεφαλικής λειτουργίας και της ακουστικής επεξεργασίας, ενεργοποιώντας μηχανισμούς νευροπλαστικότητας που ενδέχεται να βελτιώσουν την υγεία ατόμων με προβλήματα ακοής και ομιλίας. Παράλληλα, η χρήση τους ανοίγει νέες προοπτικές τόσο στην ανάπτυξη κοχλιακών εμφυτευμάτων και άλλων τεχνολογιών αποκατάστασης, όσο και σε καλλιτεχνικές εφαρμογές, αναδεικνύοντας τη διεπιστημονική τους αξία.

Λέξεις κλειδιά: Χμιαϊκοί ήχοι, Ακουστική αντίληψη, Περιβάλλουσα, Λεπτοδομή

## **Abstract**

In recent years, the rapid development of technology and medicine has created new possibilities for improving the quality of life. In this context, chimeric sounds constitute an innovative experimental tool. Chimeric sounds arise from the combination of the envelope of one sound with the fine structure of another, producing artificial stimuli that allow the study of the mechanisms of auditory perception. This review examines the literature on the nature and use of chimeric sounds, as well as how they can be related to basic principles of sound perception. The literature reviewed shows that chimeric sounds can contribute to a deeper understanding of brain function and auditory processing, activating neuroplasticity mechanisms that may improve the health of individuals with hearing and speech impairments. At the same time, their use opens new perspectives both in the development of cochlear implants and other rehabilitation technologies, as well as in artistic applications, highlighting their interdisciplinary value.

*Keywords:* Chimeric sounds, Auditory perception, Envelope, Fine structure

## Ευχαριστίες

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Παστιάδη που μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα αλλά και για την εξαιρετική συνεργασία και την πολύτιμη βοήθειά του κατά την διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην πρόεδρο του τμήματος κα. Μαρία Αλεξάνδρου. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τη φίλη μου Δήμητρα Μπαρώνη και τέλος τους γονείς μου και την αδερφή μου για την στήριξη και την ηθική συμπαράσταση που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια καθώς και για την πίστη τους στις δυνατότητες μου.

## Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος σχημάτων .....	iii
Λίστα πινάκων .....	iii
Εισαγωγή .....	1
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην χιμαιρικούς ήχους.....	4
1.1. Τι είναι οι χιμαιρικοί ήχοι .....	4
1.2. Ιστορική αναδρομή .....	5
1.3. Αξία των χιμαιρικών ήχων .....	6
Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογία Ανασκόπησης .....	7
2.1. Αναζήτηση Βιβλιογραφίας .....	7
2.2. Κριτήρια Ενσωμάτωσης και Αποκλεισμού.....	8
2.3. Οργάνωση της Πληροφορίας .....	10
Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	11
3.1. Νευροεπιστήμες και Ψυχοακουστική .....	11
3.1.1. Θεμελιώδεις μηχανισμοί ακουστικής επεξεργασίας .....	11
3.1.2 Χρονική και Φασματική Επεξεργασία (Temporal Envelope & Fine Structure) & Χιμαιρικοί Ήχοι .....	13
3.1.3. Ψυχοακουστική και Ανάλυση Ακουστικής Σκηνής: Οργάνωση της Αντίληψης, Πολυαισθητηριακές Επιδράσεις και ο Ρόλος της Πρόβλεψης.....	15
3.1.5. Ακουστικές Ψευδαισθήσεις και Ακουστικές Παραληρητικές Ιδέες (Auditory Hallucinations and Auditory Delusions) .....	21
3.2. Γλωσσολογία και Αντίληψη της Ομιλίας.....	26
3.2.1. Φωνητική Αντίληψη και Επεξεργασία Λόγου .....	26
3.2.2. Γλωσσική Κατανόηση υπό Συνθήκες Παραμόρφωσης ή Παρακώλυσης .....	30
3.2.3. Διαγλωσσικές και Πολιτισμικές Διαφορές στην Αντίληψη Ομιλίας .....	32
3.3. Τεχνολογία, Τεχνητή Νοημοσύνη και Διεπαφές Εγκεφάλου-Υπολογιστή .....	34
3.3.1. Ακουστική αποκωδικοποίηση με χρήση τεχνητής νοημοσύνης.....	35

3.3.2. Ακουστικές διεπαφές και adaptive τεχνολογίες (sonification).....	37
3.3.3. Νευροτεχνολογικές Εφαρμογές και Προοπτικές .....	40
3.3.4. Ακουστική Ανάλυση και Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος (DSP).....	43
3.3.5. Αισθητηριακή αποκατάσταση & θεραπευτική χρήση.....	45
3.3.6. Ηθικές και Κοινωνικές Διαστάσεις .....	50
3.4. Τέχνη, Μουσική και Ηχητικά Περιβάλλοντα.....	52
3.4.1. Μουσική ανάλυση - Timbres και χημαιρικά ηχοχρώματα .....	52
3.4.2. Κινηματογράφος - Συναισθηματική επίδραση και αφηρημένοι ήχοι .....	54
3.4.3. Εικονικά και Επαυξημένα Περιβάλλοντα (VR/AR) – Sonification.....	55
3.4.4. Διαδραστικά Ηχητικά Έργα και Ακουστική Εμπειρία στην Τέχνη .....	57
Κεφάλαιο 4: Συζήτηση και Συμπεράσματα .....	60
4.1. Σύθεση βασικών ευρημάτων .....	60
4.2. Κριτική αξιολόγηση της βιβλιογραφίας.....	62
4.3. Προεκτάσεις Ηθικές και Κοινωνικές .....	63
4.4. Μελλοντικές κατευθύνσεις .....	64
4.5. Συμπεράσματα .....	66
Βιβλιογραφία .....	69

## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1. Δημιουργία χμαιοικού ήχου από την περιβάλλουσα (envelope) του Σήματος Α και τη λεπτοδομή (fine structure) του Σήματος Β (Πηγή: Smith et al., 2002; Xu & Pfingst, 2000 και ίδια επεξεργασία).....	14
Σχήμα 2. Ροή διεπαφής εγκεφάλου-υπολογιστή (BCI): Νευρική δραστηριότητα → Καταγραφή (EEG/ECOG) → Επεξεργασία & ΑΙ → Αποκωδικοποίηση → Έξοδος (συνθετική ομιλία/συσκευές) (Mane et al., 2022· Luo et al., 2022· Stavisky, 2025).....	41
Σχήμα 3. Σχηματική απεικόνιση κοχλιακού εμφυτεύματος: Μικρόφωνο → Επεξεργαστής σήματος → Πομπός/Δέκτης → Ηλεκτρόδια στον κοχλία. Προσαρμογή με βάση Wilson & Dorman (2008).....	46
Σχήμα 4. Παράδειγμα διαδικασίας sonification: αντιστοίχιση δεδομένων σε ακουστικές παραμέτρους. Πηγή: Vera C. Rubin Observatory (n.d.). .....	56

## Λίστα πινάκων

Πίνακας 1. Έρευνες σχετικά με τους χμαιοικούς ήχους .8 <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Πίνακας 2. Αναφορές ανά άξονα.....	10
Πίνακας 3. Σύνοψη συμπερασμάτων .....	61

## Εισαγωγή

Μία από τις βασικότερες αισθήσεις για τον άνθρωπο είναι η ακοή. Είναι απαραίτητη για την ανθρώπινη επικοινωνία, την κοινωνική αλληλεπίδραση αλλά και την καλλιτεχνική δημιουργία. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος λαμβάνει τα ηχητικά σήματα, και μέσω της ακουστικής αντίληψης τα μετατρέπει σε περίπλοκες διαδικασίες οι οποίες μεταφράζονται σε ομιλία, μουσική αλλά και σε ήχους που μας περιβάλλουν (Moore, 2012· Plack, 2023). Ο κοχλίας και οι νευρωνικές οδοί αποτελούν το βασικό ακουστικό σύστημα και είναι υπεύθυνα για την μετατροπή των ηχικών κυμμάτων σε νευρικά σήματα. Σε γνωστικό επίπεδο, η ακουστική αντίληψη οργανώνεται μέσω μηχανισμών όπως η ανάλυση ακουστικής σκηνής (auditory scene analysis) και η προσοχή (Evans, 1993· Bregman, 1994). Η σημασία αυτών των μηχανισμών φαίνεται στην ικανότητα του ανθρώπου να ξεχωρίζει μία φωνή μέσα σε θορυβώδες περιβάλλον ή να αναγνωρίζει τη μελωδία ενός μουσικού κομματιού.

Η έρευνα έχει δείξει ότι δύο βασικές μορφές πληροφορίας είναι κρίσιμες για την ακουστική αντίληψη: ο χρονικός φάκελος (temporal envelope), που αποτυπώνει τις αργές διακυμάνσεις της έντασης ενός σήματος, και η λεπτοδομή (temporal fine structure), που περιλαμβάνει τις ταχείες ταλαντώσεις και τα φασματικά χαρακτηριστικά του ήχου (Giraud et al., 2000· Xu & Pfingst, 2003· Heinz & Swaminathan, 2009). Η περιβάλλουσα είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την κατανόηση της ομιλίας. Η λεπτοδομή από την άλλη συμβάλλει καθοριστικά στην αντίληψη της μουσικής, του τόνου και της κατεύθυνσης του ήχου (Warnecke et al., 2020· Siedenburg et al., 2023). Μέσω αυτής της διάκρισης δημιουργούνται δυνατότητες εξερεύνησης εξειδικευμένων πειραματικών εργαλείων. Ένα από αυτά αποτελούν και οι χιμαιρικοί ήχοι που δίνουν τη δυνατότητα να απομονωθεί και να μελετηθεί ο ρόλος της περιβάλλουσας και της λεπτοδομής ξεχωριστά.

Οι τελευταίες δεκαετίες έχουν φέρει σημαντική πρόοδο τόσο στην τεχνολογία όσο και στην κατανόηση του ανθρώπινου εγκεφάλου. Με αυτόν τον τρόπο έχουν αναπτυχθεί νέα εργαλεία για τη μελέτη της ακουστικής αντίληψης (Wang et al., 2008· Shamma & Micheyl, 2010). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι χιμαιρικοί ήχοι, οι οποίοι αποτελούν τεχνητά ακουστικά ερεθίσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και άλλοι τύποι υβριδικών ήχων που μπορούν να παραχθούν μέσω του συνδυασμού περιβάλλουσας και λεπτοδομής διαφορετικών ηχητικών σημάτων· ωστόσο, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η ανάλυση θα επικεντρωθεί αποκλειστικά στους χιμαιρικούς ήχους. Συγκεκριμένα, προκύπτουν από τον συνδυασμό της περιβάλλουσας ενός ήχου με τη λεπτοδομή ενός άλλου. Έτσι δημιουργείται ένας νέος ήχος

που εμπεριέχει πληροφορίες και από τις δύο αρχικές πηγές (Smith et al., 2002). Η ιδιαιτερότητα αυτή, τους καθιστά εξαιρετικά χρήσιμους σε διάφορους τομείς. Για παράδειγμα, στη νευροεπιστήμη και τη νευροψυχολογία, οι χιμαιρικοί ήχοι προσφέρουν σημαντικά δεδομένα για τον τρόπο με τον οποίο ο εγκέφαλος επεξεργάζεται και κατανοεί τον ήχο (Prinsloo & Lalor, 2022). Ακόμη, φαινόμενα όπως η νευροπλαστικότητα και η εμπειρική προσαρμογή προσφέρουν νέες δυνατότητες εκμάθησης και αποκατάστασης (Glennon et al., 2023). Παράλληλα, έχουν βρει εφαρμογή στη μελέτη της αντίληψης ομιλίας και γλώσσας, συμβάλλοντας στην κατανόηση των μηχανισμών που εμπλέκονται (Xu & Pfingst, 2003) και ενισχύοντας την ιδέα ότι η μουσική εκπαίδευση μπορεί να βελτιώσει τις γλωσσικές και ακουστικές ικανότητες (Siedenburg et al., 2023). Επιπλέον, στον τομέα της τεχνολογίας και της τεχνητής νοημοσύνης, η αξιοποίησή τους ανοίγει δρόμους για τη δημιουργία νευροτεχνολογικών εμφυτευμάτων που θα βοηθήσουν άτομα με προβλήματα ακοής ή ομιλίας, παρέχοντας θεραπευτικές δυνατότητες και αισθητηριακή αποκατάσταση (Heinz & Swaminathan, 2009· Glennon et al., 2023). Οι χιμαιρικοί ήχοι συνδέονται ακόμη, με την ανάπτυξη διεπαφών εγκεφάλου–υπολογιστή, οι οποίες στοχεύουν σε βαθύτερη κατανόηση της ανθρώπινης σκέψης (Denham & Winkler, 2020). Τέλος, σημαντική είναι και η διάστασή τους στην τέχνη και στα ηχητικά περιβάλλοντα. Σε αυτό το πλαίσιο ανακύπτουν ερωτήματα για το πώς ο άνθρωπος δίνει νόημα στον ήχο και ποια συναισθήματα μπορεί να γεννήσει. Ο ήχος δεν επηρεάζει μόνο την κατεύθυνση της αντίληψης, αλλά και τη συναισθηματική εμπειρία. Παράλληλα, ανοίγει τον δρόμο για εφαρμογές όπως η εικονική πραγματικότητα (Trainor & Cirelli, 2015).

Παρά τη δυναμική τους, οι χιμαιρικοί ήχοι έχουν αποτελέσει μέχρι σήμερα αντικείμενο σχετικά περιορισμένου αριθμού ερευνών (Smith et al., 2002· Xu & Pfingst, 2003· Heinz & Swaminathan, 2009· Prinsloo & Lalor, 2022). Η υπάρχουσα βιβλιογραφία εστιάζει κυρίως στη διάκριση ανάμεσα στην περιβάλλουσα και τη λεπτοδομή του ήχου. Μελετά επίσης τον ρόλο τους στην κατανόηση της ομιλίας και της μουσικής. Ωστόσο, σε τομείς όπως η νευροπλαστικότητα, η μάθηση και η τεχνολογία, δεν υπάρχουν αρκετές εφαρμογές (Irvine, 2018). Τα νέα αυτά πειραματικά εργαλεία μπορούν να αξιοποιηθούν στην κλινική πρακτική, στη βελτίωση εμφυτευμάτων και στρατηγικών αποκατάστασης, ενώ ταυτόχρονα να προσφέρουν βαθύτερη κατανόηση στη σχέση ανάμεσα στον ήχο και τον εγκέφαλο (Morucci et al., 2023; Hockley et al., 2025). Στόχος της παρούσας βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι να συγκεντρώσει και να αναλύσει τις υπάρχουσες μελέτες, να εντοπίσει τα ερευνητικά κενά και να προτείνει μελλοντικές κατευθύνσεις. Παράλληλα, επιχειρεί να αναδείξει όχι μόνο την επιστημονική αξία των χιμαιρικών ήχων, αλλά και τη σημασία του ήχου και της μουσικής στη

ζωή του ανθρώπου, τόσο για τη γνώση και την υγεία, όσο και για την καλλιτεχνική και συλλογική εμπειρία.

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην χμιαϊκούς ήχους

## 1.1. Τι είναι οι χμιαϊκοί ήχοι

Οι χμιαϊκοί ήχοι, όπως περιγράφονται στη μελέτη των Smith et al. (2002), αποτελούν τεχνητά συνθετικά ακουστικά ερεθίσματα, τα οποία δημιουργούνται με τον συνδυασμό δύο βασικών χαρακτηριστικών από διαφορετικούς ήχους. Συγκεκριμένα, οι ερευνητές παράγουν αυτούς τους ήχους εξάγοντας την περιβάλλουσα (envelope) που αποτυπώνει τις αργές και συνολικές διακυμάνσεις της έντασης, και τη λεπτοδομή (fine structure), που περιλαμβάνει τις γρήγορες και λεπτομερείς ταλαντώσεις του σήματος. Η διαδικασία ξεκινά με την επιλογή δύο διαφορετικών ακουστικών εισόδων, που μπορεί να είναι λόγος, μελωδίες ή άλλα σύνθετα σήματα, και στη συνέχεια κάθε ήχος διέρχεται από μια συστοιχία φίλτρων διέλευσης ζώνης (filter bank). Τα φίλτρα αυτά διαχωρίζουν τον ήχο σε συμπληρωματικές ζώνες συχνοτήτων, για παράδειγμα από 80 έως 8.820 Hz, με τον αριθμό των ζωνών να κυμαίνεται από 1 έως 64. Ο αριθμός αυτός καθορίζει τη φασματική ανάλυση. Ειδικότερα, λίγες ζώνες οδηγούν σε πιο απλοποιημένη αποτύπωση του σήματος, ενώ περισσότερες επιτρέπουν τη διατήρηση περισσότερων λεπτομερειών. Χρησιμοποιούνται μάλιστα φίλτρα τέλει ανακατασκευής (perfect-reconstruction), ώστε ο ανακατασκευασμένος ήχος να μην παρουσιάζει παραμόρφωση και να μιμείται τη φυσιολογική λειτουργία του κοχλίου.

Σε κάθε ζώνη εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Hilbert, ο οποίος επιτρέπει τον υπολογισμό του αναλυτικού σήματος και την εξαγωγή δύο κρίσιμων στοιχείων, την περιβάλλουσα, μέσω του μέτρου (magnitude), που αποτυπώνει τις αργές διακυμάνσεις πλάτους, και της λεπτοδομής, μέσω της στιγμιαίας φάσης, που περιγράφει τις γρήγορες ταλαντώσεις. Στη συνέχεια, στην ανασύνθεση του ήχου, η περιβάλλουσα του ενός σήματος συνδυάζεται με τη λεπτοδομή του άλλου μέσα σε κάθε ζώνη, δημιουργώντας έτσι συνδυασμένα χαρακτηριστικά που περιέχουν πληροφορίες και από τις δύο αρχικές πηγές. Τέλος, όλα τα σήματα από τις επιμέρους ζώνες αθροίζονται, ώστε να παραχθεί ο τελικός χμιαϊκός ήχος, ένας υβριδικός ήχος που συνδυάζει στοιχεία και από τις δύο εισόδους.

Η αντίληψη του τελικού σήματος από τον ακροατή, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των ζωνών. Δηλαδή, όταν έχουμε λίγες ζώνες δημιουργούνται ευρύτερες φασματικές ζώνες, στις οποίες κυριαρχεί ο ρόλος της περιβάλλουσας ή της συνολικής μορφής. Αντίστοιχα, οι περισσότερες ζώνες διατηρούν περισσότερες λεπτομέρειες της φασματικής δομής και της λεπτοδομής. Χάρη σε αυτή τη μεθοδολογία, οι χμιαϊκοί ήχοι αποτελούν ένα μοναδικό πειραματικό εργαλείο που επιτρέπει στους ερευνητές να απομονώνουν και να μελετούν την

επίδραση διαφορετικών πτυχών του ήχου στην ακουστική αντίληψη, όπως για παράδειγμα η κατανόηση της ομιλίας και η αναγνώριση του τονικού ύψους.

Σημαντικό είναι επίσης ότι δεν είναι όλοι οι ήχοι εξίσου κατάλληλοι για τη δημιουργία χμαιοικών ερεθισμάτων. Οι έρευνες δείχνουν ότι οι ήχοι που μένουν σταθεροί στον χρόνο, όπως το νερό που βράζει, η βροχή ή η φωτιά, είναι οι πιο κατάλληλοι για να δημιουργηθούν χμαιοικές συνθέσεις. Αυτοί οι ήχοι έχουν σταθερά χαρακτηριστικά, κάτι που επιτρέπει να αναπαράγονται εύκολα και να συνδυάζονται με πιο πολύπλοκους ήχους, όπως η ομιλία ή η μουσική. Αντίθετα, οι ήχοι που αλλάζουν συνεχώς, όπως η ίδια η ομιλία ή η μουσική, δεν δίνουν πειστικά χμαιοικά αποτελέσματα λόγω της περιπλοκότητάς τους (Koumura et al., 2020).

## 1.2. Ιστορική αναδρομή

Οι χμαιοικοί ήχοι προέκυψαν από τη σύνδεση της μαθηματικής ανάλυσης σήματος με τη μελέτη της ακουστικής αντίληψης. Το θεώρημα του Fourier (1829) εισήγαγε την ιδέα ότι κάθε σύνθετο σήμα μπορεί να αναλυθεί σε άθροισμα ημιτονοειδών κυμάτων, θέτοντας τα θεμέλια της φασματικής ανάλυσης του ήχου. Στη συνέχεια, ο μετασχηματισμός Hilbert (1912) προσέφερε ένα ακόμη πιο ισχυρό εργαλείο, επιτρέποντας την απομόνωση δύο κρίσιμων στοιχείων του σήματος, την περιβάλλουσα (envelope) και τη λεπτοδομή (fine structure). Αυτή η διάκριση είχε καθοριστική σημασία, καθώς άνοιξε τον δρόμο για πειραματικά ερεθίσματα που χειρίζονται ξεχωριστά αυτά τα δύο στοιχεία. Δημιουργήθηκε, έτσι το θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη των χμαιοικών ήχων (Smith et al., 2002).

Η θεωρητική αυτή πρόοδος στηρίχθηκε και σε φυσιολογικά δεδομένα, όπως οι μελέτες του Rhode et al. (1983), που έδειξαν τον τρόπο με τον οποίο οι νευρώνες του ακουστικού συστήματος ανταποκρίνονται στην περιβάλλουσα και τη λεπτοδομή. Παράλληλα, η αναγνώριση των οδών για το «τί» και το «πού» έδειξε ότι ο εγκέφαλος αξιοποιεί διαφορετικά κανάλια πληροφορίας για να επεξεργαστεί τον ήχο.

Η ιστορική αυτή πορεία από τα μαθηματικά του 19ου αιώνα έως τη νευροφυσιολογία του 20ού αιώνα διαμόρφωσε το επιστημονικό πλαίσιο που επέτρεψε τη δημιουργία και αξιοποίηση των χμαιοικών ήχων στη σύγχρονη ψυχοακουστική έρευνα. Επιπλέον, οι μεταγενέστερες μελέτες έδειξαν ότι οι νευρώνες και τα στάδια επεξεργασίας στον εγκέφαλο αντιμετωπίζουν την περιβάλλουσα και τη λεπτοδομή ως δύο ξεχωριστές αλλά σημαντικές πτυχές της επεξεργασίας του ήχου. Αυτό σημαίνει ότι στην αντίληψη η περιβάλλουσα και η λεπτοδομή αντιμετωπίζονται ως ξεχωριστές πληροφορίες. Παράλληλα, ο εγκέφαλος διαθέτει

εξειδικευμένα νευρικά συστήματα που έχουν αναπτυχθεί για να τα επεξεργάζονται και να τα αξιοποιούν σε διαφορετικές όψεις της ακουστικής εμπειρίας..

### **1.3. Αξία των χιμαιρικών ήχων**

Οι χιμαιρικοί ήχοι αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο με εφαρμογές που ξεπερνούν τα όρια της βασικής ψυχοακουστικής έρευνας. Ειδικότερα, στη νευροακουστική, προσφέρουν μοναδικές δυνατότητες για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ο εγκέφαλος επεξεργάζεται τον ήχο. Έτσι ενισχύεται μια πιο λεπτομερής μελέτη γύρω από την ενεργοποίηση των νευρωνικών δικτύων κατά την ακρόαση και την ομιλία. Η γνώση αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί στον σχεδιασμό πιο αποτελεσματικών ακουστικών εμφυτευμάτων, καθώς αναδεικνύει ποια χαρακτηριστικά του ήχου είναι καθοριστικά για την κατανόηση της ομιλίας. Με τον τρόπο αυτό, οι αλγόριθμοι κωδικοποίησης μπορούν να βελτιωθούν ώστε να προσφέρουν πιο καθαρή ακουστική εμπειρία, καλύτερη επικοινωνία σε θορυβώδη περιβάλλοντα και πιο φυσική απόδοση της μουσικής. Επιπλέον, στη σύγχρονη τεχνολογία, οι χιμαιρικοί ήχοι αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για την εκπαίδευση και αξιολόγηση αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος και τεχνητής νοημοσύνης, διευρύνοντας τις δυνατότητες της έρευνας. Τέλος, στο πεδίο της τέχνης, οι χιμαιρικοί ήχοι προσφέρουν νέες δυνατότητες για τον σχεδιασμό πολυδιάστατων και πολυαισθητηριακών εμπειριών που συνδέουν την επιστήμη, την τεχνολογία και την τέχνη.

## Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογία Ανασκόπησης

Η παρούσα εργασία ακολουθεί τα πρότυπα μιας χαρτογραφικής ανασκόπησης (scoping review). Στόχος είναι να χαρτογραφηθεί η υπάρχουσα βιβλιογραφία που αφορά τη χρήση των χημικών ήχων στην ακουστική αντίληψη, τη γλωσσική επεξεργασία, τη μουσική, τη νευροτεχνολογία και τα εικαστικά περιβάλλοντα. Η μεθοδολογική προσέγγιση περιλαμβάνει τον εντοπισμό, την επιλογή, την αξιολόγηση και τη θεματική ταξινόμηση των πηγών.

### 2.1. Αναζήτηση Βιβλιογραφίας

Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε σε επιστημονικές βάσεις δεδομένων όπως PubMed, Scopus, SpringerLink, Web of Science, IEEE Xplore και Google Scholar. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν repositories πανεπιστημίων, έγκριτα περιοδικά (π.χ. *Nature Neuroscience*, *Journal of the Acoustical Society of America*, *Frontiers in Neuroscience*), καθώς και preprint servers (π.χ. arXiv, bioRxiv).

#### Όροι και Λέξεις-Κλειδιά

**Auditory Scene Analysis (ASA):** Θεωρία που περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο ο εγκέφαλος διαχωρίζει τα ακουστικά ερεθίσματα σε μεμονωμένους ήχους (Bregman, 1994).

#### Bottom-up και Top-down μηχανισμοί:

*Bottom-up:* Επεξεργασία που ξεκινά από τα φυσικά χαρακτηριστικά του ήχου και ανεβαίνει στα ψηλότερα κέντρα του εγκεφάλου προκειμένου να τα ομαδοποιήσει

*Top-down:* Επεξεργασία που βασίζεται στην υπάρχουσα γνώση, τις προσδοκίες, τη μνήμη και την προσοχή, και κατεβαίνει έτσι ώστε να βοηθήσει τη σωστή ακουστική αντίληψη (Alain et al., 2001).

**Cross-modal interactions (δια-αισθητηριακές αλληλεπιδράσεις):** Αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε διαφορετικά αισθητηριακά συστήματα. Τα ερεθίσματα μιας αίσθησης επηρεάζουν ή ενισχύουν την επεξεργασία μιας άλλης (Bavelier & Neville, 2002· Anderson et al., 2017).

**EEG (Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα):** Μη επεμβατική μέθοδος καταγραφής της ηλεκτρικής δραστηριότητας του εγκεφάλου με υψηλή χρονική ανάλυση. (Luck, 2005).

**Envelope (Περιβάλλουσα):** Το περίβλημα ενός ηχητικού σήματος, που αντιπροσωπεύει τις πιο αργές διακυμάνσεις της έντασης στον χρόνο και παίζει κρίσιμο ρόλο στην κατανόηση της ομιλίας (Smith et al., 2002).

**Fine Structure (Λεπτοδομή):** Οι γρήγορες ταλαντώσεις του ηχητικού σήματος σε μικρά χρονικά διαστήματα. Είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αντίληψη της μελωδίας και του ύψους στη μουσική (Xu & Pfingst, 2003).

**fMRI (Λειτουργική Μαγνητική Τομογραφία):** Μέθοδος που εντοπίζει την εγκεφαλική δραστηριότητα μέσω μεταβολών των επιπέδων οξυγόνου του αίματος. Η χαρτογράφηση αυτή του εγκεφάλου παρέχει πληροφορίες για τον ακριβή εντοπισμό περιοχών του ακουστικού φλοιού (Talavage et al., 2004).

**Locus Coeruleus (LC, Blue spot, κυανούς πυρήνας):** Πυρήνας του εγκεφαλικού στελέχους ο οποίος αποτελεί κύρια πηγή νοραδρεναλίνης. Ρυθμίζει την προσοχή, την εγρήγορση και τη νευροπλαστικότητα (Glennon et al., 2023).

**MEG (Μαγνητοεγκεφαλογραφία):** Μέθοδος που καταγράφει την εγκεφαλική δραστηριότητα μέσω του εντοπισμού μαγνητικών πεδίων που παράγονται από τους νευρώνες. (Mäkelä et al., 1987).

**Neuroplasticity (Νευροπλαστικότητα):** Η ικανότητα του εγκεφάλου να προσαρμόζεται και να αναδιοργανώνεται με βάση την εμπειρία και την εκπαίδευση. Επιτρέπει την εκμάθηση νέων δεξιοτήτων και την αποκατάσταση μετά από βλάβη (Irvine, 2018).

**Place coding (Χωρική κωδικοποίηση):** Μηχανισμός με τον οποίο το ακουστικό σύστημα αντιστοιχίζει διαφορετικές συχνότητες ήχου σε διαφορετικές θέσεις στον κοχλία και στον ακουστικό φλοιό (Evans, 1993).

**Predictive coding (Προγνωστική κωδικοποίηση):** Θεωρία που υποστηρίζει ότι ο εγκέφαλος μπορεί να προβλέπει τί θα ακούσει, συγκρίνοντας τις προσδοκίες με τα πραγματικά ερεθίσματα και προσαρμόζοντας τις γνωστικές του δομές (Rao & Ballard, 1999· Denham & Winkler, 2020).

**Temporal coding (Χρονική κωδικοποίηση):** Μηχανισμός με τον οποίο ο εγκέφαλος κωδικοποιεί πληροφορίες της συχνότητας μέσα από τον ρυθμό με τον οποίο εκφορτίζονται οι νευρώνες. (Kayser et al., 2007).

Η αναζήτηση βασίστηκε σε μερικούς από τους προηγούμενους ορούς παράλληλα με συνδυασμούς λέξεων-κλειδιών όπως:

- “chimeric sounds”, “auditory chimera”
- “auditory perception”, “speech processing”, “fine structure”, “temporal envelope”
- “neuroplasticity”, “brain-computer interface”, “auditory cortex”
- “sonification”, “auditory training”, “sound illusions”
- “music perception”, “VR/AR auditory interfaces”

## 2.2. Κριτήρια Ενσωμάτωσης και Αποκλεισμού

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν πηγές που σχετίζονται άμεσα με τους χιμαιρικούς ήχους και τις εφαρμογές τους. Επιλέχθηκαν τόσο πρωτογενείς όσο και δευτερογενείς μελέτες,

από εμπειρικά άρθρα και ανασκοπήσεις μέχρι θεωρητικές προσεγγίσεις, σε πεδία όπως η νευροεπιστήμη, η γλωσσολογία, η μουσική τεχνολογία, τα BCI και τα περιβάλλοντα VR/AR. Προτιμήθηκαν πηγές με σαφή μεθοδολογία και τεκμηριωμένη επιστημονική βάση. Αντίθετα, δεν συμπεριλήφθηκαν μελέτες που δεν αφορούσαν την ακουστική επεξεργασία ούτε πηγές χαμηλής αξιοπιστίας, όπως άρθρα χωρίς peer review ή με ελλιπή περιγραφή της μεθοδολογίας. Τέλος, στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι έρευνες που επιλέχθηκαν για τους χιμαιρικούς ήχους.

Πίνακας 1. Έρευνες σχετικά με τους χιμαιρικούς ήχους

Συγγραφείς	Έτος δημοσίευσης	Τίτλος	Θεματική κατηγορία	Αντικείμενο έρευνας
Smith et al.	2002	<i>Chimaeric sounds reveal dichotomies in auditory perception.</i> Nature, 416(6876), 87-90.	Ψυχοακουστική Γλωσσολογία Τέχνη	Θεμελιώδης έρευνα που εισάγει τους χιμαιρικούς ήχους, δείχνοντας τον διαχωρισμό ανάμεσα σε περιβάλλουσα και λεπτοδομή στην ακουστική αντίληψη.
Heinz, & Swaminathan.	2009	<i>Quantifying envelope and fine-structure coding in auditory nerve responses to chimaeric speech.</i> JARO, 10(3), 407-423.	Ψυχοακουστική Τεχνολογία	Εξετάζει πώς το ακουστικό νεύρο κωδικοποιεί περιβάλλουσα και λεπτοδομή σε χιμαιρικό λόγο, με έμφαση στη νευροφυσιολογική απόκριση.
Prinsloo & Lalo	2022	<i>General auditory and speech-specific contributions to cortical envelope tracking revealed using auditory chimeras.</i> Journal of Neuroscience, 42(41), 7782-7798.	Ψυχοακουστική Γλωσσολογία Τεχνολογία	Χρησιμοποιεί χιμαιρικούς ήχους για να διερευνήσει την αλληλεπίδραση μεταξύ γενικών ακουστικών και εξειδικευμένων μηχανισμών λόγου στον εγκεφαλικό συγχρονισμό με το περιβάλλον.
Jeng, et al.	2016	<i>Pitch perception and frequency-following responses elicited by lexical-tone chimeras.</i> Int. J. Audiol., 55(1), 53-63.	Γλωσσολογία	Μελετά την αντίληψη τόνου και τις νευροηλεκτρικές αποκρίσεις σε λεξικούς-τονικούς χιμαιρικούς ήχους, με έμφαση στη γλωσσική επεξεργασία.
Jeng et al.	2021	<i>Separating the Novel Speech Sound Perception of Lexical Tone Chimeras From Their Auditory Signal Manipulations: Behavioral and Electroencephalographic Evidence.</i>	Τεχνολογία	Δείχνει με πειράματα και EEG πώς οι ακροατές καταλαβαίνουν χιμαιρικούς τόνους πέρα από τις τεχνικές αλλαγές του σήματος.
Shan et al.	2024	<i>Chimeric music reveals an interaction of pitch and time in electrophysiological signatures of music encoding.</i>	Τέχνη	Εφαρμόζει τη μέθοδο των χιμαιρικών ήχων στη μουσική, δείχνοντας πώς ο εγκέφαλος συνδυάζει πληροφορίες χρόνου και ύψους στον κωδικοποιημένο ήχο.
Di Bona	2022	<i>Hearing chimeras.</i> Synthese, 200(3), 257.	Τέχνη	Φιλοσοφική και εννοιολογική ανάλυση της σημασίας των χιμαιρικών ήχων για την κατανόηση της ακουστικής εμπειρίας και της φύσης της αντίληψης.
Siedenburg et al.	2016	<i>Acoustic and categorical dissimilarity of musical timbre: Evidence from asymmetries between acoustic and chimeric sounds.</i> Front. Psychol., 6, 1977.	Τέχνη	Μελετά πώς αντιλαμβανόμαστε το ηχόχρωμα στη μουσική, συγκρίνοντας κανονικούς και χιμαιρικούς ήχους.

### 2.3. Οργάνωση της Πληροφορίας

Οι επιλεγμένες πηγές οργανώθηκαν γύρω από τέσσερις βασικούς θεματικούς άξονες.

1. Ο πρώτος αφορά τις νευροεπιστήμες και την ψυχοακουστική, όπου εξετάζονται οι θεμελιώδεις μηχανισμοί ακουστικής επεξεργασίας, η νευροπλαστικότητα και οι μορφές εμπειρικής προσαρμογής, αλλά και πιο σύνθετα φαινόμενα όπως οι ακουστικές ψευδαισθήσεις και οι παραληρητικές εμπειρίες. Μέσα από αυτόν τον άξονα φωτίζονται οι τρόποι με τους οποίους ο εγκέφαλος αντιλαμβάνεται, οργανώνει και μεταβάλλει την ακουστική του λειτουργία.
2. Ο δεύτερος άξονας επικεντρώνεται στη γλωσσική επεξεργασία και την αντίληψη της ομιλίας. Εκεί μελετώνται η φωνητική αντίληψη και οι μηχανισμοί που στηρίζουν την επεξεργασία λόγου, η κατανόηση σε συνθήκες παραμόρφωσης ή θορύβου, καθώς και οι διαγλωσσικές και πολιτισμικές διαφορές στην αντίληψη της γλώσσας.
3. Ο τρίτος άξονας αφορά την τεχνολογία και τις διεπαφές εγκεφάλου–υπολογιστή. Ειδικότερα, συζητούνται οι μέθοδοι ακουστικής αποκωδικοποίησης με χρήση τεχνητής νοημοσύνης, οι διεπαφές και οι adaptive τεχνολογίες, οι νευροτεχνολογικές εφαρμογές και η ακουστική ανάλυση σήματος, αλλά και η χρήση της τεχνολογίας στην αισθητηριακή αποκατάσταση και στη θεραπευτική πράξη.
4. Τέλος, ο τέταρτος άξονας περιλαμβάνει την τέχνη, τη μουσική και τα ηχητικά περιβάλλοντα, αναδεικνύοντας πώς τα timbres και τα χημειρικά ηχοχρώματα αξιοποιούνται στη μουσική ανάλυση, πώς οι ήχοι συμβάλλουν στη συναισθηματική επίδραση του κινηματογράφου, πώς ενσωματώνονται σε εικονικά και επαυξημένα περιβάλλοντα, αλλά και πώς λειτουργούν σε διαδραστικά ηχητικά έργα που εμπλουτίζουν την ακουστική εμπειρία στην τέχνη.

Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται συνοπτικά ο αριθμός ερευνών που χρησιμοποιήθηκαν στην βιβλιογραφική ανασκόπηση ανά άξονα.

*Πίνακας 1. Αναφορές ανά άξονα*

Άξονας	Αριθμός αναφορών	Κοινές αναφορές
Νευροεπιστήμη	69	4
Γλωσσολογία	55	3
Τεχνολογία και διεπαφές	81	3

## Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 3.1. Νευροεπιστήμες και Ψυχοακουστική

Η ακοή δεν αποτελεί απλώς τη φυσική ανίχνευση ήχων από το αυτί, αλλά μια σύνθετη διεργασία που περιλαμβάνει τη συνεργασία περιφερικών και κεντρικών μηχανισμών. Οι νευροεπιστήμες προσφέρουν τα απαραίτητα μέσα για να κατανοήσουμε πώς ο εγκέφαλος κωδικοποιεί, οργανώνει και ερμηνεύει τα ακουστικά σήματα. Η ψυχοακουστική διερευνά τον τρόπο με τον οποίο τα σήματα γίνονται αντιληπτά και βιώνονται από τον άνθρωπο.

Η μελέτη αυτών των διεργασιών έχει αποκαλύψει ότι η ακουστική αντίληψη στηρίζεται σε πολλαπλά επίπεδα επεξεργασίας. Κάποια από αυτά είναι, η ανάλυση του ήχου στον κοχλία, η φλοιϊκή οργάνωση των συχνοτήτων και η αλληλεπίδραση με γνωστικούς μηχανισμούς, όπως είναι η προσοχή και η μνήμη. Επιπλέον, η ακουστική εμπειρία δεν περιορίζεται σε μονοαισθητηριακές διεργασίες· πολυαισθητηριακές επιδράσεις, όπως η οπτική πληροφορία ή η αφή, παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της ακουστικής αντίληψης. Η ψυχοακουστική έρευνα έχει δείξει ότι ο εγκέφαλος δεν είναι παθητικός δέκτης, αλλά μπορεί να προβλέπει και να συνδυάζει τα εισερχόμενα ερεθίσματα με προηγούμενη εμπειρία. Έτσι διαμορφώνεται η ακουστική αντίληψη. Παράλληλα, η μελέτη φαινομένων όπως οι ακουστικές ψευδαισθήσεις και οι παραληρητικές ιδέες δείχνει τις αδυναμίες του ακουστικού συστήματος. Για παράδειγμα, η λειτουργία του ακουστικού συστήματος μπορεί να επηρεαστεί από σωματικές βλάβες ή νευρολογικές δυσλειτουργίες αποκαλύπτοντας έτσι τα όριά της.

Η ενότητα αυτή εισάγει τους θεμελιώδεις μηχανισμούς της ακουστικής επεξεργασίας και αναλύει τον ρόλο της νευροπλαστικότητας και της εμπειρικής προσαρμογής. Στη συνέχεια εξετάζει τις φυσιολογικές αλλά και τις παθολογικές όψεις της ακουστικής αντίληψης. Αυτό το θεωρητικό και ερευνητικό υπόβαθρο είναι απαραίτητο για την κατανόηση των εφαρμογών που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια.

#### 3.1.1. Θεμελιώδεις μηχανισμοί ακουστικής επεξεργασίας

Ο άνθρωπος επεξεργάζεται τον ήχο με μια διαδικασία η οποία έχει πολλά επίπεδα, ξεκινώντας από το αυτί και φτάνοντας μέχρι τον εγκέφαλο. Στο πρώτο στάδιο, μέσα στον κοχλία του αυτιού, υπάρχει μια μεμβράνη που λειτουργεί σαν φυσικό φίλτρο έτσι κάθε σημείο της ενεργοποιείται σε διαφορετικές συχνότητες. Οι χαμηλοί ήχοι ενεργοποιούν το ένα άκρο

της μεμβράνης, ενώ οι ψηλοί το άλλο. Έτσι, ο εγκέφαλος αναγνωρίζει ποιά συχνότητα ακούει. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται χωρική κωδικοποίηση (place coding) (Evans, 1993· Oxenham, 2018· Plack, 2023).

Στη συνέχεια, τα έξω τριχωτά κύτταρα μέσα στον κοχλία κάνουν τη διάκριση ακόμη πιο ακριβή, βελτιώνοντας την «ανάλυση» των ήχων. Το ακουστικό νεύρο μέσα από συγχρονισμένα ηλεκτρικά σήματα, μεταφέρει στον εγκέφαλο ποιές συχνότητες ακούγονται, αλλά και ποιος είναι ο ρυθμός τους. Ο μηχανισμός αυτός λέγεται χρονική κωδικοποίηση (temporal coding). Ο εγκέφαλος αξιοποιεί και τις δύο αυτές πληροφορίες μαζί, χωρική και χρονική, ώστε να μπορεί να ξεχωρίζει και να κατανοεί πολύπλοκα μοτίβα ήχου, όπως η μουσική ή η ομιλία.

Στον εγκέφαλο, οι ήχοι οργανώνονται με βάση την αρχή της Τονοτοπίας. Αυτό σημαίνει ότι περιοχές του ακουστικού φλοιού που βρίσκονται κοντά μεταξύ τους, ανταποκρίνονται σε παρόμοιες συχνότητες. Μελέτες με λειτουργική μαγνητική τομογραφία (fMRI) έχουν δείξει ότι υπάρχουν πολλοί τονοτοπικοί χάρτες στην έλικα του Heschl και σε άλλες περιοχές του κροταφικού λοβού. Μάλιστα, κάποιοι από αυτούς τους χάρτες εμφανίζουν κατοπτρική συμμετρία. Τα ευρήματα αυτά δείχνουν ότι η τονοτοπία αποτελεί ένα σταθερό και θεμελιώδες χαρακτηριστικό του ανθρώπινου ακουστικού φλοιού (Formisano et al., 2003· Talavage et al., 2004· Schönwiesner et al., 2005).

Η κατανόηση του πώς οργανώνεται η ακουστική επεξεργασία έχει προχωρήσει πολύ χάρη στον συνδυασμό διαφορετικών μεθόδων. Για παράδειγμα, η λειτουργική μαγνητική τομογραφία (fMRI) προσφέρει μεγάλη ακρίβεια στον χώρο και μας δείχνει πού ακριβώς στον εγκέφαλο ενεργοποιούνται περιοχές όταν ακούμε ήχους. Από την άλλη, μέθοδοι όπως το EEG και το MEG έχουν πολύ καλή χρονική ακρίβεια, καταγράφοντας τις αντιδράσεις του εγκεφάλου σε κλάσματα του δευτερολέπτου (Luck, 2005· Huang et al., 2020). Με αυτόν τον τρόπο βλέπουμε ότι λειτουργούν μαζί δύο είδη μηχανισμών. Οι bottom-up, όπου η πληροφορία «ανεβαίνει» από το αυτί προς τον εγκέφαλο, και οι top-down, κατά την οποία ο εγκέφαλος, επηρεάζει την επεξεργασία σε χαμηλότερα επίπεδα μέσω της προσοχής και των γνωστικών λειτουργιών. Ο συνδυασμός αυτών των δύο, βοηθά στην ανάλυση της ακουστικής σκηνής, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο ξεχωρίζουμε, οργανώνουμε και κατανοούμε τους ήχους που μας περιβάλλουν (Alain & Schultz, 2006).

Πέρα από τη χωρική και χρονική οργάνωση, η αντίληψη του ήχου στηρίζεται σε δύο βασικά ακουστικά στοιχεία, τον χρονικό φάκελο και την λεπτοδομή. Η περιβάλλουσα (envelope) περιλαμβάνει τις αργές αλλαγές της έντασης του σήματος και είναι καθοριστικός για την κατανόηση της ομιλίας. Αντίθετα, η λεπτοδομή (fine structure) αφορά τις γρήγορες διακυμάνσεις και είναι απαραίτητη για την αντίληψη της μελωδίας και των τονικών γλωσσών

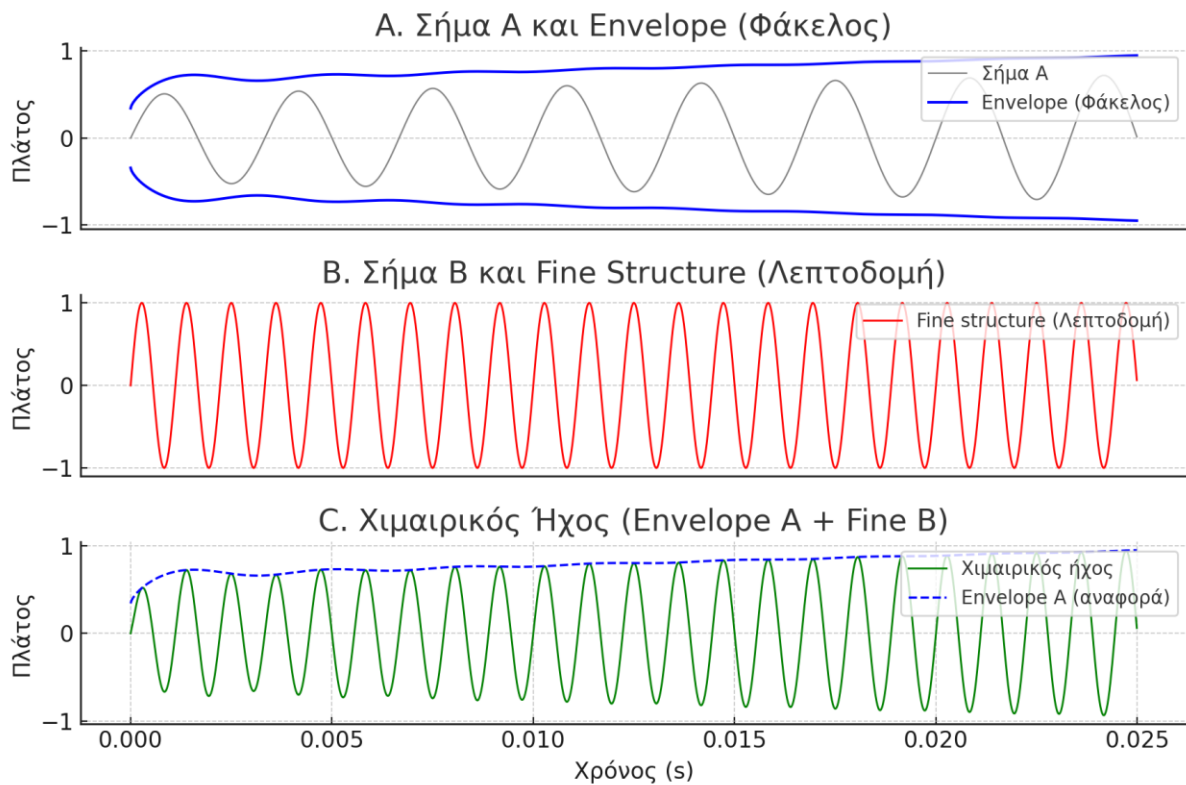
όπως είναι η Μανδαρινική Κινεζική γλώσσα (Xu & Pfingst, 2003· Heinz & Swaminathan, 2009· Siedenburg et al., 2023). Με τον συνδιασμό των παραπάνω, φαίνεται ότι ο εγκέφαλος χρησιμοποιεί πολλαπλές διαργασίες παράλληλα προκειμένου να αναπαραστήσει και να κατανοήσει τον ήχο.

Συνοψίζοντας, η λειτουργία της ακοής είναι μια πολύπλοκη συνεργασία μηχανισμών και όχι μια απλή πορεία των ήχων που φτάνουν στα αυτιά μας. Οι μηχανισμοί αυτοί ξεκινάνε από το φιλτράρισμα των συχνοτήτων στο αυτί και συνεχίζουν στις περιοχές του εγκεφάλου που οργανώνουν και ερμηνεύουν τους ήχους. Τέλος οι γνωστικές διεργασίες εμπλέκουν την προσοχή και τη μνήμη έτσι ώστε να μπορούμε όχι μόνο να αντιλαμβανόμαστε τις συχνότητες, αλλά και να ξεχωρίζουμε τα μοτίβα και το νόημα μέσα σε περίπλοκα ακουστικά περιβάλλοντα. Αυτό το υπόβαθρο αποτελεί τη βάση για να μελετήσουμε πιο σύνθετα φαινόμενα, όπως οι χιμαιρικοί ήχοι, και να αναπτύξουμε εφαρμογές που αγγίζουν τη γλώσσα, τη μουσική αλλά και την τεχνολογία επεξεργασίας ήχου.

### *3.1.2 Χρονική και Φασματική Επεξεργασία (Temporal Envelope & Fine Structure) & Χιμαιρικοί Ήχοι*

Η ακουστική αντίληψη βασίζεται στη συνεργασία δύο στοιχείων: του χρονικού φακέλου (envelope) και της λεπτοδομής (fine structure). Η περιβάλλουσα περιγράφει τις αργές αλλαγές στην ένταση του ήχου και είναι κρίσιμος για την κατανόηση της ομιλίας. Η λεπτοδομή περιλαμβάνει τις γρήγορες και λεπτές διακυμάνσεις και σχετίζεται με τη μουσική και το ύψος. Οι δύο μηχανισμοί λειτουργούν συμπληρωματικά. Η περιβάλλουσα είναι απαραίτητος για την αναγνώριση της ομιλίας, ενώ η λεπτοδομή καθορίζει την αντίληψη μελωδίας και τόνων, ιδιαίτερα σε τονικές γλώσσες όπως η μανδαρινική. Η λεπτοδομή σχετίζεται επίσης με την αίσθηση κίνησης και κατεύθυνσης του ήχου. Όταν λείπει, μειώνεται η αίσθηση ακουστικής κίνησης, όπως συμβαίνει σε χρήστες κοχλιακών εμφυτευμάτων που έχουν πρόσβαση μόνο στην περιβάλλουσα.

Οι χιμαιρικοί ήχοι βοήθησαν να αποσαφηνιστεί ο ρόλος της περιβάλλουσας και της λεπτοδομής. (Σχήμα 1)



Σχήμα 1. Δημιουργία χιμαιρικού ήχου από την περιβάλλουσα (envelope) του Σήματος A και τη λεπτοδομή (fine structure) του Σήματος B (Πηγή: Smith et al., 2002; Xu & Pfingst, 200 και ίδια επεξεργασία).

Η μεθοδολογία τους εισήχθη από τους Smith et al. (2002), οι οποίοι έδειξαν ότι η ομιλία εξαρτάται κυρίως από την περιβάλλουσα, ενώ η μουσική από τη λεπτοδομή. Οι Xu και Pfingst (2003) επιβεβαίωσαν ότι η λεπτοδομή είναι κρίσιμη και για τη γλωσσική επεξεργασία, ειδικά σε τονικές γλώσσες. Νεότερες μελέτες επέκτειναν αυτά τα ευρήματα. Οι Jeng et al. (2016) έδειξαν, με ηλεκτροφυσιολογικές μετρήσεις, ότι οι ακροατές μπορούν να αναγνωρίζουν ακουστικές χίμαιρες λεξικού τόνου στη Μανδαρινική γλώσσα, ενώ οι Jeng, Hart και Lin (2021) κατέδειξαν ότι ακόμη και νέοι φωνητικοί ήχοι διαφοροποιούνται όταν δημιουργούνται με χιμαιρικές τεχνικές. Οι μελέτες αυτές αποκάλυψαν διαφορετικές στρατηγικές επεξεργασίας μέσα στο ίδιο ακουστικό σύστημα.

Η έρευνα επεκτάθηκε και στο νευροφυσιολογικό επίπεδο όπου οι Heinz και Swaminathan (2009) έδειξαν ότι το ακουστικό νεύρο κωδικοποιεί με ακρίβεια την περιβάλλουσα ακόμη και σε χιμαιρικά ερεθίσματα. Ειδικότερα, έδειξαν ότι οι νευρικές ίνες που είναι υπεύθυνες για τις χαμηλές συχνότητες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στο να μεταφέρουν την πληροφορία της περιβάλλουσας. Σε περιπτώσεις βαρηκοΐας η ευκρίνεια του σήματος μειώνεται λόγω απώλειας των εξωτερικών τριχωτών κυττάρων. Επίσης, οι Prinsloo και Lalor (2022) έδειξαν ότι ο

ακουστικός φλοιός ανιχνεύει τις ρυθμικές αλλαγές της περιβάλλουσας της ομιλίας ακόμη και όταν αυτή δεν είναι κατανοητή. Από την άλλη όταν η ομιλία γίνεται κατανοητή, η παρακολούθηση εξειδικεύεται, αποκαλύπτοντας έτσι την αλληλεπίδραση χαμηλού και υψηλού επιπέδου μηχανισμών. Παράλληλα, η βραχυπρόθεσμη συναπτική πλαστικότητα λειτουργεί σαν δυναμικό φίλτρο που ρυθμίζει πώς οι συνάψεις μεταδίδουν την πληροφορία. Ανάλογα με τις συνθήκες, η μετάδοση μπορεί να ενισχυθεί ή να αποδυναμωθεί. Αυτό δίνει στο ακουστικό σύστημα την ευελιξία να συνδυάζει τη γρήγορη λεπτοδομή με τις πιο αργές μεταβολές της περιβάλλουσας. Συμπερασματικά, οι χιμαιρικοί ήχοι δείχνουν ότι ο εγκέφαλος αξιοποιεί διαφορετικούς μηχανισμούς για την ομιλία και για τη μουσική. Η περιβάλλουσα στηρίζει τη γλωσσική κατανόηση και τη ρυθμική οργάνωση, ενώ η λεπτοδομή είναι κρίσιμη για τη μελωδία, το ύψος και την κίνηση. Η τεκμηρίωση από μελέτες σε τονικές γλώσσες, σε συνδυασμό με τα νευροφυσιολογικά δεδομένα, αναδεικνύει τη σημασία της λεπτοδομής όχι μόνο στη θεωρητική κατανόηση αλλά και σε πρακτικές εφαρμογές, όπως η βελτίωση των στρατηγικών στα κοχλιακά εμφυτεύματα.

### *3.1.3. Ψυχοακουστική και Ανάλυση Ακουστικής Σκηνής: Οργάνωση της Αντίληψης, Πολυαισθητηριακές Επιδράσεις και ο Ρόλος της Πρόβλεψης*

Η Ανάλυση Ακουστικής Σκηνής (Auditory Scene Analysis, ASA) αποτελεί το θεωρητικό πλαίσιο με το οποίο εξηγείται πώς ο εγκέφαλος οργανώνει το ηχητικό περιβάλλον σε ξεχωριστά αντιληπτικά «αντικείμενα» (Bregman, 1994). Αυτή η διαδικασία είναι καθοριστική για την καθημερινή μας εμπειρία, αφού μας επιτρέπει να ξεχωρίζουμε φωνές, μουσικά όργανα ή ήχους του περιβάλλοντος ακόμη και σε θορυβώδεις συνθήκες, αντιμετωπίζοντας το γνωστό «cocktail party problem» (Moore, 2012). Με άλλα λόγια, η ASA δεν είναι μια απλή λήψη ήχων, αλλά ένας δυναμικός μηχανισμός οργάνωσης της ακουστικής αντίληψης.

Η έρευνα δείχνει ότι η οργάνωση αυτή προκύπτει από τη συνεργασία bottom-up μηχανισμών και top-down επιδράσεων. Οι πρώτοι βασίζονται στα φυσικά χαρακτηριστικά του σήματος, ενώ οι δεύτεροι συνδέονται με τη μνήμη, την προσοχή και τις προσδοκίες (Alain et al., 2001· Styles, 2006). Η θεωρία της προγνωστικής κωδικοποίησης (predictive coding) ενώνει αυτές τις δύο οπτικές. Αρχικά ο εγκέφαλος δημιουργεί συνεχώς υποθέσεις για τα ερεθίσματα που πρόκειται να δεχτεί και στη συνέχεια συγκρίνει τις προβλέψεις με την πραγματική είσοδο και τροποποιεί τα μοντέλα του ανάλογα με τα σφάλματα πρόβλεψης (Denham & Winkler, 2020). Έτσι, η ακουστική αντίληψη γίνεται μια ενεργή διαδικασία πρόβλεψης και ελέγχου.

Η σημασία αυτών των μηχανισμών φαίνεται καθαρά στην κατανόηση ομιλίας υπό δύσκολες ακουστικές συνθήκες. Οι Bidelman et al. (2020) έδειξαν ότι οι κατηγορίες ομιλίας παραμένουν αναγνωρίσιμες ακόμη και σε πολύ χαμηλά επίπεδα SNR, γεγονός που δείχνει πως ο εγκέφαλος δεν στηρίζεται μόνο σε λεπτομέρειες του σήματος αλλά οργανώνει τα ακουστικά ερεθίσματα σε πιο σταθερές κατηγορίες. Με άλλα λόγια, η ASA προσφέρει ανθεκτικότητα στην αντίληψη, ακόμη και όταν το σήμα είναι αλλοιωμένο.

Ωστόσο, η ακουστική αντίληψη δεν λειτουργεί μεμονωμένα, αλλά αλληλεπιδρά και με άλλες αισθήσεις. Έρευνες δείχνουν ότι τα νοητικά μοντέλα που δημιουργεί ο εγκέφαλος είναι κοινά και σε άλλες αισθήσεις, όπως η όραση. Ο εγκέφαλος χρησιμοποιεί παράλληλες νευρωνικές οδούς για να δώσει πληροφορίες για το «τι» και του «πού» (Kubovy & Van Valkenburg, 2001· Gazzaniga et al., 2006). Οπτικές εμπειρίες μπορούν να επηρεάσουν την ακουστική χωρική επεξεργασία, όπως φάνηκε σε μελέτες όπου το συγκεκριμένο και η εμπειρία όρασης άλλαξαν τον τρόπο χρήσης εσωτερικών και εξωτερικών συντεταγμένων στην ακοή (Crollen et al., 2019). Αυτά τα δεδομένα δείχνουν ότι η ASA είναι ουσιαστικά πολυαισθητηριακή.

Επομένως, η ψυχοακουστική και η ASA δείχνουν ότι η ακουστική αντίληψη δεν είναι απλώς η αντανάκλαση του ήχου. Είναι μια δυναμική και πολυεπίπεδη διαδικασία που συνδυάζει bottom-up και top-down διεργασίες, προβλέψεις, εμπειρία, πολυαισθητηριακή αλληλεπίδραση και κοινωνικό πλαίσιο. Με αυτόν τον τρόπο, η ακοή λειτουργεί ως μηχανισμός που στηρίζει ταυτόχρονα την επικοινωνία, τη μάθηση και την κοινωνική αλληλεπίδραση.

Από την άλλη πλευρά, η μελέτη της ακουστικής αντίληψης δείχνει ότι ο εγκέφαλος δεν περιορίζεται στην απλή ανάλυση των ήχων. Έχει ρόλο ενεργό και δημιουργεί συνεχώς προσδοκίες για τα επερχόμενα ερεθίσματα. Σύμφωνα με τη θεωρία της προγνωστικής κωδικοποίησης (predictive coding) συνδέονται ψυχοακουστικά και νευροφυσιολογικά δεδομένα προκειμένου ο εγκέφαλος να προβλέψει το σήμα με όσο το δυνατό καλύτερη πιστότητα (Rao & Ballard, 1999· Shamma & Micheyl, 2010· Denham & Winkler, 2020). Σύμφωνα με το μοντέλο των δύο οδών (dual-pathway model), ο ακουστικός φλοιός οργανώνεται σε δύο παράλληλες οδούς. Η Κοιλιακή Οδός (Ventral Pathway) σχετίζεται με το «τι», δηλαδή αφορά την αναγνώριση του νοήματος. Η Ραχιαία Οδός (Dorsal Pathway), από την άλλη, σχετίζεται με το «πού», δηλαδή τον χωρικό εντοπισμό του νοήματος και τη σύνδεση με την κίνηση (Wang et al., 2008). Ο πρωτογενής ακουστικός φλοιός (A1) αποτελεί την περιοχή στην οποία γίνεται η ενσωμάτωση των πληροφοριών από τα δύο αυτιά, δηλαδή της έντασης και χρόνου, και στη συνέχεια τις προωθεί για περαιτέρω ανάλυση στις δύο οδούς.

Η θεωρία της προγνωστικής κωδικοποίησης υποστηρίζει ότι ο εγκέφαλος μπορεί και προβλέπει το σήμα. Δημιουργεί μοντέλα για τα επερχόμενα ερεθίσματα, συγκρίνει την πραγματική είσοδο με τις προσδοκίες και αναθεωρεί τα μοντέλα του με βάση τα σφάλματα πρόβλεψης (prediction errors) (Rao & Ballard, 1999· Denham & Winkler, 2020). Μέσα από αυτή τη διαδικασία εξηγείται πώς οργανώνονται φαινόμενα όπως η ανάλυση ακουστικών ρευμάτων, η κατανόηση της ομιλίας σε θορυβώδες περιβάλλον και η αντίληψη ρυθμού. Η προγνωστική κωδικοποίηση δεν είναι στατική αλλά διαμορφώνεται από την εμπειρία και τις ανώτερες γνωστικές λειτουργίες. Η γλώσσα και η ρυθμική εκπαίδευση καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο ο εγκέφαλος προβλέπει τις ακουστικές ακολουθίες (Irvine, 2018· Morucci et al., 2023). Παράλληλα, η μνήμη και η προσοχή λειτουργούν ως μηχανισμοί top-down που ελέγχουν την ακουστική επεξεργασία, ενισχύοντας ή καταστέλλοντας σήματα ανάλογα με τη σημασία τους.

Νεότερες μελέτες με μαγνητοεγκεφαλογραφία (MEG) έδειξαν ότι η ακουστική επεξεργασία οργανώνεται σε ιεραρχικά δίκτυα μνήμης και πρόβλεψης, τα οποία συνδέουν τον ακουστικό φλοιό με περιοχές όπως ο υπόκαμπος και ο έλικας του προσαγωγίου (cingulate gyrus) (Bonetti et al., 2024). Έρευνες στη γλωσσική εμπειρία αποκάλυψαν ότι οι φυσικοί ομιλητές διαφορετικών γλωσσών παρουσιάζουν διαφοροποιημένα νευρωνικά πρότυπα κατά την ανίχνευση ρυθμικών αλλαγών (Morucci et al., 2023). Επιπλέον, οι Hockley et al. (2025) έδειξαν ότι ο μέσος προμετωπιαίος φλοιός (mPFC) μπορεί να ρυθμίζει τα σφάλματα πρόβλεψης στον ακουστικό φλοιό. Με αυτό τον τρόπο γίνεται αντιληπτό ότι οι ανώτερες περιοχές του εγκεφάλου δεν συμμετέχουν παθητικά αλλά καθοδηγούν ενεργά την ακουστική αντίληψη.

Παρά τη σημασία της προγνωστικής κωδικοποίησης, παραμένουν ανοιχτά ερωτήματα. Δεν είναι πλήρως γνωστό ποια δίκτυα εμπλέκονται στην υψηλού επιπέδου πρόβλεψη, πώς διαχωρίζονται τα σήματα προσαρμογής από την αυθεντική προγνωστική κωδικοποίηση, και πώς συνεργάζονται οι διαφορετικές χρονικές κλίμακες πρόβλεψης (Denham & Winkler, 2020). Ωστόσο, οι πρακτικές εφαρμογές είναι μεγάλες. Η προγνωστική κωδικοποίηση μπορεί να αξιοποιηθεί στην αποκατάσταση της ακοής, στη βελτίωση των κοχλιακών εμφυτευμάτων και στον σχεδιασμό νέων πειραματικών πρωτοκόλλων που συνδυάζουν ψυχοακουστικές και νευροαπεικονιστικές μεθόδους.

Συνοψίζοντας, μέσω της προγνωστικής κωδικοποίησης γίνεται αντιληπτό πώς ο εγκέφαλος οργανώνει, προβλέπει και κατανοεί τον ήχο. Η ακουστική αντίληψη είναι μια ενεργή διαδικασία που καθοδηγείται από την εμπειρία, τη μνήμη και τις γνωστικές λειτουργίες, με σημαντικές συνέπειες για τη θεωρητική και την εφαρμοσμένη έρευνα. Λαμβάνοντας υπόψη τα

παραπάνω, οι χιμαιρικοί ήχοι προσφέρουν ένα ισχυρό εργαλείο για να εξεταστεί η λειτουργία της προγνωστικής κωδικοποίησης. Όταν ο ήχος που φτάνει σαν είσοδος δεν ταιριάζει με τις προβλέψεις του εγκεφάλου, δημιουργείται ένα σφάλμα πρόβλεψης. Αυτό αναγκάζει το νευρωνικό δίκτυο να προσαρμοστεί γρήγορα. Οπότε, ο εγκέφαλος προσαρμόζει τον τρόπο που επεξεργάζεται και οργανώνει τα χαρακτηριστικά του ήχου, ώστε να βγάλει νόημα αυτό που ακούμε. Ο ακροατής ερμηνεύει αυτούς τους ήχους με βάση τις μακροπρόθεσμες εμπειρίες του. Παράλληλα, το βραχυπρόθεσμο συμφραζόμενο κατευθύνει τις προσδοκίες του για τον ρυθμό, τη διάρκεια και τη δομή του σήματος. Ανάλογα με τις προσδοκίες και τις ανάγκες της στιγμής, οι ανώτερες περιοχές του εγκεφάλου ρυθμίζουν το σφάλμα πρόβλεψης στον ακουστικό φλοιό. Έτσι, μπορούν είτε να κατευθύνουν την αντίληψη προς ένα ενιαίο ακουστικό «αντικείμενο», είτε να ενισχύσουν τον διαχωρισμό του ήχου σε πολλές ξεχωριστές ροές. Επομένως, οι χιμαιρικοί ήχοι αναδεικνύονται σε ένα εξαιρετικά χρήσιμο μέσο για να κατανοηθεί πώς η εμπειρία, η μνήμη και η προσοχή καθοδηγούν την οργάνωση, την πρόβλεψη και την ερμηνεία σύνθετων ακουστικών σκηνών.

#### 3.1.4 Νευροπλαστικότητα και εμπειρική προσαρμογή

Η νευροπλαστικότητα είναι η ικανότητα του εγκεφάλου να αλλάζει τις συνδέσεις των νευρώνων και να προσαρμόζεται στην εμπειρία, τη μάθηση και τις αλλαγές στο περιβάλλον (Pascual-Leone, Amedi, Fregni, & Merabet, 2005). Βασίζεται σε δύο μηχανισμούς, τη μακροπρόθεσμη ενδυνάμωση (LTP) και τη μακροπρόθεσμη ενδυνάμωση (LTD). Το LTP ενισχύει τις συνάψεις όταν ενεργοποιούνται συχνά και δυνατά, ενώ το LTD τις αποδυναμώνει μετά από διέγερση χαμηλής συχνότητας (Malenka & Bear, 2004). Η ισορροπία μεταξύ LTP και LTD είναι ζωτικής σημασίας καθώς ο όγκος των πληροφοριών που υπάρχουν στο νευρικό σύστημα πρέπει να είναι περιορισμένος ώστε να μην υπερφορτώνεται (Byrne, 2017).

Ακόμη, η ακουστική πλαστικότητα μπορεί να φανεί σε φλοιϊκό επίπεδο, όπου η στοχευμένη ακουστική εμπειρία μπορεί να αλλάξει σημαντικά τις αναπαραστάσεις στον πρωτογενή ακουστικό φλοιό (Merzenich et al. 1996). Η εκμάθηση της διάκρισης των συχνοτήτων οδηγεί σε ανακατανομή των χαρτών του φλοιού μέσω γνωστικών επιδράσεων, δείχνοντας ότι η πλαστικότητα δεν είναι παθητική αλλά καθοδηγείται από τη μάθηση (Polley, Steinberg και Merzenich (2006). Τα ευρήματα αυτά έδειξαν ότι η ακουστική αντίληψη μπορεί να βελτιωθεί ακόμη και στην ενήλικη ζωή, καθώς ο ακουστικός φλοιός παραμένει εξαιρετικά ευέλικτος.

Κατά την ανάπτυξη, η πλαστικότητα εντείνεται στις ευαίσθητες περιόδους. Τα πρώτα χρόνια της ανθρώπινης ζωής ο εγκέφαλος είναι ιδιαίτερα δεκτικός σε γλωσσικά και ακουστικά ερεθίσματα (Knudsen, 2004; Maurer & Lewis, 2007). Η πρώιμη έκθεση στους ήχους του περιβάλλοντος βοηθά τα βρέφη να βελτιώσουν την ακουστική τους επεξεργασία και μειώνει

τα προβλήματα που προκαλούνται από την έλλειψη φυσικού ήχου της μήτρας (Kuhl, 2004). Αυτό δείχνει ότι η ακουστική πλαστικότητα είναι ένας βιολογικός μηχανισμός αλλά και ευκαιρία για έγκαιρη παρέμβαση (McMahon, Wintermark και Lahav, 2012).

Η εμπειρία και η εκπαίδευση είναι βασικοί παράγοντες που τροφοδοτούν την ακουστική πλαστικότητα, δείχνοντας ότι το ακουστικό σύστημα παραμένει ικανό να προσαρμόζεται. Η ακουστική εκπαίδευση και η μουσική είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα όπου η εμπειρία φέρνει σημαντικές αλλαγές τόσο στον εγκέφαλο όσο και στη συμπεριφορά. Η στοχευμένη ακουστική εκπαίδευση αλλάζει τις νευρωνικές αποκρίσεις στον ακουστικό φλοιό, βελτιώνοντας τη διάκριση του ήχου και αναδιαμορφώνοντας τις ηλεκτροφυσιολογικές αναπαραστάσεις (Tremblay και Kraus, 2002; Tremblay, Shahin, Picton και Ross, 2009). Οι Kraus και Chandrasekaran (2010) τόνισαν ότι η ακουστική μάθηση συνδιάζει κινητικά και γνωστικά συστήματα, με το σύστημα ανταμοιβής να παίζει ρόλο στην απόκριση στους ήχους με βάση το αν τους βρίσκει ευχάριστους (Kraus και White-Schwoch, 2015).

Η μουσική εκπαίδευση είναι μια τυπική περίπτωση πλαστικότητας, που προκαλεί σημαντικές δομικές αλλαγές στον εγκέφαλο. Έρευνες έχουν δείξει ότι η μορφολογία της έλικας Heschl διαφέρει στους μουσικούς, όπου υπάρχει πιο έντονη ενεργοποίηση του ακουστικού φλοιού (Schneider et al., 2002). Η ενασχόληση με τη μουσική αυξάνει το πάχος του φλοιού ενώ επηρεάζει επίσης τη φαιά ουσία σε περιοχές που σχετίζονται με την ακουστική επεξεργασία (Bermudez, Lerch, Evans, & Zatorre, 2009). Η μουσική εκπαίδευση από την παιδική ηλικία οδηγεί σε μόνιμες αλλαγές στη δομή και τον τρόπο λειτουργίας του εγκεφάλου που παραμένουν έως την ενήλικη ζωή (Schneider et al., 2023).

Τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι η μουσική μπορεί να λειτουργήσει ως ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο νευροπλαστικής παρέμβασης. Σύμφωνα με τους Zendel και Alain (2012), η μακροχρόνια ενασχόληση με τη μουσική φαίνεται να προστατεύει την υγεία των εγκεφαλικών νευρώνων, ενισχύει τις γνωστικές λειτουργίες, προστατεύει από τη γήρανση και βελτιώνει τη συνδεσιμότητα της λευκής ουσίας. Ως αποτέλεσμα, η μουσική αναδεικνύεται ως ένα από τα πιο ισχυρά μοντέλα ακουστικής πλαστικότητας, επιβεβαιώνοντας ότι ο εγκέφαλος αλλάζει συνεχώς μέσω της εμπειρίας.

Η ακουστική πλαστικότητα είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση διαφορετικών αισθήσεων και την μεταξύ τους επιρροή, αποτελώντας έτσι τη βάση της ακουστικής μάθησης. Αυτή η πλαστικότητα μπορεί να αξιοποιηθεί και θεραπευτικά, καθώς αντισταθμίζει τις αισθητηριακές απώλειες και ενισχύει την απόδοση μέσω άλλων καναλιών πληροφοριών (Bavelier και Neville, 2002). Έχει βρεθεί ακόμα, ότι τα οπτικά ερεθίσματα μπορούν να επηρεάσουν τη δραστηριότητα σε συγκεκριμένα πεδία του

ακουστικού φλοιού, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτερη επεξεργασία (Kayser, Petkov, Augath, & Logothetis, 2007).

Η διέγερση του πνευμονογαστρικού νεύρου (VNS) είναι μια μέθοδος με σημαντικές προοπτικές, καθώς μπορεί να ενισχύσει την ακουστική μάθηση όταν συνδυάζεται με ήχους. Έχει αποδειχθεί ότι μειώνει τα συμπτώματα των εμβοών, αν και πολλές μελέτες έχουν αδυναμίες (Stegeman, Velde, Robe, Stokroos, Smit, 2021). Ωστόσο, το VNS έχει δυνατότητες σε περιπτώσεις όπου η πλαστικότητα του εγκεφάλου δεν λειτουργεί σωστά.

Η μουσική είναι ένα άλλο παράδειγμα πλαστικότητας στην ανάπτυξη και την αποκατάσταση. Οι Schlaug, Norton, Marchina, Zipse και Wan (2010) έδειξαν ότι μπορεί να ενεργοποιήσει εναλλακτικά νευρωνικά δίκτυα σε ασθενείς με αφασία, διευκολύνοντας την ανάκτηση ομιλίας. Η μουσικοθεραπεία χρησιμοποιεί τη συνεργασία ακουστικών, κινητικών και γνωστικών συστημάτων, καθιστώντας την αποτελεσματική ακόμη και σε σοβαρές νευρολογικές βλάβες. Σε περιπτώσεις μονόπλευρης κώφωσης, ο εγκέφαλος αναδιοργανώνει τη φλοιώδη δραστηριότητά του για να ενισχύσει το λειτουργικό αυτί (Shim, Kim, Kim, & Lee, 2025). Η ακουστική πλαστικότητα σε περιπτώσεις μονόπλευρης κώφωσης βελτιώνει την ικανότητα ανίχνευσης ή ένδειξης ότι η προσαρμοστικότητα του ακουστικού συστήματος παραμένει ενεργή ακόμη και μετά από σοβαρή απώλεια ακοής.

Συμπερασματικά, η ακουστική πλαστικότητα είναι μια πολύπλευρη διαδικασία που μπορεί να καλλιεργηθεί και να αξιοποιηθεί για τη βελτίωση της ακουστικής λειτουργίας σε διαφορετικούς πληθυσμούς. Οι Moucha, Pandya, Engineer, Rathbun και Kilgard (2005) έδειξαν ότι ακόμη και η καθημερινή ακουστική εμπειρία μπορεί να επηρεάσει τη διαμόρφωση της αντίληψης.

Οι χιμαιρικοί ήχοι λειτουργούν ως εργαλείο έρευνας και εφαρμογής. Δείχνουν ότι η μελέτη της ακουστικής νευροπλαστικότητας δεν μπορεί να βασίζεται μόνο σε φυσικά ερεθίσματα. Χρειάζονται και ελεγχόμενα μέσα που να αποκαλύπτουν πώς ο εγκέφαλος προσαρμόζεται σε νέα ή σύνθετα ακουστικά περιβάλλοντα. Έτσι, οι χιμαιρικοί ήχοι προσφέρουν εκπληκτικές δυνατότητες για την κατανόηση αλλά και για την αξιοποίηση της πλαστικότητας. Οι Smith, Delgutte και Oxenham (2002) έδειξαν ότι με την ανταλλαγή φασματικών και χρονικών στοιχείων ανάμεσα σε δύο ηχητικά σήματα μπορούν να δημιουργηθούν υβριδικά ερεθίσματα που άλλοτε γίνονται αντιληπτά ως ομιλία και άλλοτε ως θόρυβος. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο του ποια χαρακτηριστικά φτάνουν στον ακροατή και πώς αυτά κινητοποιούν τους μηχανισμούς της πλαστικότητας (Heinz & Swaminathan, 2009). Με αυτόν τον τρόπο γεφυρώνουν τα απλά εργαστηριακά ερεθίσματα με τα πολύπλοκα φυσικά σήματα. Μελέτες στην ακουστική εκπαίδευση έχουν δείξει ότι η συστηματική έκθεση σε

σύνθετα αλλά ελεγχόμενα ερεθίσματα μπορεί να προκαλέσει αναδιοργάνωση του ακουστικού φλοιού και βελτίωση της διάκρισης ήχων (Polley, Steinberg, & Merzenich, 2006· Irvine, 2018).

Σε αυτό το πλαίσιο, οι χιμαιρικοί ήχοι αποδεικνύουν ότι ο εγκέφαλος προσαρμόζει τις νευρωνικές του στρατηγικές για να κωδικοποιήσει και τους δύο τύπους, επιτρέποντάς μας να αντιλαμβανόμαστε τόσο τις γενικές πληροφορίες όσο και τις ακριβείς λεπτομέρειες ενός ήχου. (Prinsloo & Lalor, 2022). Οι χιμαιρικοί ήχοι αξιοποιούνται ακόμη, στη μελέτη της ανάπτυξης. Επειδή μιμούνται τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει το ακουστικό σύστημα όταν η γλώσσα αλληλεπικαλύπτεται με άλλους ήχους, βοηθούν να κατανοηθεί πώς τα παιδιά μαθαίνουν να διαχωρίζουν φασματικές και χρονικές πληροφορίες (Kuhl, 2004· McMahon, Wintermark, & Lahav, 2012). Η χρήση τους συνδέεται και με σύγχρονες θεωρίες για την προγνωστική κωδικοποίηση. Σύμφωνα με αυτές, ο εγκέφαλος δημιουργεί συνέχεια προβλέψεις για τα ηχητικά μοτίβα και δεν περιορίζεται απλά στα εισερχόμενα ερεθίσματα (Denham & Winkler, 2020· Morucci et al., 2024· Hockley, Bohórquez, & Malmierca, 2025). Σε κλινικά πλαίσια, οι χιμαιρικοί ήχοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ακουστική εκπαίδευση. Συγκεκριμένα μπορούν να παρέχουν σταδιακά όλο και πιο απαιτητικά ερεθίσματα αξιοποιώντας έτσι, τη φυσική πλαστικότητα του εγκεφάλου. Ακόμη, μπορούν να παρέχουν ιδιαίτερα σημαντικές πληροφορίες σε περιπτώσεις παιδιών με αναπτυξιακές διαταραχές (Hu et al., 2025) αλλά και για ενήλικες που χρησιμοποιούν κοχλιακά ή εγκεφαλικά εμφυτεύματα (Zhang et al., 2025). Η σταδιακή εξοικείωση με χιμαιρικά ερεθίσματα μπορεί να ενισχύσει την ικανότητα αναγνώρισης κρίσιμων ακουστικών μοτίβων, διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο την αποκατάσταση.

Οι χιμαιρικοί ήχοι δεν αποτελούν απλώς ένα τεχνητό πείραμα του εργαστηρίου, αλλά συνδέουν τη θεωρία με την πράξη. Βοηθούν να κατανοήσουμε βασικούς μηχανισμούς της ακουστικής πλαστικότητας (Smith et al., 2002· Heinz & Swaminathan, 2009· Prinsloo & Lalor, 2022), αλλά αποτελούν και σημαντικό εργαλείο για εκπαιδευτικά και θεραπευτικά προγράμματα (Hu et al., 2025· Zhang et al., 2025). Με αυτόν τον τρόπο δείχνουν ξεκάθαρα πώς η ελεγχόμενη ακουστική εμπειρία μπορεί να αλλάξει ουσιαστικά τη λειτουργία του εγκεφάλου.

### *3.1.5. Ακουστικές Ψευδαισθήσεις και Ακουστικές Παραληρητικές Ιδέες (Auditory Hallucinations and Auditory Delusions)*

Οι ακουστικές ψευδαισθήσεις είναι εμπειρίες ήχων ή φωνών που ένα άτομο αντιλαμβάνεται χωρίς αντίστοιχο εξωτερικό ερέθισμα. Κυμαίνονται από απλούς ήχους έως σύνθετες λεκτικές φράσεις. Αυτές οι εμπειρίες μπορούν να προκληθούν σε υγιή άτομα υπό συνθήκες

αισθητηριακής ανεπάρκειας ή γνωστικής υπερφόρτωσης (Faramarzi et al., 2021). Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα πρότυπα EEG που καταγράφονται κατά τη διάρκεια των παραισθήσεων είναι παρόμοια με αυτά που παρατηρούνται στην πραγματική ακουστική αντίληψη. Αυτό υποδηλώνει ότι ο ίδιος ο ακουστικός φλοιός μπορεί να παράγει την εμπειρία ενός ήχου ακόμη και χωρίς κανένα ερέθισμα.

Οι ακουστικές παραληρητικές ιδέες αφορούν τη γνωστική διάσταση της εμπειρίας, όπου το άτομο δίνει νόημα στους ίδιους τους ήχους, για παράδειγμα, πιστεύοντας ότι οι φωνές του μεταφέρουν μηνύματα ή εντολές. Το σημαντικό στοιχείο δεν είναι η αισθητική εμπειρία, αλλά ο τρόπος με τον οποίο το άτομο την ερμηνεύει. Έτσι, οι παραληρητικές ιδέες εντάσσονται περισσότερο στον τομέα της γνωστικής ψυχοπαθολογίας, ενώ οι ψευδαισθήσεις σχετίζονται με την αισθητηριακή επεξεργασία.

Στη μελέτη της ακουστικής αντίληψης, οι ακουστικές ψευδαισθήσεις (illusions) έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το ερέθισμα υπάρχει, αλλά ο εγκέφαλος το παρερμηνεύει. Για παράδειγμα, όταν δυσκολευόμαστε να διακρίνουμε την κατεύθυνση ενός ήχου σε έντονο θόρυβο, η ψυχοακουστική έχει δείξει πιο σύνθετες περιπτώσεις, όπου ο συνδυασμός διαφορετικών συχνοτήτων και χωρικής θέσης δημιουργεί παραμορφώσεις στην αντίληψη (Filimon, 2024). Η θεωρία της ακουστικής ανάλυσης σκηνης έχει δείξει ότι οι απάτες δεν θεωρούνται «παθολογικές», αλλά δείχνουν τα όρια και τις στρατηγικές του ακουστικού συστήματος (Bregman, 1990).

Η διάκριση μεταξύ αυτών των τριών κατηγοριών, δηλαδή ψευδαισθήσεις, παραληρητικές ιδέες και παραπλανήσεις, είναι απαραίτητη, καθώς δείχνει ότι η απόκλιση από την «αντικειμενική» πραγματικότητα μπορεί να οφείλεται είτε σε νευροφυσιολογικούς-λογικούς μηχανισμούς (όπως η εσωτερική ενεργοποίηση του ακουστικού φλοιού), είτε σε γνωστικές αποδόσεις νοήματος, είτε απλώς σε φυσικούς περιορισμούς επεξεργασίας. Οι ακουστικές ψευδαισθήσεις δεν είναι απλώς «φανταστικοί ήχοι» αλλά προκύπτουν από πολύπλοκες εγκεφαλικές αλληλεπιδράσεις. Η έρευνα του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος (EEG) έδειξε ότι κατά τη διάρκεια των παραισθήσεων τα πρότυπα της εγκεφαλικής δραστηριότητας μοιάζουν με αυτά που παρατηρούνται στην πραγματική ακοή (Faramarzi et al., 2021).

Η θεωρία της προγνωστικής κωδικοποίησης (predictive coding) μας βοηθά να κατανοήσουμε τα παραπάνω φαινόμενα. Σύμφωνα με αυτήν, ο εγκέφαλος δεν επεξεργάζεται απλώς ερεθίσματα, αλλά προβλέπει συνεχώς τι πρόκειται να ακούσει με βάση την προηγούμενη εμπειρία. Όταν οι εισερχόμενες πληροφορίες έρχονται σε αντίθεση με την πρόβλεψη, δημιουργείται ένα "σφάλμα πρόβλεψης". Στις περιπτώσεις ακουστικών ψευδαισθήσεων, ο εγκέφαλος βασίζεται περισσότερο στη δική του πρόβλεψη παρά στο ίδιο το

ερεθίσμα. Έτσι κατασκευάζεται μια ψευδής αντίληψη (Schilling et al., 2022; Stein, von Kriegstein, & Tabas, 2021).

Οι διααισθητηριακές αλληλεπιδράσεις (cross-modal interactions) παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο. Σύμφωνα με το φαινόμενο McGurk, το στόμα που βλέπουμε μπορεί να αλλάξει το φώνημα που νομίζουμε ότι ακούμε. Νεότερες μελέτες επιβεβαιώνουν ότι οι οπτικές πληροφορίες μπορούν να επηρεάσουν τα νευρωνικά μοτίβα στον ακουστικό φλοιό (Oroku-Baah et al., 2021· Shams & Kim, 2010). Έτσι, οι ακουστικές ψευδαισθήσεις δεν είναι πάντα αποτέλεσμα λάθους, αλλά πιθανότατα προϊόν του τρόπου με τον οποίο ο εγκέφαλος συνδυάζει δεδομένα από πολλές αισθήσεις για να δημιουργήσει μια ολοκληρωμένη εμπειρία.

Οι top-down διεργασίες, δηλαδή οι γνωστικές προσδοκίες και η προσοχή, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την εμφάνιση και τη μορφή των ψευδαισθήσεων. Συγκεκριμένα, ο εγκέφαλος θα επιλέξει να παράγει μια λανθασμένη αντίληψη αντί να αφήσει το άτομο χωρίς καμία ηχητική εμπειρία. Η μελέτη ακουστικών ψευδαισθήσεων, όπως οι Shepard tones (Shepard, 1964), η scale illusion (Deutsch, 1986) και οι Zwicker tones (Kuriki, Yokosawa, & Takahashi, 2013), αποκαλύπτει τους μηχανισμούς με τους οποίους ο εγκέφαλος οργανώνει και ερμηνεύει τον ήχο. Τα φαινόμενα αυτά δείχνουν ότι η ακουστική αντίληψη δεν βασίζεται αποκλειστικά στα φυσικά ερεθίσματα, αλλά στη γνωστική οργάνωση και συμπλήρωση που εφαρμόζει ο ακουστικός φλοιός. Η έρευνα για την ακουστική ροή, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο ο εγκέφαλος χωρίζει τα ηχητικά σήματα σε «ροές», έχει επίσης παίξει σημαντικό ρόλο. Τέλος, η continuity illusion, γνωστή και ως «ψευδαίσθηση συνέχειας», διερευνάται στη θεωρία της ανάλυσης ακουστικής σκηνής (Bregman, 1984· 1990). Σύμφωνα με αυτή, ένας ήχος που διακόπτεται από θόρυβο γίνεται αντιληπτός ως συνεχόμενος. Όλα αυτά τα παραδείγματα υπογραμμίζουν τον ίδιο βασικό κανόνα: ο εγκέφαλος δεν είναι παθητικός δέκτης ήχων, αλλά ενεργός οργανωτής.

Όσον αφορά τους χιμαιρικούς ήχους, οι ακουστικές ψευδαισθήσεις μοιάζουν σε πολλά σημεία με τα πειράματα που τους χρησιμοποιούν. Συγκεκριμένα, και στις δύο περιπτώσεις, ο εγκέφαλος έρχεται αντιμέτωπος με «μπερδεμένα» ή ατελή στοιχεία και προσπαθεί να τα μετατρέψει σε κάτι που να έχει νόημα. Στις ψευδαισθήσεις, όπως η scale illusion ή οι Zwicker tones, ο ακροατής αντιλαμβάνεται μια μελωδία ή έναν τόνο που στην πραγματικότητα δεν υπάρχει. Αντίστοιχα, οι χιμαιρικοί ήχοι αναγκάζουν το ακουστικό σύστημα να αποφασίσει ποια πληροφορία θα κρατήσει (το φάσμα ή το χρόνο) και με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια παραποιημένη εμπειρία. Η μελέτη των Smith, Delgutte και Oxenham (2002) έδειξε ότι όταν δίνεται κυρίως χρονική πληροφορία, οι ακροατές ακούν κάτι σαν ομιλία, ενώ όταν δίνεται φασματική πληροφορία, ο ήχος ακούγεται περισσότερο σαν θόρυβος. Το φαινόμενο αυτό

θυμίζει τις ακουστικές ψευδαισθήσεις, όπου το ίδιο ερέθισμα μπορεί να ερμηνευθεί με διαφορετικούς τρόπους. Παρόμοια, οι Jeng et al. (2016) βρήκαν ότι σε χιμαιρικούς ήχους που περιλαμβάνουν τονικές πληροφορίες, η γλωσσική εμπειρία του ακροατή επηρεάζει άμεσα το πώς αντιλαμβάνεται τον ήχο. Στις ψευδαισθήσεις, αυτό συνδέεται με το πώς η προσοχή και οι προσδοκίες του ατόμου μπορούν να αλλάξουν το τελικό αποτέλεσμα. Συνοψίζοντας, οι χιμαιρικοί ήχοι λειτουργούν σαν πειράματα που μοιάζουν με τις ψευδαισθήσεις. Και στις δύο περιπτώσεις βλέπουμε ότι ο εγκέφαλος δεν αντιγράφει παθητικά τον εξωτερικό κόσμο, αλλά φτιάχνει την εμπειρία του ήχου χρησιμοποιώντας στοιχεία, συμφραζόμενα και προσδοκίες.

Ωστόσο, η μελέτη των ακουστικών ψευδαισθήσεων και των χιμαιρικών ήχων δεν έχει μόνο θεωρητική αξία, αλλά ανοίγει δρόμους και για την εφαρμογή στην τεχνολογία, την εκπαίδευση και την κλινική πράξη. Η έρευνα δείχνει ότι τα φαινόμενα αυτά βοηθούν να κατανοήσουμε με ποίον τρόπο ο εγκέφαλος οργανώνει τους ήχους σε πολύπλοκα περιβάλλοντα. Η θεωρία της ανάλυσης της ακουστικής σκηνης του Bregman (1990) έδειξε ότι ο εγκέφαλος χρησιμοποιεί δύο βασικά κριτήρια για να αναλύει τους ήχους. Τα φασματικά χαρακτηριστικά, μπορούν να οδηγήσουν στην ένωση των ήχων όταν αυτοί βρίσκονται κοντά συχνοτικά. Αντίστοιχα τα χρονικά χαρακτηριστικά μπορούν να οδηγήσουν τον εγκέφαλο στο να διαχωρίσει ή να συνδυάσει τους ήχους. Τα πειράματα με χιμαιρικούς ήχους έδειξαν ότι ακόμα και μικρές αλλαγές στον τρόπο που συνδέονται τα φασματικά και τα χρονικά χαρακτηριστικά μπορούν να αλλάξουν εντελώς τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε έναν ήχο ενισχύοντας τις παραπάνω έρευνες (Smith, Delgutte, & Oxenham, 2002). Έτσι, οι ψευδαισθήσεις και οι χίμαιρες λειτουργούν σαν «παράθυρα» στους μηχανισμούς που κρύβονται πίσω από την ακουστική αντίληψη. Σε τεχνολογικό επίπεδο, τα ευρήματα αυτά έχουν πρακτική αξία για την ανάπτυξη ακουστικών βοηθημάτων και κοχλιακών εμφυτευμάτων. Η έρευνα του Kilgard και του Merzenich (1998) για την πλαστικότητα στον ακουστικό φλοιό έδειξε ότι η χρονική πληροφορία παίζει κρίσιμο ρόλο στην αντίληψη. Τα κοχλιακά εμφυτεύματα για παράδειγμα, πρέπει να είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταδίδουν καθαρά χρονικά σήματα, έτσι ώστε ο εγκέφαλος να μπορεί να αναγνωρίζει την ομιλία. Παράλληλα, οι μελέτες σε χιμαιρικούς ήχους (Heinz & Swaminathan, 2009) έδειξαν πώς η κωδικοποίηση του περιβλήματος και της λεπτοδομής επηρεάζει την κατανόηση του λόγου, προσφέροντας πολύτιμες κατευθύνσεις για τη βελτίωση της τεχνολογίας. Στο ίδιο πλαίσιο, οι Heng et al. (2011), χρησιμοποιώντας «instrumental chimeras» έδειξαν ότι η διάκριση του ηχοχρώματος επηρεάζεται ουσιαστικά από τη παρουσία αυτών των ακουστικών στοιχείων. Συγκεκριμένα, τα άτομα με φυσιολογική ακοή αξιοποιούν συνδυαστικά τόσο την περιβάλλουσα όσο και τη λεπτοδομή για να ταυτοποιήσουν το όργανο, ενώ οι χρήστες κοχλιακών εμφυτευμάτων

βασίζονται σχεδόν αποκλειστικά στην περιβάλλουσα. Το εύρημα αυτό εξηγεί τις σημαντικές δυσκολίες των ατόμων αυτών, στην αντίληψη μουσικού ηχοχρώματος και επιβεβαιώνει ότι οι περιορισμοί στην επεξεργασία της λεπτοδομής αποτελούν βασικό εμπόδιο για την ποιοτική μουσική εμπειρία μέσω CI, αναδεικνύοντας την ανάγκη βελτίωσης των αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος.

Η ακουστική εκπαίδευση είναι ένας άλλος τομέας όπου οι γνώσεις από τις ψευδαισθήσεις μπορούν να εφαρμοστούν. Αν η αντίληψη μπορεί να «ξεγελαστεί» ή να «αναπροσαρμοστεί» μέσα από ελεγχόμενα ερεθίσματα, τότε αντίστοιχες τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκπαιδευτικά. Για παράδειγμα, μελέτες έχουν δείξει ότι παιδιά με γλωσσικές δυσκολίες μπορούν να βελτιώσουν τις ικανότητές τους μέσα από ειδικά ακουστικά προγράμματα (Hu et al., 2025). Αντίστοιχα, παιδιά με εμφυτεύματα μαθαίνουν να εκμεταλλεύονται καλύτερα τα ακουστικά σήματα με τη βοήθεια της νευροπλαστικότητας (Zhang, Y. et al., 2025). Σε αυτό το πλαίσιο, οι χιμαιρικοί ήχοι μπορούν να λειτουργήσουν ως εκπαιδευτικά εργαλεία και να βοηθήσουν στη σταδιακή εξάσκηση πιο σύνθετων ακουστικών μοτίβων.

Στον τομέα της ψυχιατρικής, η μελέτη των ακουστικών ψευδαισθήσεων προσφέρει σημαντικά οφέλη. Η κατανόηση του πώς ο εγκέφαλος δημιουργεί φανταστικούς ήχους μπορεί να βοηθήσει στη διάκριση ανάμεσα σε φυσιολογικούς μηχανισμούς και παθολογικές εμπειρίες, όπως αυτές που συναντώνται στη σχιζοφρένεια ή στις εμβοές. Σύμφωνα με την έρευνα των Chen et al. (2025), μοντέλα ακουστικών ψευδαισθήσεων χρησιμοποιούνται ήδη για να μελετήσουν πώς τα δίκτυα του εγκεφάλου συνδυάζουν κατώτερες και ανώτερες διεργασίες, ανοίγοντας το δρόμο για πιο στοχευμένες θεραπευτικές προσεγγίσεις. Συνολικά, η μελέτη των ακουστικών ψευδαισθήσεων και των χιμαιρικών ήχων δεν μένει σε θεωρητικό επίπεδο. Έχει συμβάλει ακόμη, στην τεχνολογία των ακουστικών συστημάτων, στην εκπαίδευση παιδιών με ακουστικές ή γλωσσικές δυσκολίες και στην κατανόηση ψυχιατρικών συμπτωμάτων. Μας δείχνει, δηλαδή, πώς η θεμελιώδης έρευνα για τον ήχο και την αντίληψη μπορεί να μετατραπεί σε πρακτικά εργαλεία που βελτιώνουν την καθημερινή ζωή.

Συνοψίζοντας, το κεφάλαιο έδειξε ότι η ακουστική επεξεργασία είναι ένα πολυεπίπεδο φαινόμενο, που συνδυάζει μηχανισμούς από το επίπεδο της περιβάλλουσας και της λεπτοδομής μέχρι τα νευροφυσιολογικά και ψυχοακουστικά δεδομένα. Η κατανόηση αυτών των μηχανισμών προσφέρει το υπόβαθρο για να διερευνηθεί πώς η γλώσσα αξιοποιεί αυτές τις ακουστικές διεργασίες. Στο επόμενο υποκεφάλαιο η ανάλυση μεταφέρεται στη γλωσσολογική διάσταση, με έμφαση στις τονικές γλώσσες, στην ομιλία σε θορυβώδη περιβάλλοντα και στις πολιτισμικές διαφοροποιήσεις.

## 3.2. Γλωσσολογία και Αντίληψη της Ομιλίας

Η ομιλία αποτελεί το βασικότερο μέσο ανθρώπινης επικοινωνίας και η κατανόησή της απαιτεί την αλληλεπίδραση πολύπλοκων γλωσσολογικών, ακουστικών και γνωστικών μηχανισμών. Η γλωσσολογία προσφέρει τη θεωρητική βάση για την ανάλυση των ήχων και τη δομή της γλώσσας. Η ψυχολογία και οι νευροεπιστήμες αναδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο ο εγκέφαλος αναγνωρίζει, επεξεργάζεται και ερμηνεύει τα γλωσσικά σήματα.

Η αντίληψη της ομιλίας δεν περιορίζεται στην αναγνώριση φωνητικών ήχων, αλλά αποτελεί και μια διαδικασία που συνδέει τα φωνητικά χαρακτηριστικά με τις νοηματικές και συντακτικές τους δομές. Παράλληλα, η ομιλία δεν φτάνει πάντα στον ακροατή σε «καθαρή» μορφή. Συχνά καλούμαστε να κατανοήσουμε τον λόγο σε περιβάλλοντα με θόρυβο, όπως σε έναν πολυσύχναστο δρόμο, με παραμορφώσεις του σήματος ή με περιορισμένη ακουστική πληροφορία, όπως για παράδειγμα όταν κάποιος μιλά χαμηλόφωνα ή με προφορά. Το γεγονός ότι οι περισσότεροι άνθρωποι μπορούν να κατανοήσουν τον λόγο ακόμη και σε τέτοιες δύσκολες συνθήκες δείχνει την εντυπωσιακή προσαρμοστικότητα του εγκεφάλου. Το ακουστικό και γλωσσικό μας σύστημα βασίζεται σε αυτά που ακούμε αλλά παράλληλα χρησιμοποιεί συμφραζόμενα, προσδοκίες και προηγούμενη εμπειρία για να συμπληρώνει τα κενά που πιθανόν υπάρχουν ώστε να εξασφαλίζεται η επικοινωνία.

Επιπλέον, η αντίληψη της ομιλίας διαμορφώνεται από τη γλωσσική και πολιτισμική εμπειρία. Οι διαφορετικές γλώσσες και φωνολογικά συστήματα οδηγούν σε διαφορετικούς τρόπους ακουστικής κατηγοριοποίησης, ενώ οι πολιτισμικές πρακτικές επηρεάζουν τον ρυθμό, την προσωδία και τη χρήση της γλώσσας στην επικοινωνία.

Αρχικά, η ενότητα αυτή εξετάζει τους βασικούς μηχανισμούς της φωνητικής αντίληψης και επεξεργασίας του λόγου. Στη συνέχεια εξετάζει τους τρόπους με τους οποίους οι ακροατές καταφέρνουν να κατανοούν τη γλώσσα υπό συνθήκες παραμόρφωσης ή παρακώλυσης. Τέλος αναλύει τις διαγλωσσικές και πολιτισμικές διαφορές που επηρεάζουν την πρόσληψη της ομιλίας. Με αυτόν τον τρόπο, προσφέρει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την κατανόηση της σχέσης ανάμεσα στη γλώσσα, την ακουστική αντίληψη και την επικοινωνία.

### 3.2.1. Φωνητική Αντίληψη και Επεξεργασία Λόγου

Η φωνητική αντίληψη αποτελεί μια από τις πιο σύνθετες γνωστικές λειτουργίες του ανθρώπινου εγκεφάλου. Ειδικότερα, συνδέει την ανάλυση του ήχου με τη γλωσσική κατανόηση. Ο ορισμός της αντίληψης λόγου (speech perception) αναφέρεται στην ικανότητα του ακουστικού συστήματος να δέχεται, να επεξεργάζεται και να ερμηνεύει τα ακουστικά σήματα που αντιστοιχούν στην ομιλία (Binder & Price, 2001). Ειδικότερα, η έρευνα έχει

αναδεικνύει ότι η διαδικασία αυτή βασίζεται σε φασματικές πληροφορίες, αλλά και σε χρονικές πληροφορίες (όπως ο ρυθμός και η διάρκεια) (Rosen, 1992· Shannon et al., 1995).

Οι πρώιμες θεωρίες προσπάθησαν να εξηγήσουν τον τρόπο με τον οποίο τα άτομα αναγνωρίζουν τη γλώσσα από σύνθετα ακουστικά σήματα. Μία από τις πιο διαδεδομένες είναι η κινητική θεωρία της αντίληψης λόγου (Motor Theory). Αυτή υποστηρίζει ότι η κατανόηση της ομιλίας βασίζεται στην αναγνώριση των κινήσεων κατά τη διάρκεια της άρθρωσης που την παράγουν (Liberman & Mattingly, 1985). Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, ο εγκέφαλος δεν αναγνωρίζει μόνο τα ακουστικά σήματα αλλά σχηματίζει νοητά και τις κινήσεις των οργάνων άρθρωσης που τα δημιουργήσαν. Ωστόσο, νεότερα μοντέλα τόνισαν ότι η ακουστική αντίληψη δεν περιορίζεται σε μία διάσταση. Ο Poeppel (2003) πρότεινε το μοντέλο της ασύμμετρης δειγματοληψίας στο χρόνο (Asymmetric Sampling in Time). Σύμφωνα με αυτό, τα δύο ημισφαίρια του εγκεφάλου επεξεργάζονται διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Το αριστερό εξειδικεύεται σε ταχύτερες αλλαγές οι οποίες είναι χρήσιμες για τη διάκριση συμφώνων, ενώ το δεξί σε πιο αργές, σχετικές με τον ρυθμό και τη προσωδία. Η άποψη αυτή επιβεβαιώνεται από μελέτες που δείχνουν ότι η χρονική και φασματική οργάνωση του λόγου απαιτεί συνεργασία πολλαπλών εγκεφαλικών περιοχών (Giraud & Poeppel, 2012).

Παράλληλα, θεωρίες top-down επεξεργασίας έδειξαν τη σημασία των προσδοκιών, της εμπειρίας και των συμφραζομένων στην αντίληψη του λόγου. Όπως δείχνουν οι Davis & Johnsrude (2007), η κατανόηση της ομιλίας δεν είναι μια απλή, παθητική διαδικασία αποκωδικοποίησης. Εμπλέκει ενεργές γνωστικές προβλέψεις που διαμορφώνουν την ερμηνεία των ακουστικών σημάτων. Έτσι, η φωνητική αντίληψη συνδυάζει αισθητηριακή ανάλυση με γνωστική επεξεργασία, καθιστώντας την ένα δυναμικό και αλληλεπιδραστικό φαινόμενο.

Η αντίληψη της ομιλίας είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει την ικανότητα του εγκεφάλου να αναγνωρίζει και να διακρίνει φωνήματα, μια διαδικασία που δεν περιορίζεται στην αποκωδικοποίηση των ήχων. Οι Mesgarani et al. (2014) υπογραμμίζουν τον ρόλο της άνω κροταφικής έλικας (STG) στην κωδικοποίηση φωνητικών χαρακτηριστικών των ήχων. Αυτό επιτρέπει στον εγκέφαλο να αναλύει πιο σύνθετα γλωσσικά μοτίβα. Η κάτω μετωπιαία έλικα (IFG) σχετίζεται με τη σύνδεση αυτών των ήχων με τη γλωσσική κατανόηση και την παραγωγή λόγου (Obleser & Eisner, 2009).

Η νευροδυναμική έρευνα δείχνει ότι ο εγκέφαλος συγχρονίζει τη δραστηριότητά του με τον ρυθμό της ομιλίας, διευκολύνοντας την κατανόησή του. Μελέτες των Giraud & Poeppel (2012) και Luo & Poeppel (2007) έχουν δείξει ότι οι ταλαντώσεις σε συγκεκριμένες συχνότητες ευθυγραμμίζονται με τα χρονικά μοτίβα της ομιλίας, διευκολύνοντας την κατανόησή της. Ακόμη, οι Ding & Simon (2014) υπογράμμισαν ότι η συνεχής προσαρμογή του ακουστικού

φλοιού στον ρυθμό της ομιλίας είναι καθοριστική για να κατανοούμε τον λόγο τη στιγμή που τον ακούμε.

Η αντίληψη της ομιλίας διαμορφώνεται επίσης από bottom-up μηχανισμούς, με τον εγκέφαλο να ερμηνεύει το σήμα με βάση το πλαίσιο στο οποίο ταιριάζει. Οι Toscano & McMurray (2010) έδειξαν ότι οι ακροατές συνδυάζουν πολλές ακουστικές ενδείξεις για να αναγνωρίσουν σωστά τα φωνήματα, δίνοντας μεγαλύτερη σημασία σε αυτά που είναι πιο αξιόπιστα. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αντίληψη της ομιλίας βασίζεται στον συνδυασμό χαμηλότερων αισθητηριακών και ανώτερων γνωστικών μηχανισμών, ενδυναμώνοντας τον εγκέφαλο με προσδοκίες, συμφραζόμενα και οπτικές πληροφορίες για να κατασκευάσει μια σταθερή και κατανοητή εμπειρία λόγου.

Η κατανόηση των μηχανισμών της αντίληψης της φωνής έχει άμεσες εφαρμογές στην κλινική πράξη και την εκπαίδευση. Για παράδειγμα, η νευροπλαστικότητα στα γλωσσικά δίκτυα επιτρέπει στον εγκέφαλο να αναδιοργανωθεί και να ανακτήσει τις χαμένες λειτουργίες (Kiran & Thompson, 2019· Drosos et al., 2024), ενώ η συστηματική αποκατάσταση έχει δείξει θετικά αποτελέσματα (Hearnshaw et al., 2019). Στο πεδίο των ακουστικών προθετικών συστημάτων, οι Xu & Pfingst (2008) έδειξαν ότι τα κοχλιακά εμφυτεύματα μπορούν να υποστηρίξουν την κατανόηση λόγου εφόσον αξιοποιούν με σωστό τρόπο τόσο τα φασματικά όσο και τα χρονικά σήματα. Η εκπαίδευση σε θορυβώδη περιβάλλοντα είναι ένα άλλο κρίσιμο πεδίο, καθώς η άρθρωση ενεργοποιεί πρόσθετους κινητικούς και αισθητηριακούς μηχανισμούς που υποστηρίζουν την ακουστική επεξεργασία (Perron et al., 2024). Η μουσική εκπαίδευση έχει επίσης θετική επίδραση στη γλωσσική επεξεργασία. Η συστηματική ενασχόληση με τη μουσική ενισχύει τόσο την ακουστική διάκριση όσο και την κατανόηση του λόγου (Neves et al., 2022; Merzenich et al., 1996).

Συμπερασματικά, η έρευνα στην φωνητική αντίληψη και την επεξεργασία λόγου δείχνει ότι οι μηχανισμοί που μελετώνται στο εργαστήριο έχουν άμεσες εφαρμογές στην καθημερινή ζωή. Σε αυτό το πλαίσιο, οι πειραματικές μελέτες με χιμαιρικούς ήχους προσφέρουν άμεση απόδειξη για το πώς ο εγκέφαλος αξιοποιεί διαφορετικά ακουστικά στοιχεία για την κατανόηση του λόγου. Ο τεχνητός αυτός διαχωρισμός περιβάλλουσας και λεπτοδομής δείχνει ότι ο πρώτος επαρκεί για τη βασική κατανόηση, ενώ η δεύτερη είναι καθοριστική για την αναγνώριση φωνημάτων, την ακρίβεια στην κατανόηση και την ακουστική ευκρίνεια. Τα ευρήματα αυτά συνδέουν άμεσα τις νευροδυναμικές και γλωσσολογικές θεωρίες με την κλινική πράξη.

Η ομιλία μεταφέρει πολλές διαφορετικές πληροφορίες. Δύο από τις πιο σημαντικές κατηγορίες είναι οι φασματικές και οι χρονικές πληροφορίες. Οι φασματικές πληροφορίες

σχετίζονται με τα συχνοτικά χαρακτηριστικά του ήχου και περιλαμβάνουν στοιχεία όπως οι αρμονικές και οι φορμάντες. Οι φορμάντες είναι συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων με μεγαλύτερη ενέργεια, που δημιουργούνται από τον συντονισμό του φωνητικού καναλιού, και αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό για τη διάκριση των φωνηέντων (Rosen, 1992). Οι χρονικές πληροφορίες σχετίζονται με τον ρυθμό και τη διάρκεια των ήχων, αλλά και με την περιβάλλουσα της έντασης (temporal envelope) και τη λεπτοδομή του σήματος (fine structure). Σύμφωνα με τους Shannon et al. (1995), ακόμα κι όταν η φασματική πληροφορία είναι περιορισμένη, οι ακροατές μπορούν να κατανοήσουν την ομιλία μόνο με βάση τις χρονικές διακυμάνσεις της έντασης. Μάλιστα, εφόσον διατηρείται τη σωστή περιβάλλουσα, η κατανόηση λόγου παραμένει δυνατή ακόμη και με τρεις μόνο ευρείες ζώνες συχνοτήτων. Η σημασία των χρονικών ενδείξεων γίνεται ακόμη πιο ξεκάθαρη όταν βρισκόμαστε σε δύσκολες ακουστικές συνθήκες. Για παράδειγμα, σε θορυβώδη περιβάλλοντα, οι ρυθμικές πληροφορίες είναι απαραίτητες προκειμένου οι ακροατές να κατανοήσουν τη ροή της ομιλίας. Όπως έδειξαν οι Xu & Pfingst (2008), οι χρονικές ενδείξεις παίζουν κρίσιμο ρόλο και για τα κοχλιακά εμφυτεύματα, καθώς βοηθούν τους χρήστες να αναγνωρίζουν τον λόγο ακόμα κι όταν η φασματική ανάλυση είναι περιορισμένη. Τέλος, έρευνες στο επίπεδο του ακουστικού νεύρου έδειξαν ότι η περιβάλλουσα και η λεπτοδομή επεξεργάζονται διαφορετικά αλλά συμπληρωματικά. Οι Heinz & Swaminathan (2009) έδειξαν ότι η κωδικοποίηση της περιβάλλουσας είναι πιο σταθερή σε θορυβώδη περιβάλλοντα, ενώ η λεπτοδομή μπορεί να παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για τον τονισμό και την προσωδία, ιδίως σε γλώσσες με τόνους, όπως η μανδαρινική. Επομένως, η αντίληψη του λόγου δεν βασίζεται αποκλειστικά ούτε στο φάσμα ούτε στον χρόνο, αλλά στον συνδυασμό τους. Ο εγκέφαλος εκτιμά ποια ένδειξη είναι πιο αξιόπιστη σε κάθε περίπτωση και την αξιοποιεί για να καταλήξει στο σωστό νόημα.

Όσον αφορά τους χημεικούς ήχους, έχουν χρησιμοποιηθεί για να διερευνηθεί πώς ο εγκέφαλος επεξεργάζεται τα διαφορετικά είδη ακουστικής πληροφορίας κατά την αναγνώριση της ομιλίας. Η κλασική μελέτη των Smith, Delgutte και Oxenham (2002) έδειξε ότι όταν η περιβάλλουσα ενός ήχου προέρχεται από ομιλία, οι ακροατές μπορούν να αναγνωρίσουν λόγο ακόμη κι αν η λεπτοδομή ανήκει σε θόρυβο. Το παραπάνω εύρημα τόνισε την καθοριστική συμβολή της περιβάλλουσας στην αντίληψη του λόγου σε μη τονικές γλώσσες, όπως είναι τα αγγλικά. Ωστόσο, οι Heinz και Swaminathan (2009) αναλύοντας τις αποκρίσεις του ακουστικού νεύρου, έδειξαν ότι η λεπτοδομή μεταφέρει κρίσιμες πληροφορίες για το τονικό ύψος. Αυτό επιβεβαιώθηκε στη μελέτη των Jeng et al. (2016), όπου Κινέζοι ακροατές μανδαρινικών βασίστηκαν στη λεπτοδομή για να διακρίνουν τους διαφορετικούς τόνους της γλώσσας. Αυτό κατέδειξε ότι η σημασία κάθε πληροφορίας εξαρτάται από το φωνολογικό

σύστημα. Πιο πρόσφατα, οι Prinsloo και Lalor (2022) χρησιμοποίησαν χιμαιρικούς ήχους για να δείξουν ότι η εγκεφαλική παρακολούθηση της περιβάλλουσας (envelope tracking) αντανακλά γενικές ακουστικές διαδικασίες αλλά και εξειδικευμένους μηχανισμούς, όπως για παράδειγμα αυτοί που σχετίζονται με την ομιλία. Έτσι, οι χιμαιρικοί ήχοι βοηθούν τους ερευνητές να ξεχωρίσουν ποιες διεργασίες σχετίζονται με την απλή ακουστική επεξεργασία και ποιες συγκεκριμένα με την κατανόηση της ομιλίας στον εγκέφαλο.

Η βιβλιογραφία, συνολικά, δείχνει ότι οι χιμαιρικοί ήχοι αποτελούν έναν αξιόπιστο τρόπο για να αποκαλυφθούν οι ρόλοι της περιβάλλουσας και της λεπτοδομής στην αντίληψη λόγου, αλλά και για να μελετηθεί πώς αυτοί οι ρόλοι διαφοροποιούνται ανάλογα με τη γλώσσα και τις ακουστικές συνθήκες.

### *3.2.2. Γλωσσική Κατανόηση υπό Συνθήκες Παραμόρφωσης ή Παρακώλυσης*

Το «πρόβλημα του κοκτέιλ πάρτι» είναι ένα σημαντικό ζήτημα στην κατανόηση της ομιλίας σε θορυβώδη περιβάλλοντα, καθώς υπογραμμίζει τη σημασία της ανάλυσης ακουστικής σκηνής και την ικανότητα του εγκεφάλου να οργανώνει το ακουστικό περιβάλλον σε διακριτά «αντικείμενα» ή ροές ήχου. Η θεωρία του Bregman (1994) και οι επεκτάσεις της (Nakajima, 1992) έχουν δείξει ότι το ακουστικό σύστημα χρησιμοποιεί ενδείξεις όπως η συχνότητα, η χρονική σύμπτωση και η χωρική τοποθέτηση για να διαχωρίσει ή να ομαδοποιήσει ήχους. Σε συνθήκες παραμόρφωσης ή παρακώλυσης, όπου οι διαθέσιμες ενδείξεις μειώνονται ή γίνονται λιγότερο αξιόπιστες, η επιτυχής κατανόηση της ομιλίας εξαρτάται από την αποτελεσματική λειτουργική ολοκλήρωση μεταξύ πολλαπλών περιοχών του εγκεφάλου.

Το Words in Babble Test (Markatos et al. 2024), σχεδιασμένο και αξιολογημένο για τα ελληνικά δεδομένα, προσφέρει μια αξιόπιστη μέτρηση της ακουστικής απόδοσης σε θορυβώδη περιβάλλοντα. Η εξέταση αυτή επιτρέπει την πρακτική εφαρμογή των θεωρητικών ευρημάτων στον ελληνόφωνο πληθυσμό. Το πρόβλημα του cocktail party αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα του περιορισμού και των δυνατοτήτων του ακουστικού συστήματος, δείχνοντας ότι η κατανόηση της ομιλίας δεν βασίζεται αποκλειστικά στο ίδιο το σήμα αλλά προκύπτει από μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ ακουστικών και γνωστικών μηχανισμών.

Η κατανόηση της ομιλίας σε θορυβώδη περιβάλλοντα εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο το ακουστικό σύστημα αξιοποιεί διαφορετικά είδη ακουστικών ενδείξεων. Έρευνες έχουν δείξει ότι η παραμόρφωση της περιβάλλουσας μειώνει σημαντικά την κατανόηση της ομιλίας, ενώ η λεπτοδομή είναι καθοριστική για την ανίχνευση φωνημάτων και την αναγνώριση ύψους, αλλά μειώνεται σημαντικά σε άτομα με απώλεια ακοής, γεγονός που

περιορίζει τις πιθανότητες διάκρισης σε θορυβώδεις συνθήκες (Moore, 2008· Gilbert & Lorenzi, 2006).

Σημαντική θεωρητική συμβολή σε αυτόν τον τομέα αποτελεί η έννοια των “χαρτών ακουστικής έμφασης” (auditory saliency maps) (Kayser et al., 2005). Αυτοί λειτουργούν ως εσωτερικοί χάρτες του εγκεφάλου που επισημαίνουν ποιοι ήχοι ξεχωρίζουν περισσότερο. Οι σύγχρονες μέθοδοι EEG έχουν δείξει ότι η επιλογή της ακουστικής προσοχής μπορεί να ανιχνευθεί σε πραγματικό χρόνο, ακόμη και σε περιβάλλοντα «cocktail party» (O’Sullivan et al., 2015). Τα παραπάνω ευρήματα καταδεικνύουν ότι για την αποτελεσματική κατανόηση της ομιλίας σε δύσκολες συνθήκες, οι ακουστικοί και γνωστικοί μηχανισμοί πρέπει να συνεργάζονται.

Η κατανόηση της ομιλίας σε θορυβώδη περιβάλλοντα ενεργοποιεί ένα εκτεταμένο δίκτυο περιοχών του εγκεφάλου, συμπεριλαμβανομένης της άνω κροταφικής έλικας (STG) και του ραχιαίου προμετωπιαίου φλοιού (DLPFC) (Bidelman et al., 2020). Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ STG και DLPFC δείχνουν ότι η αποτελεσματική κατανόηση απαιτεί συνεργασία μεταξύ αισθητηριακών και εκτελεστικών περιοχών. Μελέτες EEG αποκαλύπτουν ότι η προσοχή μπορεί να ανιχνευθεί από τα πρότυπα εγκεφαλικής δραστηριότητας και μελέτες με fNIRS κατέγραψαν αλλαγές στη ροή του αίματος και την οξυγόνωση στον εγκέφαλο, οι οποίες συνδέθηκαν με την απόδοση στην κατανόηση της ομιλίας (Farrar et al., 2024).

Η έρευνα για την κατανόηση της ομιλίας σε θορυβώδη περιβάλλοντα έχει άμεσες εφαρμογές σε κλινικό και τεχνολογικό επίπεδο. Μελέτες έχουν δείξει ότι η εκπαίδευση σε συνθήκες λόγου με θόρυβο (speech-in-noise training) βελτιώνει τόσο τις ακουστικές όσο και τις γνωστικές δεξιότητες των παιδιών με διαταραχή ακουστικής επεξεργασίας (APD). Ωστόσο, οι τεχνολογίες κοχλιακών εμφυτευμάτων και ακουστικών βαρηκοΐας βασίζονται κυρίως στη μετάδοση πληροφοριών περιβάλλουσας, γεγονός που περιορίζει την αναγνώριση ομιλίας στο θόρυβο και τη διάκριση των μουσικών τόνων. Κατανοώντας την ύπαρξη τέτοιων περιορισμών οδηγούμαστε στη βελτίωση του σχεδιασμού των ακουστικών βαρηκοΐας και των εμφυτευμάτων, τα οποία στοχεύουν στην ενίσχυση της κατανόησης της ομιλίας και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ατόμων με προβλήματα ακοής.

Χαρακτηριστικά, οι μελέτες με χιμαιρικούς ήχους αναδεικνύουν τον ρόλο της περιβάλλουσας και της λεπτοδομής στην κατανόηση της ομιλίας υπό συνθήκες παραμόρφωσης ή παρακώλυσης. Μέσα από τον τεχνητό συνδυασμό αυτών των στοιχείων από διαφορετικές πηγές, έχει αποδειχθεί ότι η περιβάλλουσα επαρκεί για τη βασική κατανόηση του λόγου. Η δυσκολία των χρηστών κοχλιακών εμφυτευμάτων, που έχουν πρόσβαση σχεδόν

αποκλειστικά στην περιβάλλουσα, επιβεβαιώνει την κεντρική σημασία της λεπτοδομής για την αποτελεσματική γλωσσική κατανόηση σε θορυβώδεις συνθήκες.

### 3.2.3. Διαγλωσσικές και Πολιτισμικές Διαφορές στην Αντίληψη Ομιλίας

Η έρευνα δείχνει ότι η εμπειρία της γλώσσας διαμορφώνει από νωρίς τον τρόπο που ο εγκέφαλος επεξεργάζεται το ύψος της φωνής. Οι Krishnan et al. (2005) έδειξαν ότι η απόκριση παρακολούθησης συχνότητας (FFR) στο εγκεφαλικό στέλεχος επηρεάζεται από το αν ο ακροατής μιλάει τονική ή μη τονική γλώσσα. Οι ομιλητές των Μανδαρινικών εμφάνισαν μεγαλύτερη ακρίβεια στην κωδικοποίηση των τονικών αλλαγών σε σχέση με αγγλόφωνους. Παρόμοια, η μελέτη των Jeng et al. (2011) αποκάλυψε ότι τα νεογνά, , έχουν αρχικά παρόμοιες δυνατότητες στην επεξεργασία του ύψους, ανεξάρτητα από τη γλώσσα. Ωστόσο, με την ηλικία οι διαφορές γίνονται πιο έντονες ανάλογα με τη γλωσσική εμπειρία. Η πιο πρόσφατη μελέτη των Jeng et al. (2021) χρησιμοποίησε χιμαιρικούς ήχους για να εξετάσει πώς οι ακροατές αντιλαμβάνονται νέες φωνητικές κατηγορίες. Διαπιστώθηκε ότι το γλωσσικό υπόβαθρο επηρεάζει την ερμηνεία τεχνητών ήχων. Έτσι φαίνεται πόσο σημαντική είναι η πρώιμη γλωσσική εμπειρία στην ακουστική επεξεργασία. Μάλιστα, η μελέτη για χιμαιρικούς τόνους έδειξε ότι οι αντιδράσεις των ακροατών και τα νευρωνικά μέτρα (FFR) επηρεάζονται κυρίως από τη γλωσσική σημασία των συνδυασμών και όχι απλώς από την ακουστική τους τροποποίηση. Αυτό αποδεικνύει ότι τα γλωσσικά πρότυπα καθορίζουν τόσο την αντίληψη όσο και την κωδικοποίηση νέων φωνητικών κατηγοριών. Η πρώιμη ανάπτυξη παίζει επίσης κρίσιμο ρόλο. Οι Werker και Tees (1984) διαπίστωσαν ότι τα βρέφη αρχικά μπορούν να ξεχωρίσουν φωνητικές αντιθέσεις από πολλές γλώσσες, αλλά στον πρώτο χρόνο ζωής χάνουν αυτή την ικανότητα για ήχους που δεν ανήκουν στη μητρική τους γλώσσα. Οι Bosch και Sebastián-Gallés (2003) σε μια μελέτη τους έδειξαν ότι τα δίγλωσσα βρέφη διατηρούν για περισσότερο διάστημα την ευαισθησία τους σε διαφορετικές φωνητικές κατηγορίες. Αυτό το γεγονός υποδηλώνει ότι τα δίγλωσσα άτομα έχουν μεγαλύτερη ευελιξία στην ακουστική επεξεργασία. Γενικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η νευρωνική κωδικοποίηση του ύψους και οι φωνητικές διακρίσεις δεν είναι σταθερές. Διαμορφώνονται όμως, από την πρώιμη γλωσσική εμπειρία και μπορούν να παραμείνουν ευέλικτες σε παιδιά που εκτίθενται σε δύο γλώσσες.

Η αναπτυξιακή δυσλεξία δεν είναι ίδια σε όλες τις γλώσσες. Το πώς εκδηλώνεται εξαρτάται από το πόσο "διαφανής" είναι μια γλώσσα, δηλαδή πόσο προβλέψιμη είναι η σχέση μεταξύ των γραμμάτων και των ήχων τους. Για παράδειγμα, σε διαφανείς γλώσσες, όπως η ιταλική ή η ισπανική, οι αντιστοιχίες γράμματος-ήχου είναι σταθερές, ενώ σε αδιαφανείς, όπως η αγγλική, εμφανίζουν μεγαλύτερη αστάθεια. Οι Ziegler και Goswami (2005) έδειξαν ότι η

υψηλότερη διαφάνεια μειώνει τα λάθη ανάγνωσης σε παιδιά με δυσλεξία. Ωστόσο, σε όλες τις γλώσσες, το βασικό πρόβλημα εντοπίζεται στη φωνολογική επεξεργασία και στην αδυναμία σύνδεσης γραφήματος με φώνημα. Ο Χριστοδουλίδης (2021) έδειξε με μελέτες EEG ότι τα άτομα με δυσλεξία παρουσιάζουν διαφορετικά νευρωνικά πρότυπα σε φωνητικά ερεθίσματα, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η ακουστική επεξεργασία είναι κεντρική για τη δυσλεξία. Αυτές οι διαφορές γίνονται πιο εμφανείς σε γλώσσες με περίπλοκες φωνολογικές δομές, όπου η ακριβής διάκριση ήχων είναι απαραίτητη για την ανάγνωση. Η δυσλεξία έχει κοινά φωνολογικά ελλείμματα, αλλά οι εκδηλώσεις της εξαρτώνται από τη γλώσσα και την ορθογραφία, κάτι που τονίζει την ανάγκη για εξατομικευμένες στρατηγικές υποστήριξης.

Οι πολιτισμικές διαφορές επηρεάζουν έντονα τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε την προσωδία και τον λεξικό τόνο. Η μελέτη των Wong et al. (2023) έδειξε ότι παιδιά με αναπτυξιακή απραξία λόγου στα Καντονέζικα δυσκολεύονται να διακρίνουν και να παράγουν τόνους, παρόλο που αυτοί είναι καθοριστικοί για το νόημα. Οι Ortega-Llebaria et al. (2013) διαπίστωσαν ότι οι αγγλόφωνοι, όταν μαθαίνουν ισπανικά, τείνουν να βασίζονται στα μοτίβα έμφασης της μητρικής τους γλώσσας και όχι στις νέες τονικές ενδείξεις, γεγονός που δυσκολεύει την επικοινωνία. Επιπλέον, οι Sekiyama και Tohkura (1993) έδειξαν ότι η επίδραση οπτικών πληροφοριών, όπως οι κινήσεις των χειλιών, διαφέρει ανάμεσα σε πολιτισμούς. Ειδικότερα, οι αγγλόφωνοι βασίζονται περισσότερο σε οπτικά στοιχεία από ό,τι οι ιαπωνόφωνοι.

Η βιβλιογραφία έχει προτείνει διάφορα θεωρητικά πλαίσια για να εξηγήσει τις διαγλωσσικές διαφορές στην αντίληψη της ομιλίας. Σύμφωνα με το μοντέλο της αντιληπτικής παρεμβολής (perceptual interference account, Iverson et al., 2003), οι κατηγορίες που σχηματίζει το άτομο από τη μητρική του γλώσσα μπορούν να περιορίσουν ή να εμποδίσουν την εκμάθηση νέων φωνητικών αντιθέσεων σε μια δεύτερη γλώσσα. Από την άλλη, η Άμεση Ρεαλιστική Θεωρία (Direct Realist Theory, Best, 1995) υποστηρίζει ότι οι ακροατές αντιλαμβάνονται άμεσα τις φυσικές ιδιότητες των αρθρωτικών κινήσεων (phonetic gestures) και ότι οι φωνητικές κατηγορίες προκύπτουν δυναμικά από την εμπειρία με αυτά τα σήματα. Συμπληρωματικά, η έρευνα για την πολυτροπική αντίληψη (multimodal integration, Magnotti et al., 2013) δείχνει ότι η κατανόηση της ομιλίας προκύπτει από τον συνδυασμό ακουστικών και οπτικών πληροφοριών. Όταν το ακουστικό σήμα είναι ασαφές, ο εγκέφαλος αξιοποιεί και τα οπτικά στοιχεία, όπως οι κινήσεις των χειλιών, για να δημιουργήσει μια συνεκτική αντίληψη. Τα πλαίσια αυτά, τονίζουν ότι η αντίληψη της ομιλίας είναι μια ευέλικτη και προσαρμοστική διαδικασία, και διαμορφώνεται από το περιβάλλον και την εμπειρία.

Το κεφάλαιο αυτό ανέδειξε ότι η αντίληψη της ομιλίας αποτελεί μια προσαρμοσμένη λειτουργία που διαμορφώνεται από τη ζωή και τις εμπειρίες μας. Αυτή η γνώση παρέχει ένα σημαντικό υπόβαθρο για να κατανοήσουμε πώς η τεχνολογία προσπαθεί να προσεγγίσει ή να αναπαράγει αυτές τις διαδικασίες. Οι χιμαιρικοί ήχοι, ως τεχνητά ερεθίσματα που συνδυάζουν στοιχεία από διαφορετικές πηγές, αποτελούν ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο σε αυτό το πλαίσιο. Συγκεκριμένα, επιτρέπουν στους ερευνητές να διαχωρίζουν την επίδραση της γλωσσικής εμπειρίας από τις καθαρά ακουστικές μεταβολές. Με αυτόν τον τρόπο, αναδεικνύεται πώς οι γλωσσικές και πολιτισμικές εμπειρίες καθοδηγούν όχι μόνο την αντίληψη, αλλά και την ίδια την κωδικοποίηση του λόγου στον εγκέφαλο. Στο επόμενο κεφάλαιο, η ανάλυση θα εστιαστεί στις τεχνολογικές εφαρμογές, από τα κοχλιακά εμφυτεύματα έως τις διεπαφές εγκεφάλου–υπολογιστή. Ακόμη θα εξεταστούν νέες τεχνικές προόδοι αλλά και οι κοινωνικές και ηθικές τους προεκτάσεις.

### **3.3. Τεχνολογία, Τεχνητή Νοημοσύνη και Διεπαφές Εγκεφάλου-Υπολογιστή**

Η πρόοδος της τεχνολογίας και της τεχνητής νοημοσύνης (AI) έχει αλλάξει την κατανόηση και την επεξεργασία του ήχου. Έτσι ανοίγονται νέοι δρόμοι για τη ενίσχυση της βασικής έρευνας αλλά και για την κλινική εφαρμογή. Οι σύγχρονες τεχνολογίες, όπως τα νευρωνικά δίκτυα και οι αλγόριθμοι, βελτιώνουν σημαντικά τον τρόπο που επεξεργαζόμαστε τον ήχο. Αν και οι χιμαιρικοί ήχοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε πειραματικά πλαίσια, τα ευρήματα που προέκυψαν από τη μελέτη τους προσφέρουν πολύτιμες κατευθύνσεις για την ανάπτυξη αλγορίθμων DSP, την τεχνητή νοημοσύνη και τις ακουστικές διεπαφές. Έτσι η βασική ψυχοακουστική έρευνα συνδέεται με τις σύγχρονες νευροτεχνολογικές εφαρμογές. Χρησιμοποιώντας αυτά τα εργαλεία, μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τα ακουστικά σήματα, να ακούμε πιο καθαρά την ομιλία ακόμα και σε θορυβώδη περιβάλλοντα και να αναπτύξουμε πιο προηγμένα ακουστικά βοηθήματα. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν ακόμη, να μετατρέψουν πολύπλοκα δεδομένα σε ήχο και να κάνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπων και συσκευών πιο απλή και αποτελεσματική.

Στο πλαίσιο της νευροτεχνολογίας, οι διεπαφές εγκεφάλου–υπολογιστή (BCIs) και οι καινοτόμες τεχνικές επεξεργασίας σήματος (DSP) συμβάλλουν στη βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας του ακουστικού συστήματος και προσφέρουν νέες δυνατότητες αποκατάστασης για άτομα με απώλεια ακοής. Η νευροπλαστικότητα, αξιολογείται πλέον για να βοηθήσει στην αποκατάσταση της επικοινωνίας. Μέσα από ειδικά θεραπευτικά προγράμματα, τη χρήση μουσικής και ρυθμού, ή ακόμα και με προηγμένες τεχνικές διέγερσης του εγκεφάλου, οι

επιστήμονες μπορούν να ενισχύσουν τις νευρωνικές συνδέσεις. Αυτό δείχνει ότι η σύγχρονη έρευνα συνδυάζει γνώσεις από διάφορους τομείς, όπως η νευροεπιστήμη, η μουσική και η τεχνολογία, για να προσφέρει πιο ολοκληρωμένες και αποτελεσματικές λύσεις.

Με τον τρόπο αυτό, η τεχνολογία και η τεχνητή νοημοσύνη δεν αποτελούν απλώς βοηθητικά εργαλεία, αλλά βασικούς πυλώνες μιας νέας εποχής, όπου η επιστημονική γνώση, η καινοτομία και η θεραπευτική πράξη συναντώνται για να βελτιώσουν την ποιότητα ζωής και να επαναπροσδιορίσουν τα όρια της ακουστικής εμπειρίας.

### 3.3.1. Ακουστική αποκωδικοποίηση με χρήση τεχνητής νοημοσύνης

Η μελέτη των Prinsloo & Lalor (2022), *General Auditory and Speech-Specific Contributions to Cortical Envelope Tracking Revealed Using Auditory Chimeras*, αποτυπώνει πειραματικά πώς η εγκεφαλική παρακολούθηση της περιβάλλουσας του λόγου εξαρτάται κατά κύριο λόγο από ακουστικούς παράγοντες, αλλά ενσωματώνει και στοιχεία γλωσσικής επεξεργασίας. Η κατανόηση λόγου ενισχύει αυτή την παρακολούθηση. Αυτή η διάκριση είναι σημαντική για μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης, DSP μεθόδους καθώς και διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή. Ειδικότερα τονίζει ότι η ανάλυση του φυσικού σήματος δεν είναι αρκετή, αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το αν ο εγκέφαλος το αντιλαμβάνεται ως κατανοητό λόγο. Η νευρωνική αποκωδικοποίηση με τεχνητή νοημοσύνη έχει δείξει ότι είναι εφικτό να μετατραπεί η εγκεφαλική δραστηριότητα σε κατανοητή ομιλία. Οι Anumanchipalli et al. (2019) ανέπτυξαν ένα σύστημα που συνθέτει λόγο απευθείας από τα νευρικά σήματα του φλοιού, αξιοποιώντας πληροφορίες για τις κινήσεις της άρθρωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συνθετικός λόγος μπορούσε να αναγνωρισθεί με ακρίβεια από ακροατές, αποδεικνύοντας τη στενή σχέση ανάμεσα στη φλοιϊκή δραστηριότητα και την παραγωγή της ομιλίας. Στην ίδια κατεύθυνση, οι Sun et al. (2020) δημιούργησαν ένα πρόγραμμα που ονομάζεται Brain2Char και μπορεί να μεταφράζει τα εγκεφαλικά σήματα σε κείμενο, χρησιμοποιώντας τεχνητή νοημοσύνη. Το σύστημα έδειξε ότι είναι δυνατό να αποκωδικοποιηθεί η γλώσσα όχι μόνο σε ηχητικό, αλλά και σε γραπτό επίπεδο. Οι μελέτες αυτές δείχνουν ότι η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αποτελέσει βασικό εργαλείο για την κατανόηση των μηχανισμών της ομιλίας και για την ανάπτυξη μεθόδων που θα αποκαθιστούν την επικοινωνία σε άτομα με σοβαρές διαταραχές λόγου.

Μια βασική πρόκληση για τα συστήματα που συνδέουν τον εγκέφαλο με τον υπολογιστή είναι να μεταφράζουν τα εγκεφαλικά σήματα σε πραγματικό χρόνο. Ο θόρυβος και τα φυσιολογικά παράσιτα συχνά επηρεάζουν την ποιότητα των εγκεφαλικών σημάτων, μειώνοντας την ακρίβεια της επικοινωνίας (Wang et al., 2024). Για την αντιμετώπιση αυτών

των δυσκολιών, οι Yoo et al. (2021) πρότειναν την εφαρμογή προηγμένων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος, που διαχωρίζουν τα χρήσιμα νευρικά μοτίβα από τον θόρυβο. Παράλληλα, οι Komeiji et al. (2024) έδειξαν ότι τα προσαρμοστικά μοντέλα μηχανικής μάθησης μπορούν να αυξήσουν τη σταθερότητα των συστημάτων, καθώς μαθαίνουν να προσαρμόζονται σε διαφορετικά ακουστικά περιβάλλοντα. Τα ευρήματα αυτά δείχνουν ότι η ανάπτυξη ανθεκτικών και προσαρμοστικών μοντέλων είναι κρίσιμη για να εξασφαλιστεί η αξιόπιστη λειτουργία των BCI σε καθημερινές συνθήκες.

Η χρήση της ηλεκτροεγκεφαλογραφίας (EEG) και της λειτουργικής φασματοσκοπίας εγγύς υπέρυθρου (functional near-infrared spectroscopy - fNIRS) έχει ανοίξει νέους δρόμους στην αποκωδικοποίηση της ομιλίας. Το EEG καταγράφει με μεγάλη ακρίβεια τον χρόνο της εγκεφαλικής δραστηριότητας, ενώ το fNIRS δείχνει αλλαγές στην αιμάτωση και δίνει καλύτερη εικόνα για το πού ακριβώς συμβαίνει η επεξεργασία. Ο συνδυασμός τους προσφέρει πιο πλήρη δεδομένα για το πώς ο εγκέφαλος επεξεργάζεται τη γλώσσα. Οι Shah et al. (2022) έδειξαν ότι η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αξιοποιήσει αυτά τα σήματα για να τα μετατρέψει σε χρήσιμη πληροφορία. Επιστήμονες όπως οι Luo et al. (2022) και οι Qiu et al. (2025) έδειξαν ότι τα συστήματα BCI μπορούν να γίνουν πιο αποτελεσματικά. Χρησιμοποιώντας μεθόδους όπως το EEG και το fNIRS, τα BCI μπορούν να μεταφράζουν τα εγκεφαλικά σήματα με μεγαλύτερη ακρίβεια, επιτρέποντας στους ανθρώπους να επικοινωνούν και να συνθέτουν λόγο. Οι ερευνητές τόνισαν ακόμη, πως ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών με έξυπνους αλγόριθμους μπορεί να οδηγήσει σε συστήματα που είναι πιο αξιόπιστα και ικανά να λειτουργούν σε πραγματικές συνθήκες.

Τα πιο σύγχρονα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης έχουν καταφέρει να μεταφράζουν την ομιλία με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι Lee και Lee (2022) δημιούργησαν το EEG-Transformer, ένα σύστημα που βασίζεται στον μηχανισμό της προσοχής (self-attention) και το οποίο σχεδιάστηκε για την αποκωδικοποίηση της φανταστικής ομιλίας (imagined speech) μελετώντας τα εγκεφαλικά σήματα. Το μοντέλο αυτό αναγνώριζε με μεγαλύτερη ακρίβεια τα γλωσσικά μοτίβα σε σχέση με πιο παραδοσιακές μεθόδους, δείχνοντας ότι οι Transformers μπορούν να επεξεργάζονται ταυτόχρονα διαφορετικά τμήματα του σήματος και να αξιοποιούν καλύτερα τις μακροπρόθεσμες εξαρτήσεις. Συμπληρωματικά, οι Komeiji et al. (2024) έδειξαν ότι ένα Transformer που εκπαιδεύτηκε σε δεδομένα από φανερή ομιλία (overt speech) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη συγκαλυμμένη (covert speech). Αυτό σημαίνει ότι τα μοντέλα μπορούν να εφαρμόζουν τη μάθηση από μία μορφή ομιλίας σε άλλη, κάτι που αποτελεί σημαντικό βήμα για την ανάπτυξη πιο γενικεύσιμων συστημάτων. Οι μελέτες δείχνουν ότι οι

Transformers και ο μηχανισμός self-attention αλλάζουν το πεδίο της αποκωδικοποίησης, προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια και ανθεκτικότητα σε σχέση με τα παλαιότερα μοντέλα.

Η εφαρμογή των διεπαφών εγκεφάλου–υπολογιστή (BCI) δεν περιορίζεται στην έρευνα, αλλά έχει ήδη δείξει σημαντικές δυνατότητες σε θεραπευτικό και επικοινωνιακό επίπεδο. Οι Luo et al. (2022) τόνισαν ότι τα BCI μπορούν να δώσουν νέα μέσα επικοινωνίας σε άτομα με αφασία, locked-in syndrome και άλλες σοβαρές νευρολογικές παθήσεις. Έτσι θα γίνει δυνατή η μετατροπή των νευρικών σημάτων σε λόγο ή κείμενο. Αυτές οι τεχνολογίες ανοίγουν τον δρόμο για να βοηθήσουν ανθρώπους που δυσκολεύονται να επικοινωνήσουν, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να μιλήσουν. Ωστόσο, οι Qiu et al. (2025) τόνισαν ότι αυτές οι τεχνολογίες φέρνουν και ηθικές προκλήσεις. Ζητήματα όπως η προστασία της ιδιωτικότητας και η ενημερωμένη συναίνεση είναι κρίσιμα για την υπεύθυνη χρήση τους. Με τα παραπάνω, οι θεραπευτικές και επικοινωνιακές εφαρμογές των BCI αναδεικνύουν τη διπλή τους συμβολή. Από τη μία, ενισχύουν την ποιότητα ζωής των ασθενών και από την άλλη, θέτουν την πρόκληση της υπεύθυνης χρήσης με έμφαση στην προστασία των δικαιωμάτων τους.

Η έρευνα στον τομέα της αποκωδικοποίησης της ομιλίας έχει προχωρήσει ιδιαίτερα χάρη στην τεχνητή νοημοσύνη. Πλέον, μπορούμε να μετατρέπουμε τα εγκεφαλικά σήματα σε λόγο και κείμενο με νευρωνικά σήματα (Anumanchipalli et al., 2019· Sun et al., 2020), χρησιμοποιώντας προηγμένα μοντέλα όπως οι Transformers (Lee & Lee, 2022· Komeiji et al., 2024). Ο συνδυασμός μεθόδων όπως το EEG και το fNIRS (Shah et al., 2022· Luo et al., 2022· Qiu et al., 2025) κάνει τα συστήματα αυτά πιο αξιόπιστα και σταθερά. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα σημαντικά προβλήματα. Για παράδειγμα, τον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα αυτά λειτουργούν σε θορυβώδες περιβάλλον, το κατά πόσο μπορούν να εφαρμοστούν σε όλους τους ανθρώπους αλλά και διάφορα ηθικά ζητήματα. Η επιτυχία σε αυτόν τον τομέα θα εξαρτηθεί από τον συνδυασμό τεχνολογικής καινοτομίας και υπεύθυνης εφαρμογής .

### 3.3.2. Ακουστικές διεπαφές και *adaptive* τεχνολογίες (*sonification*)

Η **sonification** (ηχοποίηση) ορίζεται ως η διαδικασία μετατροπής δεδομένων σε μη λεκτικά ηχητικά σήματα, με στόχο τη βελτίωση της κατανόησης και της ανάλυσης πληροφοριών μέσω της ακουστικής αντίληψης (Nees & Walker, 2009). Αποτελεί το ακουστικό ισοδύναμο των οπτικών αναπαραστάσεων, όπως τα γραφήματα και βασίζεται στην έμφυτη ικανότητα του ανθρώπινου ακουστικού συστήματος να επεξεργάζεται παράλληλα πολλαπλές πληροφορίες και γρήγορα. Σε αντίθεση με τις οπτικές διεπαφές, οι ακουστικές διεπαφές επιτρέπουν την παράλληλη επεξεργασία πληροφοριών κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για άτομα με οπτικές αναπηρίες (Watson & Kidd, 1994). Οι Flowers & Hauer (1993) και Flowers et al.

(2005) έδειξαν ότι η μέθοδος αυτή μπορεί όχι μόνο να συμπληρώσει αλλά και να αντικαταστήσει τα οπτικά γραφήματα, καθώς είναι ικανή να αποκαλύψει μοτίβα και συσχετίσεις στα δεδομένα που ενδέχεται να παραμείνουν αθέατα με καθαρά οπτικές μεθόδους. Η χρήση του ήχου προσφέρει επίσης, μια δυναμική διάσταση στην ανάλυση των δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο η εμπειρία γίνεται πιο άμεση και σε πολλές περιπτώσεις πιο αποτελεσματική. Έτσι η ηχοποίηση εξελίσσεται σε ένα ισχυρό τεχνολογικό εργαλείο που ενισχύει την πρόσβαση στην πληροφορία. Διευκολύνει ακόμη, την κατανόηση σύνθετων δεδομένων, που έχουν εφαρμογές σε τομείς όπως η υγεία, η αποκατάσταση και οι διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή (BCI).

Η ιστορία της ηχοποίησης, ξεκινά στις αρχές του 20ού αιώνα με τις πρώτες ηχογραφήσεις της ηλεκτρικής δραστηριότητας του εγκεφάλου από τον Hans Berger, χρησιμοποιώντας το EEG. Ήδη οι Adrian και Bronk (1929) είχαν δείξει ότι η ακουστική αναπαράσταση νευρικών εκφορτίσεων μπορεί να αποκαλύψει μοτίβα που δεν είναι εύκολα ορατά σε γραφήματα. Αργότερα, η χρήση του EEG οδήγησε σε πρώτες εφαρμογές μετατροπής βιοηλεκτρικών δεδομένων σε ήχο. Οι Lutters και Koehler (2017) περιγράφουν πώς αυτές οι πρώιμες πρακτικές εξελίχθηκαν από καθαρά διαγνωστικές χρήσεις σε πειραματικά και καλλιτεχνικά περιβάλλοντα, δείχνοντας τη διπλή λειτουργία της ηχοποίησης ως επιστημονικό εργαλείο και μέσο δημιουργικής έκφρασης. Με την εξέλιξη της πληροφορικής, η ηχοποίηση ενσωματώθηκε σε συστήματα που χρησιμοποιούν περισσότερες από μία αισθήσεις. Συνδιάζουν τον ήχο με την όραση και την αφή, ώστε η κατανόηση των δεδομένων να είναι πιο ολοκληρωμένη (Song & Beilharz, 2008). Η εξέλιξη της μεθόδου μέχρι τώρα, δείχνει τη μετάβαση από την απλή απεικόνιση δεδομένων σε ένα πολύπλευρο τεχνολογικό εργαλείο το οποίο έχει εφαρμογές στην εκπαίδευση, την υποστήριξη ατόμων με αναπηρίες και την ανάπτυξη προηγμένων διεπαφών εγκεφάλου-υπολογιστή.

Η sonification βασίζεται σε τεχνικές που μετατρέπουν δεδομένα σε ήχους με τρόπο που να διευκολύνει την κατανόηση σύνθετων πληροφοριών. Μια βασική μέθοδος είναι η αντιστοίχιση δεδομένων σε ηχητικά χαρακτηριστικά, όπως το ύψος, ο ρυθμός, η ένταση ή το ηχόχρωμα, ώστε να αποδίδονται παραμέτρους των δεδομένων και να αναδεικνύονται τάσεις και μοτίβα (Nees & Walker, 2009). Άλλη σημαντική τεχνική είναι η χωρική sonification, που αξιοποιεί χωρικά ηχητικά ερεθίσματα για την αναπαράσταση αποστάσεων και διαστάσεων, με ιδιαίτερη εφαρμογή σε αισθητηριακή υποκατάσταση για άτομα με προβλήματα όρασης (Commère & Rouat, 2023). Η ακουστική κίνηση χρησιμοποιείται για να αποδώσει δυναμικές αλλαγές στο χρόνο, επιτρέποντας στους χρήστες να παρακολουθούν εξελίξεις σε δεδομένα υγείας ή περιβάλλοντος (Zhao & Tzanetakis, 2024). Τέλος, η πολυ-ροϊκή sonification δίνει τη

δυνατότητα ταυτόχρονης αναπαράστασης πολλών ροών δεδομένων μέσω διαφορετικών ηχητικών καναλιών. Αυτό διευκολύνει ιδιαίτερα την κατανόηση και τη σύγκριση σύνθετων πληροφοριών (Nees & Walker, 2009). Οι τεχνικές αυτές δείχνουν πώς ο ήχος μπορεί να γίνει ένα χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση δεδομένων. Έτσι, βελτιώνονται οι τεχνολογίες ήχου και οι εφαρμογές τους διευρύνονται σε πολλούς τομείς.

Η sonification έχει βρει εφαρμογές σε προσαρμοστικές και υποστηρικτικές τεχνολογίες, κυρίως μέσω των διεπαφών εγκεφάλου-υπολογιστή (BCIs). Μη επεμβατικές μέθοδοι όπως τα EEG-BCIs δίνουν τη δυνατότητα σε άτομα με σοβαρές κινητικές αναπηρίες να επικοινωνούν και να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς τους προσφέρεται μεγαλύτερη αυτονομία (Jamil et al., 2021). Σε άλλα πλαίσια, οι ακουστικές αναπαραστάσεις μπορούν να βελτιώσουν την εκπαίδευση, να ενισχύσουν τη δημιουργικότητα στην τέχνη και να προάγουν την ψυχική υγεία (Nijholt et al., 2022). Προς αυτή την κατεύθυνση μια σημαντική καινοτομία αποτελούν τα χωρικά ακουστικά BCI. Αυτά δίνουν πληροφορίες για αποστάσεις και κατευθύνσεις, διευκολύνοντας έτσι ιδιαίτερα την πλοήγηση ατόμων με οπτική αναπηρία (Zhang, H. et al., 2025). Παράλληλα, η χρήση τεχνητής νοημοσύνης επιτρέπει την προσαρμογή της ακουστικής ανατροφοδότησης σε πραγματικό χρόνο, βελτιώνοντας την ακρίβεια και την αποδοτικότητα των συστημάτων (Butorova & Sergeev, 2025). Ακόμη, η sonification δεν λειτουργεί μόνο ως υποστήριξη, αλλά και ως εργαλείο ενδυνάμωσης. Συγκεκριμένα, διευκολύνει την καθημερινή ζωή αλλά και την επικοινωνία των χρηστών σε διάφορα περιβάλλοντα. Ένα παράδειγμα εφαρμογής της ανάλυσης ακουστικής σκηνής σε BCI είναι η χρήση auditory stream segregation των Kojima, S., & Kanoh, S. I. (2024). Σε αυτό το πείραμα, οι συμμετέχοντες έπρεπε να προσέξουν έναν συγκεκριμένο ήχο ανάμεσα σε τρεις διαφορετικές σειρές τόνων. Οι ερευνητές κατάφεραν να καταγράψουν αυτή την εστίαση της προσοχής με το EEG και να ξεχωρίσουν σωστά σε ποια ροή ήταν στραμμένη η προσοχή τους. Αν και δεν χρησιμοποιούνται άμεσα χημικοί ήχοι, υπάρχει παρόμοια λογική, καθώς βασίζεται στη δυνατότητα του εγκεφάλου να διαχωρίζει ή να συνδυάζει ακουστικά ερεθίσματα για τον έλεγχο διεπαφών.

Η νευροπλαστικότητα, δηλαδή η ικανότητα του εγκεφάλου να προσαρμόζεται μέσω της εμπειρίας, είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό διεπαφών sonification. Σε άτομα με κώφωση παρατηρείται μια δια-αισθητηριακή πλαστικότητα. Ειδικότερα, συχνά παρατηρείται η αναπτυξη ενισχυμένων οπτικών και απτικών ικανοτήτων που μπορούν να αξιοποιηθούν σε ακουστικές διεπαφές (Bavelier et al., 2006). Ακόμη, η νευροπλαστικότητα του εγκεφάλου επιτρέπει στα παιδιά με απώλεια ακοής να προσαρμόζονται σε νέα ακουστικά ερεθίσματα με τη βοήθεια συσκευών όπως τα ακουστικά βαρηκοΐας και τα κοχλιακά εμφυτεύματα, κάτι που

είναι κρίσιμο για την επιτυχημένη αποκατάσταση της ακοής τους (Cardon et al., 2012). Παράλληλα, η ανάλυση των μηχανισμών της ακοής δείχνει ότι η κατανόηση της χωρικής επεξεργασίας και του εντοπισμού ήχου μπορεί να βελτιώσει τη δημιουργία πολυδιάστατων ακουστικών διεπαφών (Recanzone & Sutter, 2008). Συμπερασματικά, η αξιοποίηση της νευροπλαστικότητας μπορεί να κάνει τις διεπαφές sonification πιο αποτελεσματικές, πιο προσιτές και καλύτερα προσαρμοσμένες στις δυνατότητες διαφορετικών ομάδων χρηστών.

Η ανάπτυξη αποτελεσματικών διεπαφών sonification αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις. Μία βασική δυσκολία είναι ο γνωστικός φόρτος: όταν τα δεδομένα είναι πολύπλοκα, οι χρήστες δυσκολεύονται να τα επεξεργαστούν (Nijholt et al., 2022). Η προσαρμοστικότητα των ανθρώπων σε νέα εργαλεία ή τεχνολογίες ποικίλλει γιατί εξαρτάται από το γνωστικό τους υπόβαθρο αλλά και τον τρόπο με τον οποίο σκέφτονται (Cardon et al., 2012). Για αυτό το λόγο, απαιτούνται διεπαφές που να προσαρμόζονται στις ανάγκες του κάθε χρήστη και να του προσφέρουν σαφή ανατροφοδότηση προκειμένου να προσαρμοστεί πιο γρήγορα και αποτελεσματικά. Μελλοντικά, η ηχοποίηση αναμένεται να βελτιώσει τη χαρτογράφηση δεδομένων σε ήχους, μειώνοντας τον γνωστικό φόρτο (Woo et al., 2021). Επιπλέον, οι πολυτροπικές διεπαφές που συνδυάζουν ακουστικά, οπτικά και απτικά ερεθίσματα μπορούν να ενισχύσουν την κατανόηση σύνθετων πληροφοριών (Nijholt et al., 2022). Οι εφαρμογές της μεθόδου επεκτείνονται πέρα από την έρευνα, συμπεριλαμβάνοντας την εκπαίδευση, την πλοήγηση για άτομα με οπτικές αναπηρίες και τα έξυπνα περιβάλλοντα (Hildt, 2020). Συνοψίζοντας, η ηχοποίηση ξεπερνά τον ρόλο μιας απλής τεχνικής απεικόνισης και καθιστά την πληροφορία πιο προσβάσιμη από ποτέ. Έτσι ενισχύεται η αλληλεπίδραση ανθρώπου-τεχνολογίας και γίνεται πιο προσιτή η συμμετοχή ευρύτερου πληθυσμού.

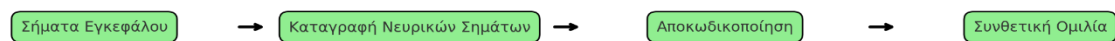
Εν ολίγης, η sonification δείχνει πώς ο ήχος μπορεί να μεταφέρει δεδομένα και να βελτιώσει την πρόσβαση στην πληροφορία. Παράλληλα, συνδέεται με πειραματικά εργαλεία όπως οι χιμαιρικοί ήχοι, που βοηθούν στη μελέτη της ακουστικής αντίληψης. Έτσι, λειτουργεί τόσο ως πρακτικό εργαλείο όσο και ως μέσο έρευνας για το πώς ο εγκέφαλος οργανώνει τον ήχο.

### *3.3.3. Νευροτεχνολογικές Εφαρμογές και Προοπτικές*

Οι διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή (BCIs) αποτελούν μια νέα τεχνολογία που επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ του εγκεφάλου και των εξωτερικών συσκευών. Μέσα από την αποκωδικοποίηση της νευρικής δραστηριότητας, τα BCIs βοηθάνε άτομα με σοβαρές διαταραχές λόγου μετατρέποντας τα εγκεφαλικά σήματα σε εντολές και συνθετική ομιλία. Η τεχνολογία αυτή, είναι ιδιαίτερα σημαντική για ασθενείς με αμυοτροφική πλευρική σκλήρυνση (ALS) ή locked-in syndrome (LIS). Σε τέτοιες περιπτώσεις οι παραδοσιακές

μορφές επικοινωνίας είναι περιορισμένες ή απρόσιτες (Mane et al., 2022· Angrick et al., 2024). Σε πιο πρόσφατη μελέτη εμφανίστηκε ανάπτυξη διαφόρων μεθόδων όπως η ηλεκτροκορτικογραφία (ECoG) και οι ενδοφλοιϊκές καταγραφές υψηλής ανάλυσης. Αυτό βοήθησε σημαντικά στην ακρίβεια των σημάτων που έχουν να κάνουν με την ομιλία (Luo et al., 2022· Stavisky, 2025). Παράλληλα, η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης σε αυτά τα συστήματα έχει μετατρέψει τα BCIs σε πιο εξελιγμένες εφαρμογές που θυμίζουν τη φυσική επικοινωνία (Brumberg et al., 2010· Stavisky, 2025). Έτσι, τα BCIs αποτελούν ένα από τα πιο βασικά εργαλεία στην αποκατάσταση της ομιλίας και συνεπώς τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ασθενών. (Σχήμα 2)

Ροή Σήματος σε BCI για Ομιλία



*Σχήμα 2. Ροή διεπαφής εγκεφάλου–υπολογιστή (BCI): Νευρική δραστηριότητα → Καταγραφή (EEG/ECoG) → Επεξεργασία & AI → Αποκωδικοποίηση → Έξοδος (συνθετική ομιλία/συσκευές) (Mane et al., 2022· Luo et al., 2022· Stavisky, 2025).*

Σε νευροεκφυλιστικές παθήσεις, οι ασθενείς συχνά χάνουν πλήρως την ικανότητα ομιλίας και επικοινωνίας. Ωστόσο, έχουν δημιουργηθεί νέες λύσεις μέσω των διεπαφών εγκεφάλου–υπολογιστή (BCIs). Αυτές, επιτρέπουν τη σταθερή επικοινωνία μέσω σημάτων τοπικού πεδίου (Local Field Potentials, LFPs). Τα LFPs είναι ηλεκτρικά σήματα που καταγράφονται από μικρές ομάδες νευρώνων και αντανακλούν τη συγχρονισμένη δραστηριότητα τους σε μια τοπική περιοχή του εγκεφάλου (Milekovic et al., 2018). Η μελέτη των Milekovic et al. (2018) έδειξε ότι ασθενείς με ALS και LIS είχαν συνεχή και αξιόπιστη επικοινωνία χωρίς σημαντική απώλεια απόδοσης. Με αυτόν τον τρόπο αναδείχθηκε ότι τα LFP-based BCIs είναι πιο σταθερά σε σχέση με άλλες μεθόδους που απαιτούν συνεχείς αναδιαμορφώσεις. Σε πιο πρόσφατες έρευνες, οι Angrick et al. (2024) παρουσίασαν τη χρήση εμφυτευμένων BCIs για σύνθεση λόγου σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας στους ασθενείς έναν πιο φυσικό τρόπο επικοινωνίας. Παράλληλα, τα BCIs βρίσκουν εφαρμογές και στην αποκατάσταση ασθενών μετά από εγκεφαλικό επεισόδιο, όπου μπορούν να υποστηρίξουν την ανάκτηση της ομιλίας και να ενισχύσουν τη συμμετοχή στη θεραπεία μέσω στοχευμένων νευρικών σημάτων (Mane et al., 2022). Τα συστήματα αυτά δίνουν νέες δυνατότητες σε άτομα με σοβαρές επικοινωνιακές αναπηρίες, βελτιώνοντας τόσο την αυτονομία όσο και την ποιότητα ζωής τους.

Οι νευροπροσθήσεις αποτελούν ένα από τα πιο ελπιδοφόρα πεδία για την αποκατάσταση της φυσικής ομιλίας σε άτομα με σοβαρές διαταραχές. Η μελέτη των Moses et al. (2021) έδειξε

ότι τα εγκεφαλικά σήματα ενός ασθενή με πλήρη αναρθρία, είναι δυνατόν να μετατραπούν σε συνθετική ομιλία. Οι καταγραφές στο εσωτερικό του ακουστικού φλοιού φαίνεται ότι μπορούν να ξεπεράσουν σοβαρά εμπόδια στην επικοινωνία. Σε μια πιο πρόσφατη μελέτη, οι Littlejohn et al. (2025), δημιούργησαν μια συσκευή που μετατρέπει τα εγκεφαλικά σήματα απευθείας σε φωνή. Αυτή η συσκευή επιτρέπει στον χρήστη να μιλάει με έναν πιο φυσικό και ρευστό τρόπο, σχεδόν σαν να μιλάει κανονικά. Αντίστοιχα, οι Angrick et al. (2024) απέδειξαν ότι μέσω ηλεκτροκορτικογραφικών καταγραφών μπορεί να παραχθεί διαδικτυακά, κατανοητή συνθετική ομιλία που διατηρεί στοιχεία της προσωπικής φωνής του χρήστη. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι οι νευροπροσθέσεις μπορούν να γεφυρώσουν το χάσμα ανάμεσα στην πρόθεση για ομιλία και στην εκφορά της, ενώ η επόμενη πρόκληση είναι η μετάβαση από τα εργαστήρια στην καθημερινή χρήση, ώστε οι ασθενείς να αποκτήσουν πραγματικά λειτουργικά και βιώσιμα εργαλεία επικοινωνίας. Αν και οι χιμαιρικοί ήχοι δεν έχουν μέχρι σήμερα χρησιμοποιηθεί άμεσα σε BCI πειράματα, η μελέτη τους έχει αναδείξει τον κρίσιμο ρόλο της περιβάλλουσας και της λεπτοδομής στην κατανόηση του λόγου. Αυτή η γνώση παρέχει θεωρητικό υπόβαθρο για τη βελτίωση αλγορίθμων DSP και τεχνητής νοημοσύνης, που χρησιμοποιούνται ήδη στις διεπαφές εγκεφάλου–υπολογιστή για την αποκατάσταση της ομιλίας. Με αυτόν τον τρόπο, οι χιμαιρικοί ήχοι, αν και ανήκουν στη βασική ψυχοακουστική έρευνα, συμβάλλουν έμμεσα στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών BCI εφαρμογών.

Η μελέτη της εσωτερικής ομιλίας (inner speech) και της φανταστικής ομιλίας (speech imagery) ανοίγει νέους δρόμους για την επικοινωνία μέσω διεπαφών εγκεφάλου–υπολογιστή. Οι Martin et al. (2018) έδειξαν ότι η αποκωδικοποίηση της εσωτερικής ομιλίας με ηλεκτροκορτικογραφία είναι εφικτή, αλλά παρουσιάζει δυσκολίες, επειδή τα νευρικά σήματα δεν είναι πάντα σταθερά και δεν υπάρχουν εξωτερικά σημάδια για να καθοδηγήσουν την αποκωδικοποίηση. Ως φανταστική ομιλία ορίζεται η νοητική αναπαράσταση λέξεων και προτάσεων χωρίς φωνητική παραγωγή. Οι Tate et al. (2025) τόνισαν ότι η φανταστική ομιλία μπορεί να προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για την ανάπτυξη BCIs μέσω της οποίας οι σκέψεις θα μετατρέπονται σε κατανοητές ενέργειες. Με λίγα λόγια, οι δύο προσεγγίσεις δείχνουν ότι, παρά τις προκλήσεις, η αποκωδικοποίηση μη αρθρωμένης ομιλίας αποτελεί ένα ελπιδοφόρο πεδίο για την ενίσχυση της επικοινωνίας σε άτομα με σοβαρές διαταραχές λόγου.

Η λειτουργία των διεπαφών εγκεφάλου–υπολογιστή εξαρτάται από το πόσο καθαρά και σταθερά καταγράφονται τα νευρικά σήματα. Μέθοδοι όπως η ηλεκτροκορτικογραφία (ECoG), τα σήματα τοπικού πεδίου (LFPs) και η ηλεκτροεγκεφαλογραφία (EEG) έχουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (Milekovic et al., 2018). Ωστόσο, τα σήματα συχνά χάνουν σε ποιότητα με τον χρόνο, για παράδειγμα λόγω φθοράς των ηλεκτροδίων ή αλλαγών στον

ιστό, κάτι που περιορίζει τη μακροχρόνια χρήση (Stavisky, 2025). Επίσης, τεχνικές όπως η διακρανιακή μαγνητική διέγερση μπορεί να δημιουργήσουν ανεπιθύμητο θόρυβο. Σημαντική είναι η δημιουργία πιο αθόρυβων πηνίων τα οποία φαίνεται να έχουν βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια των σημάτων (Murphy et al., 2024). Η λύση των παραπάνω ζητημάτων είναι απαραίτητη προκειμένου τα BCIs να γίνουν πιο αξιόπιστα και χρήσιμα στην καθημερινή ζωή.

Οι διεπαφές εγκεφάλου–υπολογιστή (BCIs) φαίνεται να έχουν πολλές μελλοντικές προοπτικές. Με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης και ειδικότερα των μοντέλων τύπου transformer, έχει βελτιωθεί η αποκωδικοποίηση της ομιλίας, μετατρέποντάς την σε πιο φυσική και ακριβή (Stavisky, 2025· Luo et al., 2022). Παράλληλα, τα προσαρμοστικά BCIs έχουν τη δυνατότητα να «μαθαίνουν» από τον κάθε χρήστη, προσφέροντας πιο εξατομικευμένη και αποτελεσματική υποστήριξη στην αποκατάσταση (Stavisky, 2025). Ωστόσο, οι τεχνολογικές εξελίξεις συνοδεύονται από ηθικές προκλήσεις, όπως η προστασία των προσωπικών νευρικών δεδομένων και η ανάγκη για ισότιμη πρόσβαση (Luo et al., 2022). Έτσι, τα BCIs μπορούν να αλλάξουν ριζικά τον τρόπο με τον οποίο αποκαθίσταται η επικοινωνία σε άτομα με σοβαρές αναπηρίες, αρκεί η πρόοδος να συνδυάζεται με υπευθυνότητα και σεβασμό προς τον χρήστη.

### *3.3.4. Ακουστική Ανάλυση και Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος (DSP)*

Η Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος (Digital Signal Processing, DSP) αποτελεί το βασικό υπόβαθρο της ανάλυσης ήχου και ομιλίας, αφού επιτρέπει την αποθήκευση, τον χειρισμό και τον μετασχηματισμό των ακουστικών σημάτων με μαθηματικές μεθόδους. Στο επίκεντρό της βρίσκεται η μετατροπή των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακό, κάτι που καθιστά δυνατή την ανάλυση και την περαιτέρω επεξεργασία τους. Οι αρχές που διατυπώθηκαν από τους Oppenheim & Schaffer (2010), όπως η δειγματοληψία και ο σχεδιασμός φίλτρων, αποτελούν το θεμέλιο για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα σήματα μετατρέπονται, ανακατασκευάζονται και τελικά γίνονται αξιοποιήσιμα σε εφαρμογές επεξεργασίας λόγου.

Η αναπαράσταση και ανάλυση του λόγου βασίζεται στην εξαγωγή χαρακτηριστικών που κρατούν τις πιο σημαντικές ακουστικές πληροφορίες. Μία πολύ γνωστή μέθοδος είναι η Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs), που δημιουργήθηκε από τους Davis & Mermelstein (1980). Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται η κλίμακα Mel. Πρόκειται για μια αντιληπτική κλίμακα που περιγράφει τις συχνότητες και πώς ο άνθρωπος τις αντιλαμβάνεται. Στη μέθοδο Mel παρατηρείται ότι οι υψηλότερες συχνότητες δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτές τόσο εύκολα όσο οι χαμηλές. Οι MFCCs μετατρέπουν την πληροφορία του λόγου σε μια πιο κατανοητή μορφή για τον άνθρωπο. Έτσι, διευκολύνεται η αναγνώριση φωνημάτων και λέξεων. Άλλη μία σημαντική μέθοδος είναι η Perceptual Linear Prediction (PLP), που εισήγαγε

ο Hermansky (1990). Η PLP στηρίζεται κυρίως σε ψυχοακουστικές αρχές όπως οι κριτικές ζώνες και οι καμπύλες ίσης ακουστότητας. Οι πρώτες αναλύουν τον τρόπο με τον οποίο το αυτί χωρίζει το φάσμα που επεξεργάζεται σε διαφορετικές περιοχές. Οι δεύτερες, δείχνουν ότι δεν ακούμε όλες τις συχνότητες το ίδιο δυνατά. Έτσι, η PLP μειώνει τις διαφορές ανάμεσα σε διαφορετικούς ομιλητές και αναπαριστά τον ήχο με τρόπο που ταιριάζει καλύτερα στον τρόπο που ο εγκέφαλος τον αντιλαμβάνεται. Οι δύο αυτές μέθοδοι αποτέλεσαν σημαντικά βήματα για την ανάπτυξη των συστημάτων αναγνώρισης ομιλίας, γιατί συνδύασαν την τεχνολογική επεξεργασία με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης ακοής.

Η αποθορυβοποίηση και η ενίσχυση σήματος είναι βασικές διαδικασίες στην επεξεργασία των ακουστικών δεδομένων. Συγκεκριμένα είναι υπεύθυνες για τη βελτίωση της ευκρίνειας και της κατανόησης της ομιλίας σε δύσκολες συνθήκες. Μία πρώιμη μέθοδος είναι η φασματική αφαίρεση (spectral subtraction). Σε αυτή υπολογίζεται το φάσμα του θορύβου και αφαιρείται από το αρχικό σήμα. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η ποιότητα του λόγου, ωστόσο μερικές φορές δημιουργούνται τεχνητά παράσιτα (Boll, 2003). Τα επόμενα χρόνια αναπτύχθηκαν πιο εξελιγμένες τεχνικές που προσφέρουν πιο φυσικό αποτέλεσμα, όπως ο εκτιμητής MMSE-STSA (Minimum Mean Square Error – Short Time Spectral Amplitude). Αυτή η τεχνική όχι μόνο αφαιρεί τον θόρυβο, αλλά και υπολογίζει την πιο πιθανή στατιστικά καθαρή μορφή του σήματος (Ephraim & Malah, 2003). Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης σε σύγχρονες μεθόδους, έχει φέρει σημαντικές βελτιώσεις ακόμη και σε πολύπλοκα ακουστικά περιβάλλοντα. Συγκεκριμένα, εφαρμόζονται μέθοδοι βαθιάς μάθησης που εκπαιδεύουν τα νευρωνικά δίκτυα έτσι ώστε να διαχωρίζουν αυτόματα τον λόγο από τον θόρυβο (Wang & Chen, 2018). Η εξέλιξη των σύγχρονων αυτών μεθόδων, έχει βελτιώσει σημαντικά την επεξεργασία του σήματος. Αυτό φαίνεται στις νέες τεχνολογίες όπως τα ακουστικά βαρηκοΐας, τα κοχλιακά εμφυτεύματα και τα συστήματα αυτόματης αναγνώρισης ομιλίας. Σε αυτό το πλαίσιο, η μελέτη των Heinz και Swaminathan (2009) με χιμαιρικούς ήχους έδειξε ότι η περιβάλλουσα της ομιλίας κωδικοποιείται πιο πιστά από τη λεπτοδομή στο ακουστικό νεύρο. Το εύρημα αυτό καθοδηγεί τη DSP να δίνει έμφαση σε χαρακτηριστικά που συνδέονται άμεσα με τον τρόπο που ο εγκέφαλος επεξεργάζεται τον λόγο. Συμπληρωματικά, οι Wirtzfeld, Ibrahim και Bruce (2017) έδειξαν ότι η κατανόηση του λόγου σε chimaeric speech βελτιώνεται όταν συνδυάζονται οι πληροφορίες από την περιβάλλουσα με εκείνες από τη λεπτοδομή. Αυτό δείχνει ότι η λεπτοδομή παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανόηση σε δύσκολες ακουστικές συνθήκες και προσφέρει χρήσιμες κατευθύνσεις για τον σχεδιασμό αλγορίθμων DSP και ακουστικών τεχνολογιών.

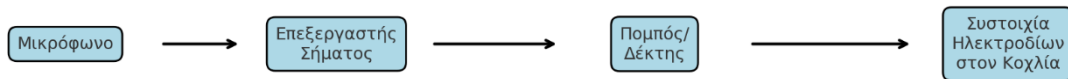
Τα τελευταία χρόνια η ακουστική επεξεργασία σήματος προχωρά πέρα από τις κλασικές μεθόδους, με την εμφάνιση τεχνολογιών που μιμούνται τον τρόπο λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Τα νευρομορφικά συστήματα, τα οποία έχουν σχεδιαστεί να μιμούνται τον τρόπο λειτουργίας του εγκεφάλου, βασίζονται σε ειδικά ηλεκτρονικά στοιχεία όπως οι memristors. Οι memristors έχουν την ικανότητα να διατηρούν πληροφορίες που σχετίζονται με την προηγούμενη κατάσταση της αγωγιμότητάς τους. Αντίστοιχα με τις βιολογικές συνάψεις οι οποίες ενισχύουν ή αποδυναμώνουν τις συνδέσεις τους με βάση την εμπειρία. Με τον τρόπο αυτό, οι συσκευές κάνουν όχι μόνο στατικούς υπολογισμούς, αλλά λαμβάνουν ακομη, υπόψη την αλλαγή και εξέλιξη των ήχων με το χρόνο, όπως αντίστοιχα συμβαίνει και στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Έρευνες όπως αυτή των Zeng et al. (2023) δείχνουν ότι οι memristors μπορούν να υποστηρίξουν πιο φυσική και δυναμική ακουστική επεξεργασία, προσεγγίζοντας τον τρόπο που ο εγκέφαλος αναλύει τα ερεθίσματα. Συγκεκριμένα, η μελέτη έδειξε ότι τέτοιες συσκευές μπορούν να επεξεργάζονται πληροφορίες σχετικές με την κίνηση του ήχου, αξιοποιώντας μηχανισμούς που θυμίζουν τη νευροπλαστικότητα του εγκεφάλου. Έτσι, πιο φυσικές και αποδοτικές λύσεις μπορούν να δημιουργηθούν, σε εργαλεία όπως τα ακουστικά βοηθήματα και η ρομποτική ακοή. Παράλληλα, η ταυτόχρονη συνέργεια της DSP με την τεχνητή νοημοσύνη (AI) και τις διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή (BCI) οδηγεί σε νέα είδη ακουστικών διεπαφών. Οι αλγόριθμοι επιτρέπουν την ανάλυση σύνθετων ακουστικών σκηνών, ενώ μπορούν επίσης να διαχωρίζουν διαφορετικές πηγές ήχου και να βελτιώνουν την ποιότητα του λόγου σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο η εμπειρία ακοής γίνεται πιο εξατομικευμένη και πιο κοντά στη φυσική και οι αλγόριθμοι προσαρμόζονται στο περιβάλλον και στις ανάγκες του χρήστη.

### *3.3.5. Αισθητηριακή αποκατάσταση & θεραπευτική χρήση*

Τα κοχλιακά εμφυτεύματα είναι τα πιο γνωστά νευροπροσθετικά ακουστικά και απευθύνονται σε άτομα με σοβαρή ή ολική απώλεια ακοής. Πρόκειται για συσκευές που παρακάμπτουν τα κατεστραμμένα τμήματα στο εσωτερικό του αυτιού και στέλνουν άμεσα σήματα στο ακουστικό νεύρο μέσα από ηλεκτρόδια που έχουν τοποθετηθεί στον κοχλία. Αποτελούνται από ένα εξωτερικό τμήμα το οποίο περιέχει το μικρόφωνο, τον επεξεργαστή σήματος και τον πομπό, και ένα εσωτερικό με τον δέκτη και τη συστοιχία ηλεκτροδίων. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, οι ήχοι μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα που ο εγκέφαλος ερμηνεύει ως ακουστικές πληροφορίες (Wilson & Dorman, 2008· Loizou, 1999· Zeng, Rebscher, Harrison, Sun, & Feng, 2008). Στο πλαίσιο αυτό, η αισθητηριακή αποκατάσταση δεν περιορίζεται μόνο στην αποκατάσταση της ακοής, αλλά συνδέεται με τη

νευροπλαστικότητα, την ακουστική εκπαίδευση και καινοτόμες θεραπευτικές παρεμβάσεις που θα αναλυθούν στις επόμενες υποενότητες. (Σχήμα 3)

Σχηματική Αναπαράσταση Κοχλιακού Εμφυτεύματος



*Σχήμα 3. Σχηματική απεικόνιση κοχλιακού εμφυτεύματος: Μικρόφωνο → Επεξεργαστής σήματος → Πομπός/Δέκτης → Ηλεκτρόδια στον κοχλία. Προσαρμογή με βάση Wilson & Dorman (2008).*

#### *Νευροπλαστικότητα και χρονικά παράθυρα ανάπτυξης*

Στην αισθητηριακή αποκατάσταση, η έρευνα για τη νευροπλαστικότητα έχει αναδείξει διαφορετικές όψεις ανάλογα με την ηλικία και τους μηχανισμούς του εγκεφάλου. Στα παιδιά, οι μελέτες των Sharma et al. (2002, 2025) έδειξαν ότι η πρόωμη εμφύτευση κοχλιακών εμφυτευμάτων πριν τα 3,5 έτη, οδηγεί σε πιο φυσιολογική ανάπτυξη του ακουστικού φλοιού και καλύτερες γλωσσικές επιδόσεις. Καλύτερα αποτελέσματα έχουν παρατηρηθεί με την συνδυαστική γλωσσική θεραπεία. Ουσιαστική αν και πιο περιορισμένη παραμένει η νευροπλαστικότητα στους ενήλικες και ηλικιωμένους. Η χρήση ακουστικών βαρηκοΐας φαίνεται να βελτιώνει την κατανόηση λόγου και τις γνωστικές λειτουργίες (Glick & Sharma, 2020). Η αποκατάσταση της ακοής σε αυτά τα άτομα έχει οδηγήσει σε λειτουργικές προσαρμογές αλλά με πιο αργούς ρυθμούς (Lazard et al., 2023). Παράλληλα, σε χρήστες κοχλιακών εμφυτευμάτων έχουν καταγραφεί σημαντικές αλλαγές στον ακουστικό φλοιό, με αναδιοργάνωση της συνδεσιμότητας και αυξημένη ανταπόκριση σε ακουστικά ερεθίσματα (Glennon et al., 2020). Σε αυτό το πλαίσιο, η διαθεματική πλαστικότητα, όπου ο ακουστικός φλοιός ενεργοποιείται από οπτικά ή απτικά ερεθίσματα, μπορεί να λειτουργήσει υποστηρικτικά στην αποκατάσταση, όπως δείχνει η συμβολή της χειλεανάγνωσης (Anderson et al., 2017). Το μοντέλο του connectome (Kral et al., 2016) υπογραμμίζει τη στενή σχέση μεταξύ αισθητηριακών και γνωστικών μηχανισμών, τονίζοντας την ανάγκη για πολυπαραγοντικές προσεγγίσεις. Τέλος, πιο πρόσφατες μελέτες των Glennon et al. (2023) ανέδειξαν τη σημασία του locus coeruleus και του νοραδρενεργικού συστήματος, ως κεντρικών παραγόντων βελτίωσης της απόδοσης των κοχλιακών εμφυτευμάτων.

### *Ακουστική εκπαίδευση και θεραπευτικά πρωτόκολλα*

Η ακουστική εκπαίδευση (Auditory Training – AT) είναι μια θεραπευτική προσέγγιση που βελτιώνει την ικανότητα κατανόησης της ομιλίας μέσα από συστηματική και επαναλαμβανόμενη έκθεση σε ήχους. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στους ενήλικες χρήστες κοχλιακών εμφυτευμάτων. Για παράδειγμα, τα πρώτα ερευνητικά δεδομένα έδειξαν ότι ακόμη και σχετικά σύντομα, δομημένα προγράμματα μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την αναγνώριση φωνημάτων και την κατανόηση του λόγου, ακόμη και σε θορυβώδη περιβάλλοντα (Fu et al., 2004). Σε περιβάλλον με θόρυβο, χρησιμοποιήθηκαν πιο εξειδικευμένα προγράμματα τα οποία κι αυτά έδειξαν σημαντικές βελτιώσεις. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι η AT μπορεί να βοηθήσει την επικοινωνία ακόμη και σε δύσκολες ακουστικές συνθήκες (Oba et al., 2011).

Η ακουστική εκπαίδευση, ωστόσο, δεν έχει τα ίδια αποτελέσματα σε όλους τους πληθυσμούς. Εξαρτώνται από τη διάρκεια, το είδος των ερεθισμάτων και την εξατομίκευση του προγράμματος. Τα αποτελέσματα είναι πολύ πιο θετικά όταν τα προγράμματα εκπαίδευσης είναι προσαρμοσμένα στις ανάγκες του κάθε ατόμου. Αυτό φαίνεται από τις ανασκοπήσεις και μετα-ανασκοπήσεις που έχουν διεξαχθεί (Cambridge et al., 2022· Dornhoffer et al., 2024).

Η ακουστική εκπαίδευση είναι εξίσου σημαντική και στα παιδιά με κοχλιακά εμφυτεύματα. Με την βοήθεια αυτής, παρατηρείται βελτίωση της ακουστικής επεξεργασίας, της κατανόησης λόγου και συνεπώς της γλωσσικής ανάπτυξης. Μάλιστα, τα οφέλη είναι πιο έντονα όταν η εκπαίδευση ξεκινάει σε μικρή ηλικία και εφαρμόζεται με συνέπεια (Rayes et al., 2019· Roman et al., 2016). Η αναπτυξιακή πλαστικότητα των παιδιών τα καθιστά πιο δεκτικά στη μάθηση, γι' αυτό η συνδυαστική εφαρμογή ακουστικής εκπαίδευσης με γλωσσική θεραπεία θεωρείται κρίσιμη για την επιτυχία.

Η σημασία της AT αναδεικνύεται επίσης στη σύγχρονη τεχνολογία κοχλιακών εμφυτευμάτων. Όπως σημειώνουν οι Wilson & Dorman (2008), τα εμφυτεύματα παρέχουν την ακουστική είσοδο, αλλά το ακουστικό σύστημα χρειάζεται στοχευμένη εκπαίδευση για να μάθει να αξιοποιεί στο έπακρο αυτές τις πληροφορίες. Γι' αυτό, η AT θεωρείται απαραίτητο συμπλήρωμα στις τεχνολογικές λύσεις.

Τέλος, η εφαρμογή της AT δεν περιορίζεται στους χρήστες εμφυτευμάτων. Πρόσφατα δεδομένα δείχνουν ότι μπορεί να είναι αποτελεσματική και σε άλλες ομάδες, όπως οι ενήλικες με Διαταραχή Ακουστικής Επεξεργασίας (APD), όπου βοηθά στη βελτίωση βασικών δεξιοτήτων ακουστικής διάκρισης (Crum et al., 2024). Αυτό δείχνει τον ευρύτερο θεραπευτικό της χαρακτήρα και την προοπτική διεύρυνσης των εφαρμογών της.

Συνολικά, η ακουστική εκπαίδευση αξιοποιεί τις αρχές της νευροπλαστικότητας για να ενισχύσει την ακουστική επεξεργασία και να βελτιώσει την κατανόηση της ομιλίας. Η σωστή και εξειδικευμένη εφαρμογή της, συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της καθημερινότητας και της ποιότητας ζωής όλων των ατόμων με ακουστικές δυσκολίες.

#### *Μουσική και ρυθμικές παρεμβάσεις στην αποκατάσταση*

Η σημασία της ακουστικής επεξεργασίας για την κατανόηση λόγου και μουσικής έχει αναδειχθεί και από πειράματα με χημεικούς ήχους, τα οποία έδειξαν τη διαφορετική συμβολή της περιβάλλουσας και της λεπτοδομής. Με βάση αυτά, η μουσική και οι ρυθμικές παρεμβάσεις έχουν αναδειχθεί ως σημαντικά εργαλεία στην αποκατάσταση λόγου και γλώσσας, καθώς ενεργοποιούν μηχανισμούς που σχετίζονται με την επικοινωνία, τη μνήμη και την προσοχή. Ο ρυθμός, δηλαδή η χρονική οργάνωση των ήχων, και η μελωδία, δηλαδή η αλληλουχία τόνων, φαίνεται να μοιράζονται κοινούς νευρολογικούς μηχανισμούς με την ομιλία. Σύμφωνα με την υπόθεση SEP (Sound Envelope Processing) των Fujii και Wan (2014), δύο στοιχεία είναι καθοριστικά. Η επεξεργασία της ηχητικής περιβάλλουσας, που σχετίζεται με τη ροή του λόγου, και ο συγχρονισμός στον ρυθμικό παλμό, που στηρίζει την παραγωγή συλλαβών. Μέσω του ρυθμού, η ομιλία οργανώνεται με σαφή τρόπο, τονίζοντας τον θεραπευτικό ρόλο μέσω της μουσικής δραστηριότητας.

Η μουσική φαίνεται να έχει ιδιαίτερα θετικά αποτελέσματα σε παιδιά με απώλεια ακοής ή χρήστες κοχλιακών εμφυτευμάτων. Η μελέτη των Torppa και Huotilainen (2019) ανέδειξε την συμμετοχή σε μουσικές δραστηριότητες ως μέσο ενίσχυσης της ανάπτυξης γλωσσικών δεξιοτήτων και επικοινωνίας. Αντίστοιχα, η έρευνα των Gfeller et al. (2011) σε παιδιά προσχολικής ηλικίας με κοχλιακά εμφυτεύματα κατέδειξε ότι οι μουσικοθεραπευτικές συνεδρίες βελτιώνουν όχι μόνο την ομιλία αλλά και την κοινωνική αλληλεπίδραση και την αυτοπεποίθηση. Συμπληρωματικά, τα δεδομένα των Hopyan et al. (2012) έδειξαν ότι τα παιδιά με εμφυτεύματα μπορούν να αξιοποιήσουν τα ακουστικά υπολείμματα για καλύτερη αντίληψη ρυθμού και μελωδίας, γεγονός που ενισχύει έμμεσα και την κατανόηση του λόγου.

Σε περιπτώσεις παιδιών με διαταραχές άρθρωσης και φωνολογικές δυσκολίες η μουσική αποτελεί μια πολύ αποτελεσματική θεραπεία. Η συστηματική ανασκόπηση των van Tellingen et al. (2023) έδειξε ότι η ενσωμάτωση μουσικών στοιχείων στη θεραπεία έχει βελτιώσει την παραγωγή λόγου. Ωστόσο, απαιτούνται περισσότερες μελέτες με πιο αυστηρό σχεδιασμό για μέγιστα αποτελέσματα. Στην έρευνα τους, οι Farquharson και Tambyraja (2022) έδειξαν ότι η θεραπεία γίνεται πιο ευχάριστη και αποτελεσματική με τη χρήση της μουσικής. Ακόμη φαίνεται να αυξάνει τη συμμετοχή και το κίνητρο των παιδιών. Επιπλέον, μέσα από την έρευνα

randomized controlled trial (RCT) των Siemons-Lühning et al. (2021) έγινε ξεκάθαρο ότι η εισαγωγή της μουσικής στα θεραπευτικά προγράμματα βελτιώνει την άρθρωση πιο αποτελεσματικά από τις παραδοσιακές προσεγγίσεις χωρίς αυτήν.

Συνοψίζοντας, μέσα από την βιβλιογραφία συνάγεται το συμπέρασμα ότι η μουσική και ο ρυθμός αποτελούν παράγοντες που διευκολύνουν τη νευροπλαστικότητα. Έτσι, υποστηρίζεται η ανάπτυξη και η αποκατάσταση της γλώσσας σε παιδιά με κοχλιακά εμφυτεύματα ή διαταραχές λόγου. Ο λόγος, η μνήμη και η προσοχή, σε συνδυασμό με τα θετικά συναισθήματα που προκύπτουν, ενεργοποιούν τα εγκεφαλικά δίκτυα και δείχνουν ότι οι μουσικές παρεμβάσεις είναι μια ιδιαίτερα αποτελεσματική θεραπευτική επιλογή. Παράλληλα, οι νέες τεχνολογίες, όπως οι ψηφιακές πλατφόρμες και τα προγράμματα με τεχνητή νοημοσύνη, προσφέρουν προοπτικές για πιο εξατομικευμένες και προσβάσιμες μορφές μουσικοθεραπείας στο μέλλον. Συμπληρωματικά, τα πειράματα με χημεικούς ήχους έχουν δείξει γιατί οι χρήστες κοχλιακών εμφυτευμάτων δυσκολεύονται ιδιαίτερα στην κατανόηση λόγου σε θόρυβο και στη μουσική αντίληψη. Η κατανόηση αυτών των μηχανισμών έχει συμβάλει τόσο στη βελτίωση των αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος όσο και στην ανάπτυξη πιο στοχευμένων προγραμμάτων ακουστικής εκπαίδευσης και μουσικοθεραπείας.

#### *Καινοτόμες νευροτροποποιητικές παρεμβάσεις*

Η νευροπλαστικότητα αποτελεί το θεμέλιο της ακουστικής αποκατάστασης, αλλά οι παραδοσιακές μέθοδοι εκπαίδευσης συχνά δεν επαρκούν. Για τον λόγο αυτό, η έρευνα στρέφεται σε νευροτροποποιητικές παρεμβάσεις. Πρόκειται για τεχνικές οι οποίες επηρεάζουν τα νευρικά κυκλώματα και ενισχύουν την ικανότητα του εγκεφάλου να προσαρμόζεται και να μαθαίνει.

Μία από τις πιο καινοτόμες μεθόδους είναι η διέγερση του πνευμονογαστρικού νεύρου (Vagus Nerve Stimulation – VNS). Ο συνδιασμός ακουστικών ερεθισμάτων μέσω της μεθόδου VNS βελτίωσε τη νευρωνική απόκριση στον ακουστικό φλοιό και την επεξεργασία ήχων. (Engineer et al., 2011· Borland et al., 2019). Έρευνες σε πειραματικά ζωικά μοντέλα με σύνδρομο Rett, έδειξαν ότι η VNS οδήγησε σε αποκατάσταση της ικανότητας του εγκεφάλου να ξεχωρίζει διαφορετικούς ήχους. (Adcock et al., 2020). Το χολινεργικό σύστημα διευκολύνει τη μάθηση και την αντιληπτική ευελιξία. Αυτό το σύστημα φαίνεται να ενεργοποιείται από τον μηχανισμό VNS (Martin et al., 2024). Παρά τις προοπτικές που προσφέρει αυτή η μέθοδος, δεν παύει να είναι μια επεμβατική παρέμβαση πράγμα που σημαίνει ότι απαιτούνται προσεκτικά σχεδιασμένα κλινικά πρωτόκολλα.

Πέρα από τη VNS, έχουν μελετηθεί και μη επεμβατικές τεχνικές, όπως η διακρανιακή μαγνητική διέγερση (TMS) και η διακρανιακή διέγερση συνεχούς ρεύματος (tDCS). Αυτές οι μέθοδοι ρυθμίζουν τη δραστηριότητα του εγκεφάλου χωρίς χειρουργική επέμβαση. Οι οδηγίες των Lefaucheur et al. (2017) δείχνουν ότι η tDCS μπορεί να ενισχύσει την πλαστικότητα υπό συγκεκριμένες παραμέτρους. Παράλληλα, όπως τονίζουν οι George & Aston-Jones (2010), κάθε τεχνική δρα με διαφορετικό μηχανισμό, αλλά όλες στοχεύουν στη βελτίωση της νευροπλαστικότητας και μπορούν να λειτουργήσουν συνδυαστικά, ιδιαίτερα σε χρήστες κοχλιακών εμφυτευμάτων.

Μια τρίτη κατεύθυνση είναι η νευροανάδραση (neurofeedback), που δίνει σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες για τη νευρωνική δραστηριότητα ώστε ο χρήστης να μάθει να τη ρυθμίζει. Έχει φανεί ότι η εκπαίδευση με βάση το EEG βελτιώνει την επιλεκτική ακουστική προσοχή και την κατανόηση ομιλίας σε θόρυβο (Kim et al., 2021· Shim et al., 2023), ενώ η χρήση νευροανάδρασης βασισμένης στο mismatch negativity (MMN) μπορεί να ενισχύσει την ασυνείδητη διάκριση ήχων (Chang et al., 2014). Έτσι, η μέθοδος συνδυάζει την άμεση συμμετοχή και εξάσκηση του ασθενή με την παθητική έκθεση σε ερεθίσματα. Αυτό προσδίδει νέες δυνατότητες στην ακουστική εκπαίδευση.

Τέλος, έρευνες πάνω στο Locus Coeruleus (LC) έδειξαν ότι ο ρόλος του στη ρύθμιση της ακουστικής πλαστικότητας είναι πολύ σημαντικός. Ειδικότερα, το LC επικοινωνεί με άλλα τμήματα του εγκεφάλου στέλνοντας νευρικά σήματα με τον νευροδιαβιβαστή νοραδρεναλίνη. Έτσι, ενισχύει την προσοχή και τη διέγερση, βελτιώνοντας την μάθηση και την προσαρμογή των χρηστών με κοχλιακά εμφυτεύματα (Glennon et al., 2023).

Όλες οι παραπάνω νευροτροποποιητικές παρεμβάσεις (VNS, TMS, tDCS, neurofeedback, LC-targeted στρατηγικές), προσφέρουν σημαντικές προοπτικές για τη βελτίωση της ακουστικής πλαστικότητας και την αποκατάσταση της ομιλίας. Ωστόσο, οι περισσότερες βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο και απαιτούνται εκτεταμένες κλινικές μελέτες. Αυτό θα εγγυηθεί την ασφάλεια, την αποτελεσματικότητα αλλά και πιο κατάλληλες πρακτικές εφαρμογές (Piadou et al., 2024). Παρά τους περιορισμούς, οι τεχνικές αυτές ανοίγουν τον δρόμο για πιο στοχευμένες και εξατομικευμένες λύσεις, με προοπτική να βελτιώσουν ουσιαστικά την ποιότητα ζωής των ατόμων με ακουστικές διαταραχές

### *3.3.6. Ηθικές και Κοινωνικές Διαστάσεις*

Η ανάπτυξη διεπαφών εγκεφάλου–υπολογιστή (BCI) και νευροπροθετικών εφαρμογών δημιουργεί μεγάλες δυνατότητες, αλλά και σημαντικά ηθικά και κοινωνικά ερωτήματα. Η

τεχνολογία αυτή δεν μπορεί να εξεταστεί μόνο σε τεχνικό ή κλινικό επίπεδο· χρειάζεται επίσης ανάλυση των συνεπειών της στην ιδιωτικότητα και στην κοινωνία.

Η αποκωδικοποίηση της ομιλίας από εγκεφαλικά σήματα δείχνει πόσο προχωρημένη έχει γίνει η έρευνα. Ο Moses et al. (2021) απέδειξαν ότι ένας παράλυτος ασθενής μπορούσε να παράγει λόγο μέσω νευροπροσθετικού. Οι Martin et al. (2018) έδειξαν ότι είναι δυνατή ακόμη και η αποκωδικοποίηση «εσωτερικού» λόγου. Αυτά τα αποτελέσματα προσφέρουν νέες δυνατότητες επικοινωνίας, αλλά ταυτόχρονα αυξάνουν τους κινδύνους για την προστασία της ιδιωτικότητας των σκέψεων και των νευρικών δεδομένων.

Οι νέες εμφυτεύσιμες συσκευές μπορούν να μετατρέψουν τη νευρική δραστηριότητα σε λόγο. Οι Angrick et al. (2024) ανέπτυξαν ένα σύστημα σύνθεσης ομιλίας για ασθενή με ALS και οι Littlejohn et al. (2025) παρουσίασαν ένα brain-to-voice εμφύτευμα. Ωστόσο, παρά το μεγάλο όφελος που προσφέρουν, τέτοιες τεχνολογίες φέρνουν και πάλι προβληματισμούς για την επεμβατικότητά τους, για τη διαδικασία συναίνεσης και για τον έλεγχο της πληροφορίας που παράγουν.

Επίσης, η εφαρμογή BCI σε χρόνιες νευρολογικές καταστάσεις δείχνει τη δυνατότητα μακροχρόνιας επικοινωνίας. Οι Milekovic et al. (2018) μελέτησαν ασθενείς με ALS και locked-in syndrome που χρησιμοποίησαν BCI για πολλά χρόνια. Οι Brumberg et al. (2010) και Luo et al. (2022) τόνισαν επίσης τις προκλήσεις και τους περιορισμούς των συστημάτων αυτών. Τα δεδομένα αυτά δείχνουν την ανάγκη για σαφείς κατευθυντήριες γραμμές, ώστε να προστατεύεται η ασφάλεια και η αυτονομία των χρηστών.

Η χρήση BCI δεν περιορίζεται στο κλινικό πλαίσιο. Χρησιμοποιείται και στην τέχνη, την ψυχαγωγία και τον αθλητισμό (Nijholt et al., 2022). Σε αυτές τις περιπτώσεις ωστόσο, ενέχουν νέοι κίνδυνοι. Η εμπορική εκμετάλλευση, η άνιση πρόσβαση και η έλλειψη προστασίας της διαχείρισης των δεδομένων αποτελούν κάποιες από τις πιο βασικές προκλήσεις. Η μη ηθική και χωρίς τη συγκατάθεση χρήση των εγκεφαλικών πληροφοριών του ασθενή, οδηγεί σε παραβίαση της ιδιωτικότητας. Επομένως, ηθικές και κοινωνικές προκλήσεις συνδέονται αναπόφευκτα με την πρόοδο της νευροτεχνολογίας. Η προστασία δεδομένων, η συναίνεση, η μακροχρόνια ασφάλεια και η ισότιμη πρόσβαση είναι θέματα που πρέπει να συζητηθούν παράλληλα με την τεχνική ανάπτυξη. Μόνο έτσι θα εξασφαλιστεί ότι η τεχνολογική εξέλιξη θα συμβαδίζει με τον σεβασμό στην αξιοπρέπεια και στην ελευθερία του ανθρώπου.

Συμπερασματικά, το κεφάλαιο αυτό ανέδειξε τη διττή φύση των τεχνολογιών ακοής. Από τη μία η ικανότητά τους να αποκαθιστούν την επικοινωνία και από την άλλη οι προκλήσεις που φέρνουν για την κοινωνία. Οι χιμαιρικοί ήχοι, αν και αρχικά αναπτύχθηκαν ως ερευνητικό εργαλείο για την κατανόηση της ακουστικής επεξεργασίας, αποτελούν και αφετηρία

καλλιτεχνικών πειραματισμών. Μέσω της οπτικής αυτής, οδηγούμαστε στην επόμενη ενότητα και στον τρόπο με τον οποίο οι χιμαιρικοί ήχοι εξετάζονται μέσα από καλλιτεχνικά παραδείγματα. Εκεί φαίνεται πώς η επιστημονική γνώση μπορεί να μετατραπεί σε δημιουργικές εμπειρίες και νέες μορφές τέχνης.

### **3.4. Τέχνη, Μουσική και Ηχητικά Περιβάλλοντα**

Η σχέση του ήχου με την τέχνη και τη μουσική αποτελεί πεδίο έντονης ερευνητικής και καλλιτεχνικής δραστηριότητας. Ο ήχος δεν περιορίζεται πλέον στη λειτουργία της αισθητικής συνοδείας, αλλά αναδεικνύεται σε αυτόνομο εργαλείο ανάλυσης, δημιουργίας και επικοινωνίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμβολή των χιμαιρικών ήχων, οι οποίοι συνδυάζουν πραγματικά και τεχνητά ακουστικά στοιχεία, ανοίγοντας νέες δυνατότητες για την κατανόηση της ακουστικής αντίληψης αλλά και για την καλλιτεχνική εξερεύνηση. Μέσα από αυτούς, οι παραδοσιακές κατηγορίες του ήχου επαναπροσδιορίζονται και αναδεικνύονται νέοι τρόποι εμπλοκής του ακροατή με την εμπειρία της ακρόασης.

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται τέσσερα βασικά πεδία όπου ο ήχος και ιδιαίτερα οι χιμαιρικοί ήχοι αποκτούν ξεχωριστό ρόλο. Αρχικά, αναλύεται η έννοια του ηχοχρώματος (timbre) και η σημασία του στη μουσική εμπειρία. Έτσι, γίνεται πιο ξεκάθαρη η συμβολή των χιμαιρικών ηχοχρωμάτων στη μελέτη της αντίληψης. Στη συνέχεια, αναλύεται η χρήση αφηρημένων και χιμαιρικών ήχων στον κινηματογράφο. Εδώ, δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στον τρόπο με τον οποίο επηρεάζουν το συναίσθημα και δημιουργούνται ηχητικά τοπία. Το τρίτο πεδίο αφορά τα εικονικά και επαυξημένα περιβάλλοντα (VR/AR). Συγκεκριμένα, αναφέρεται η χρήση που έχουν οι χιμαιρικοί ήχοι αλλά και η ηχοποίηση στην ενίσχυση της εμπύθισης, την πλοήγηση και τη διαδραστικότητα. Τέλος, παρουσιάζονται οι διαδραστικές ηχητικές εγκαταστάσεις στη σύγχρονη τέχνη, όπου ο ήχος γίνεται πεδίο συμμετοχής, σωματικής εμπλοκής και συνδημιουργίας.

Μέσα από αυτή τη διαδοχική ανάλυση αναδεικνύεται η ποικιλία τρόπων με τους οποίους ο ήχος, και ειδικότερα οι χιμαιρικοί ήχοι, λειτουργεί ως αισθητικό, ερευνητικό και τεχνολογικό εργαλείο. Η μελέτη της ακουστικής αντίληψης, ωστόσο, δεν περιορίζεται στη θεωρία και τα πειράματα. Έχει προεκτάσεις και σε καλλιτεχνικές εφαρμογές, που αναβαθμίζουν την εμπειρία με τον ήχο και το ακουστικό περιβάλλον.

#### **3.4.1. Μουσική ανάλυση - Timbres και χιμαιρικά ηχοχρώματα**

Το ηχώχρωμα (timbre), αποτελεί μια από τις βασικότερες παραμέτρους της ακουστικής αντίληψης. Μας επιτρέπει να ξεχωρίζουμε διαφορετικές πηγές ήχου, ακόμη και όταν ο τόνος

και η έντασή τους είναι ίδια. Το ηχόχρωμα, συμβάλλει στον τρόπο με τον οποίο ο εγκέφαλος κατηγοριοποιεί και οργανώνει τους ήχους. Γι' αυτό το λόγο, αποτελεί ένα βασικό χαρακτηριστικό σε όλα τα πλαίσια ακρόασης. Σύμφωνα με τον Grey (1977), το ηχόχρωμα δεν είναι μια απλή ιδιότητα αλλά ένα πολυδιάστατο φαινόμενο που περιλαμβάνει στοιχεία όπως το φάσμα των αρμονικών, τον τρόπο με τον οποίο ξεκινά και σβήνει ένας ήχος, καθώς και τις δυναμικές του. Σε αυτή την κατεύθυνση, οι Kendall και Carterette (1993) τόνισαν ότι το ηχόχρωμα αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν συνδυάζονται πολλές πηγές ήχου, όπως στην ορχήστρα, δημιουργώντας σύνθετες υφές που εμπλουτίζουν τη μουσική εμπειρία και ενισχύουν τη συναισθηματική της διάσταση.

Πρόσφατες προσεγγίσεις έδειξαν το ηχόχρωμα να μην περιορίζεται στην διάκριση πηγών ήχου αλλά να λειτουργεί σαν δομικό στοιχείο της μουσικής αντίληψης. Ο McAdams (2019) σε έρευνά του, υποστήριξε ότι το ηχόχρωμα συμβάλλει καθοριστικά στην οργάνωση και την ερμηνεία της μουσικής εμπειρίας. Το ηχόχρωμα μπορεί να κατευθύνει την προσοχή του ακροατή, ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο τη συνοχή ενός έργου. Η ιδιότητα αυτή του ηχοχρώματος ενισχύεται ακόμη περισσότερο σε πειραματικά ή καλλιτεχνικά πλαίσια. Για παράδειγμα, στο έργο του Florian Hecker το ηχόχρωμα αντιμετωπίζεται ως ένα ανεξάρτητο στοιχείο εμπειρίας και αισθητικής (Newman, 2016).

Οι χιμαιρικοί ήχοι, που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια ως εργαλεία για τη μελέτη της ακουστικής αντίληψης, αποκτούν εδώ καλλιτεχνική σημασία. Η έννοια της χιμαιροποίησης (chimerization), δηλαδή ο συνδυασμός διαφορετικών ακουστικών στοιχείων για τη δημιουργία νέων εμπειριών ακρόασης, δεν περιορίζεται στο εργαστήριο αλλά μεταφέρεται και στο πεδίο της καλλιτεχνικής πράξης. Ο Hecker, για παράδειγμα, χρησιμοποιεί χιμαιρικά ηχοχρώματα για να δημιουργήσει σύνθετες ακουστικές υφές που δεν μπορούν εύκολα να ταξινομηθούν. Παράλληλα, οι Siedenburg, Jones-Mollerup και McAdams (2016) έδειξαν ότι τα χιμαιρικά timbres διαφέρουν αντιληπτικά και κατηγοριακά, αποκαλύπτοντας νέες δυνατότητες στην αισθητική αξιοποίηση του ήχου. Πρόσφατα, οι Shan, Lalor και Maddox (2024) μελέτησαν τη χιμαιρική μουσική και ανέδειξαν την ταυτόχρονη επεξεργασία του ύψους και του ρυθμού στον εγκέφαλο. Μέσα από αυτές τις προσεγγίσεις, ο ήχος αποκτά μια υβριδική ταυτότητα που αμφισβητεί τις παραδοσιακές κατηγορίες του ηχοχρώματος και προσφέρει στο ακροατήριο μια εμπειρία ακρόασης ενεργητική, πειραματική και συχνά φιλοσοφικά προσανατολισμένη.

Συνοψίζοντας, οι χιμαιρικοί ήχοι και τα ηχοχρώματα αποτελούν βασικά στοιχεία που προσθέτουν νέα διάσταση στη μουσική ανάλυση και την εμπειρία. Από τις πιο παραδοσιακές έρευνες (Grey, 1977· Kendall & Carterette, 1993) μέχρι και τις πιο σύγχρονες καλλιτεχνικές

εφαρμογές (McAdams, 2019· Newman, 2016· Siedenburg et al., 2016· Shan et al., 2024), συμπεραίνουμε ότι το ηχόχρωμα αποτελεί ένα πολυεπίπεδο φαινόμενο. Διαμορφώνει τον τρόπο με τον οποίο ακούμε, κατανοούμε αλλά και αισθανόμαστε τον ήχο. Μέσα από τη χμαιοποίηση, η τέχνη και η επιστήμη συναντιούνται, ανοίγοντας νέους δρόμους για την κατανόηση και την αισθητική αξιοποίηση της ακουστικής εμπειρίας.

### 3.4.2. Κινηματογράφος - Συναισθηματική επίδραση και αφηρημένοι ήχοι

Ο ήχος στον κινηματογράφο δεν είναι πια απλό συνοδευτικό στοιχείο της εικόνας αλλά βασικό αφηγηματικό εργαλείο. Όπως ανέφερε ο David Lynch, οι ταινίες είναι «50% εικόνα και 50% ήχος», τονίζοντας την ισότιμη σημασία και των δύο. Το ηχητικό τοπίο (soundscape) περιλαμβάνει μουσική, διαλόγους, ηχητικά εφέ, αφηρημένους και περιβαλλοντικούς ήχους, αλλά και στιγμές σιωπής. Όλα αυτά ολοκληρώνουν την εμπειρία του θεατή και δημιουργούν μια δυναμική ατμόσφαιρα (Araújo Porto & de Souza Rossini, 2021).

Η μουσική υπήρξε το κεντρικό αντικείμενο κλασικών αναλύσεων, αλλά σήμερα το sound design αποτελεί το μουσικό υπόβαθρο. Ο σχεδιασμός ήχου οργανώνει αφηγήσεις, καθοδηγεί την προσοχή και μεταδίδει συναίσθημα, συχνά με μεγαλύτερη ένταση από τη μουσική (Kulezic-Wilson, 2008). Η χρήση αφηρημένων ήχων εμπλουτίζει τον χαρακτήρα της αφήγησης. Για παράδειγμα, στην ταινία *Sicario* χρησιμοποιούνται ήχοι του περιβάλλοντος και ήχοι σε χαμηλές συχνότητες. Με αυτόν τον τρόπο τροφοδοτεί την αγωνία και την αίσθηση της απειλής (Κνιαζ, 2019). Αντίστοιχα στην ταινία *Mother!* του Aronofsky, χρησιμοποιήθηκαν παραμορφωμένοι και αφηρημένοι ήχοι οι οποίοι φέρεται να ενισχύουν τη συναισθηματική φόρτιση επηρεάζοντας σημαντικά την ψυχολογία του θεατή.

Με τον όρο affective sound περιγράφεται η ιδιότητα του ήχου να προκαλεί συναισθηματικές και σωματικές αντιδράσεις. Τόσο η μουσική όσο και ο κάθε ήχος, μπορούν να λειτουργήσουν ως φορείς συναισθημάτων. Για παράδειγμα, οι παρατεταμένοι ή ξαφνικοί ήχοι μπορούν να προκαλέσουν άγχος, ενώ αντίθετα οι απαλές υφές, ηρεμία ή μελαγχολία. Η χρήση τέτοιων ήχων κάνει τον ήχο να λειτουργεί σαν «αόρατος αφηγητής», μεταφέροντας την εσωτερική ένταση των χαρακτήρων.

Η επιστημονική έρευνα δείχνει ότι οι ακουστικές εμπειρίες έχουν άμεση επίδραση τόσο στη συναισθηματική κατάσταση όσο και στη φυσιολογία μας. Οι Jacobsen et al. (2004) έδειξαν ότι οι «όμορφοι» ήχοι προκαλούν θετικά συναισθήματα και ευχαρίστηση. Ακόμη, οι Ishizu και Zeki (2011, 2013) παρατήρησαν ότι κυκλώματα που σχετίζονται με το συναίσθημα και την ανταμοιβή είναι υπεύθυνα για ασυνείδητες αντιδράσεις. Οι Timofeeva et al. (2023), από την άλλη, αποκάλυψαν τις άμεσες σωματικές συνέπειες του ήχου μέσω ερεθισμάτων που είναι

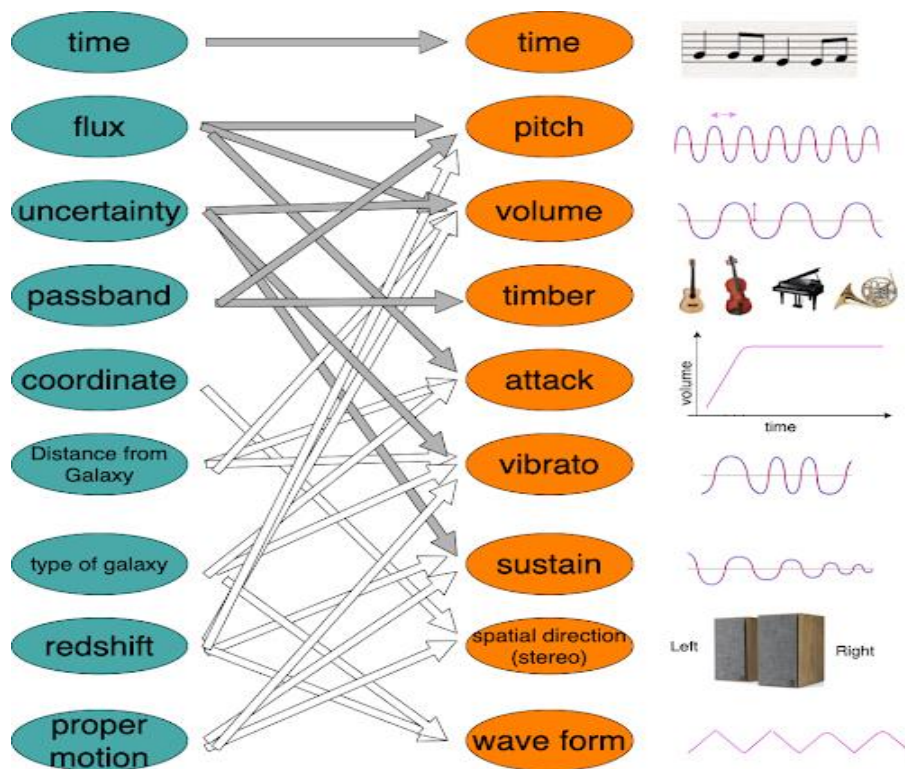
συναισθηματικά φορτισμένα. Αυτό φάνηκε από την αποσταθεροποίηση της στάσης του σώματος. Επομένως, ο ήχος επηρεάζει την ισορροπία, την κίνηση και την αντίληψη του χώρου και δεν αποτελεί απλά ένα ψυχολογικό ερέθισμα.

Σε γενικές γραμμές, ο ήχος στον κινηματογράφο έχει εξελιχθεί σε ένα πολύπλευρο μέσο αφήγησης αλλά και καλλιτεχνικής εμπειρίας. Από τη μία, το soundscape δημιουργεί την αίσθηση χώρου και πραγματικότητας. Από την άλλη, η χρήση των affective sounds αλλά και των αφηρημένων και χιμαιρικών ήχων κάνουν πιο έντονη τη συναισθηματική εμπειρία. Επομένως, γίνεται φανερό ότι ο ήχος δεν αποτελεί πια ένα απλό υπόβαθρο αλλά έχει μετατραπεί σε ένα ισότιμο εργαλείο με την εικόνα. Η μελέτη του δείχνει πώς η τέχνη του κινηματογράφου μπορεί να αξιοποιήσει τον ήχο για να επηρεάσει το συναίσθημα, τη σκέψη και το σώμα του θεατή, ενώ ταυτόχρονα ανοίγει νέους δρόμους για αισθητική και επιστημονική έρευνα.

### *3.4.3. Εικονικά και Επαυξημένα Περιβάλλοντα (VR/AR) – Sonification*

Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, η sonification ορίζεται ως η μετατροπή δεδομένων σε ήχο και εξετάζεται κυρίως στο τεχνολογικό και υποστηρικτικό της πλαίσιο. Στην παρούσα ενότητα, αναλύεται η χρήση της σε εικονικά και επαυξημένα περιβάλλοντα (VR/AR). Αποτελεί ένα ιδιαίτερα πρακτικό εργαλείο αλληλεπίδρασης και παράλληλα ένα δημιουργικό μέσο καλλιτεχνικής έκφρασης.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα στο οποίο καταφαίνεται η διττή αυτή φύση της ηχοποίησης, είναι το Rubin Rhapsodies project (Vera C. Rubin Observatory, n.d.). Στο συγκεκριμένο έργο, τα αστρονομικά δεδομένα αντιστοιχίζονται στο ύψος (pitch), το ηχόχρωμα (timbre) και την ένταση (volume) και προσφέροντας έτσι, μια αισθητική εμπειρία γεμάτη πληροφορία. Το παράδειγμα δείχνει ότι η ηχοποίηση ενώνει τον χώρο της επιστήμης με αυτόν της τέχνης. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς συνδιάζονται η κατανόηση σύνθετων δεδομένων με τη δημιουργία νέων μορφών ακουστικής εμπειρίας. (Σχήμα 4)



Σχήμα 4. Παράδειγμα διαδικασίας sonification: αντιστοίχιση δεδομένων σε ακουστικές παραμέτρους. Πηγή: Vera C. Rubin Observatory (n.d.).

Η παραπάνω απεικόνιση δείχνει πώς η sonification μπορεί να μετατρέψει δεδομένα σε ήχο. Στα VR/AR περιβάλλοντα, η διαδικασία αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς ο ήχος δεν αποτελεί απλή συνοδεία της εικόνας, αλλά καθοριστικό παράγοντα της εμπειρίας. Σε σχετικές μελέτες, η εμπύθιση περιγράφεται ως η ενισχυμένη αίσθηση παρουσίας και εμπλοκής μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον. Η ηχοποίηση φαίνεται να επηρεάζει την εμπύθιση, η οποία προκύπτει από την πολυαισθητηριακή διέγερση (Reissmüller, 2024· Bosman et al., 2024). Ο χωρικός ήχος αυξάνει την πειστικότητα του χώρου, διευκολύνει τον προσανατολισμό και καθιστά την αλληλεπίδραση πιο φυσική. Έτσι, ο ακουστικός σχεδιασμός λειτουργεί ως θεμέλιο της εικονικής εμπειρίας.

Στις καλλιτεχνικές και αισθητικές εφαρμογές, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι χμαιοικοί ήχοι και τα soundscapes. Οι χμαιοικοί ήχοι, συνδυάζουν φυσικά και τεχνητά στοιχεία και προκαλούν οικείες και μη αντιδράσεις που ενισχύουν την παρουσία του ακροατή. Αντίστοιχα, τα ηχοτοπία (soundscapes) δημιουργούν συναισθηματικά φορτισμένα εικονικά περιβάλλοντα. Ενισχύοντας την καλλιτεχνική εμπειρία. Σε κινηματογραφικά VR έργα, ο ήχος λειτουργεί ισότιμα με την εικόνα και επηρεάζει τον ρυθμό και τη συναισθηματική πορεία της αφήγησης.

Γενικά, ο ήχος στα VR/AR περιβάλλοντα έχει διπλό ρόλο. Ειδικότερα, η ηχοποίηση και η ακουστική ανατροφοδότηση βελτιώνουν την απόδοση, μειώνουν το γνωστικό φορτίο και έτσι ενισχύουν τη μάθηση και την προσβασιμότητα. Στο καλλιτεχνικό πεδίο, οι χημικοί ήχοι και τα soundscapes διευρύνουν τις αισθητικές δυνατότητες, δημιουργώντας εμπειρίες με μεγαλύτερη εμπύθιση και συναισθηματική ένταση. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να αναπτύξει πιο συστηματικές μεθοδολογίες αξιολόγησης και να εξετάσει πώς τα δύο αυτά πεδία μπορούν να συνδυαστούν, ώστε ο ήχος να αξιοποιηθεί πλήρως ως κεντρικό στοιχείο των εμπυθιστικών τεχνολογιών.

#### *3.4.4. Διαδραστικά Ηχητικά Έργα και Ακουστική Εμπειρία στην Τέχνη*

Η διαδραστική ηχητική τέχνη έχει αναδειχθεί τα τελευταία χρόνια ως ένα από τα πιο δυναμικά πεδία της σύγχρονης καλλιτεχνικής πρακτικής, καθώς συνδυάζει την αισθητική με την τεχνολογία και τη συμμετοχή του κοινού. Ο ακροατής δεν είναι πλέον παθητικός, αλλά ενεργητικός συμμετοχος όπου το έργο και η εμπειρία επηρεάζονται από τον ίδιο. Πλέον οι ηχητικές εγκαταστάσεις έχουν ροή και αλλάζουν σε πραγματικό χρόνο ανάλογα με τη δράση των συμμετεχόντων (McConnachie, 2023). Με αυτόν τον τρόπο, η ακρόαση μετατρέπεται σε μια βιωματική και δημιουργική εμπειρία. Έτσι, το έργο ολοκληρώνεται χάρη στην αλληλεπίδραση καλλιτέχνη, τεχνολογίας και κοινού.

Η εξέλιξη αυτών των τεχνικών δημιουργήθηκε μέσω πολιτισμικών και τεχνολογικών αλλαγών. Όπως επισημαίνει ο LaBelle (2015), η διαδραστική ηχητική τέχνη ενισχύει την κοινωνική συμμετοχή. Το έργο μετατρέπεται σε διάλογο και ο ακροατής βιώνει μια συλλογική εμπειρία. Εδώ συνδέεται η έννοια του Schafer (1993) για το «ηχοτοπίο» ο οποίος το περιέγραψε ως αλληλεπίδραση φυσικών και ανθρωπογενών ήχων. Οι σύγχρονες εγκαταστάσεις αξιοποιούν στοιχεία του ηχοτοπίου και τα επεξεργάζονται δημιουργικά, οδηγώντας σε νέες μορφές ακρόασης που ξεπερνούν τα όρια της παραδοσιακής μουσικής.

Σημαντική παράμετρος στη μελέτη της ηχητικής εμπειρίας είναι η σωματικότητα. Η ακρόαση δεν αφορά μόνο τη νόηση αλλά και το σώμα και τη σχέση του με τον χώρο. Η θεωρία της ενσώματης ακρόασης, όπως περιγράφεται από τον Giomi (2019), τονίζει ότι η ακουστική εμπειρία συνδέεται με τις κινήσεις και τις αντιδράσεις μας. Οι Leman και Maes (2014) ενισχύουν την άποψη αυτή, παρουσιάζοντας την ακρόαση ως διαδικασία κατά την οποία ο ακροατής συμβάλλει στη δημιουργία νοήματος. Στην ίδια κατεύθυνση, ο Boersen (2022) αναφέρεται στην έννοια της ενεργητικής ακρόασης, δηλαδή της συνεχούς αλληλεπίδρασης με το ηχοτοπίο, που καλλιεργεί μια πιο βαθιά και συμμετοχική σχέση με τον ήχο. Η έρευνα αυτή

δείχνει ότι η εμπειρία της ακρόασης δεν είναι μόνο αντιληπτική αλλά και σωματική και συναισθηματική.

Η διάσταση της συμμετοχής του κοινού είναι εξίσου κεντρική. Σύμφωνα με τον Keylin (2020), τα έργα ηχητικής τέχνης ενσωματώνουν συγκεκριμένα *affordances*, δηλαδή δυνατότητες αλληλεπίδρασης που μπορεί να είναι απλές (κίνηση στον χώρο, ενεργοποίηση ήχων) ή πιο σύνθετες (δημιουργία και πειραματισμός). Η ποιότητα της συμμετοχής εξαρτάται από τον σχεδιασμό αυτών των δυνατοτήτων, ενώ το κοινό δεν παραμένει παθητικός δέκτης αλλά γίνεται συνδιαμορφωτής της εμπειρίας. Η έρευνα των Zhang et al. (2022) τονίζει ότι η συμμετοχή στην εμπειρία, αυξάνει τη συγκέντρωση, ενισχύει το συναίσθημα και δημιουργεί σύνδεση με το έργο. Έτσι, οι εγκαταστάσεις ενισχύουν την επικοινωνία μεταξύ του έργου και του κοινού.

Η τεχνολογία έχει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση αυτών των εμπειριών. Πλατφόρμες όπως το SuperCollider, το MAX/MSP και το OpenFrameworks προσφέρουν εργαλεία για τη δημιουργία καθηλωτικών περιβαλλόντων, ενώ ο δημιουργικός προγραμματισμός έχει εξελιχθεί σε σημαντικό μέσο για την ανάπτυξη διαδραστικών έργων. Όπως παρατηρούν οι Chibalashvili et al. (2023), οι τεχνικές αυτές επιτρέπουν τη σχεδίαση ηχητικών τοπίων που μεταβάλλονται ανάλογα με τις κινήσεις και τις επιλογές του κοινού, μετατρέποντας την ακρόαση σε ενεργή συμμετοχική διαδικασία. Η σύνθεση ηχοτοπίων, όπως αναφέρει ο Drever (2002), συνδέει την ακουστική οικολογία με τη μουσική σύνθεση, μετατρέποντας τους ήχους του περιβάλλοντος σε αφηγηματικά στοιχεία. Επιπλέον, η ακουστική αρχιτεκτονική, όπως την περιγράφουν οι Blesser και Salter (2007), δείχνει πώς τα χαρακτηριστικά του χώρου γίνονται μέρος της εμπειρίας, καθώς η διάδοση του ήχου και η σχέση του με τον χώρο καθορίζουν την τελική αντίληψη του έργου.

Σε αυτό το πλαίσιο, οι χιμαιρικοί ήχοι αποκτούν ιδιαίτερη σημασία. Ο συνδυασμός φυσικών και τεχνητών στοιχείων δημιουργεί ηχητικά περιβάλλοντα που αμφισβητούν τις καθιερωμένες κατηγορίες ήχου και καλούν το κοινό να κινηθεί ανάμεσα στο οικείο και το ξένο. Η υβριδική φύση τους επιτρέπει να λειτουργούν ταυτόχρονα ως καλλιτεχνικό και ερευνητικό εργαλείο, ανοίγοντας τον δρόμο για τη μελέτη των γνωστικών, συναισθηματικών και κοινωνικών διαστάσεων της ακουστικής εμπειρίας. Οι αντιδράσεις των ακροατών σε τέτοιες εγκαταστάσεις προσφέρουν πολύτιμα δεδομένα για το πώς ο ήχος επηρεάζει τη μνήμη, την προσοχή και το συναίσθημα, ενώ ταυτόχρονα εμπλουτίζουν τις καλλιτεχνικές πρακτικές με νέες μορφές συμμετοχικής δημιουργίας.

Η διαδραστική ηχητική τέχνη αποτελεί ένα σημείο συνάντησης ανάμεσα στην τέχνη, την τεχνολογία και την εμπειρία του ακροατή. Μέσα από την ενσώματη και ενεργητική ακρόαση,

τη συμμετοχή του κοινού, τις δημιουργικές τεχνολογίες και τους χιμαιρικούς ήχους, διαμορφώνεται ένα νέο πλαίσιο κατανόησης της ακουστικής εμπειρίας. Ο ήχος παύει να είναι απλή αισθητική διάσταση και γίνεται μέσο διαλόγου, συμμετοχής και στοχασμού, αναδεικνύοντας τη σημασία του στη σύγχρονη καλλιτεχνική δημιουργία. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι η διαδραστική ηχητική τέχνη και οι χιμαιρικοί ήχοι δεν αποτελούν μόνο μέσα καλλιτεχνικής έκφρασης, αλλά συμβάλλουν ουσιαστικά και στη μελέτη της ακουστικής αντίληψης. Έτσι, αναδεικνύεται ο ρόλος του ήχου στη σύγχρονη τέχνη και την τεχνολογία, ανοίγοντας τον δρόμο για τα γενικότερα συμπεράσματα της εργασίας σχετικά με τη χρήση των χιμαιρικών ήχων ως εργαλείου κατανόησης των γνωστικών και αισθητικών πτυχών της ακουστικής εμπειρίας.

Γενικά, η διερεύνηση των χιμαιρικών ήχων στην τέχνη δείχνει ότι η επιστήμη και η καλλιτεχνική δημιουργία μπορούν να συναντηθούν δημιουργικά, παράγοντας νέες μορφές ακουστικής εμπειρίας. Με αυτόν τον τρόπο, το Κεφάλαιο 3 συνοψίζει τη διεπιστημονική πορεία που ξεκίνησε από τη νευροεπιστήμη και τη γλωσσολογία και κατέληξε στην τέχνη. Θέτονται, έτσι, οι βάσεις για τη συζήτηση που ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

## Κεφάλαιο 4: Συζήτηση και Συμπεράσματα

### 4.1. Σύνθεση βασικών ευρημάτων

Η συγκεκριμένη βιβλιογραφική αναφορά αναδεικνύει τον πολυδιάστατο ρόλο των χμαιοικών ήχων και άλλων παρόμοιων τεχνικών που έχουν να κάνουν με την κατανόηση της ακουστικής αντίληψης και τις εφαρμογές της σε διαφορετικά πεδία. Όσον αφορά το νευροφυσιολογικό πεδίο, οι μελέτες έδειξαν ότι ο εγκέφαλος αξιοποιεί πολλούς, διαφορετικούς μηχανισμούς για την επεξεργασία της ομιλίας αλλά και της μουσικής. Ειδικότερα, η περιβάλλουσα (envelope) υποστηρίζει τη γλωσσική κατανόηση, ενώ η λεπτοδομή (fine structure) σχετίζεται με τη μελωδία, το ύψος και την αντίληψη κίνησης. Οι χμαιοικοί ήχοι φαίνεται ότι έχουν καθοριστικό ρόλο για τη διάκριση αυτών των μηχανισμών (Smith et al., 2002· Heinz & Swaminathan, 2009· Prinsloo & Lalor, 2022).

Η λεπτοδομή του ήχου, δηλαδή τα πολύ μικρά «κύματα» που υπάρχουν μέσα στη φωνή, έχει φανεί ότι παίζουν σημαντικό ρόλο στις γλώσσες με τόνους, όπως είναι η μανδαρινική. Οι Xu & Pfingst (2003) έδειξαν ότι για να καταλάβει κανείς σωστά τη μανδαρινική, χρειάζεται να επεξεργαστεί αυτές τις λεπτές διακυμάνσεις. Αργότερα, οι Jeng et al. (2016) χρησιμοποιώντας μετρήσεις στον εγκέφαλο, παρατήρησαν ότι οι ακροατές μπορούν να ξεχωρίσουν λέξεις ακόμα κι όταν παρουσιάζονται με χμαιοικούς ήχους. Σε μεταγενέστερη έρευνα (Jeng, Hart & Lin, 2021) έδειξαν ότι μέσω χμαιοικών τεχνικών μπορούν να αναγνωριστούν ακόμη και καινούργιες φωνητικές κατηγορίες που δεν υπάρχουν στη φυσική ομιλία. Όλα αυτά δείχνουν ότι η λεπτοδομή δεν αφορά μόνο τη μουσική, αλλά αποτελεί ένα θεμελιώδες στοιχείο για το πώς αντιλαμβανόμαστε και επεξεργαζόμαστε τη γλώσσα.

Η τεχνολογική έρευνα έδειξε πώς η κατανόηση του χρονικού φακέλου και της λεπτοδομής οδήγησε σε εφαρμογές αποκατάστασης και υποβοήθησης. Τα κοχλιακά εμφυτεύματα αξιοποιούν την περιβάλλουσα για τη μετάδοση ομιλίας, αλλά οι περιορισμοί στην απόδοση της λεπτοδομής εξηγούν τις δυσκολίες στην αντίληψη μελωδίας ή τόνων (Wilson & Dorman, 2008· Zeng et al., 2008). Παράλληλα, οι διεπαφές εγκεφάλου–υπολογιστή (BCIs) βασισμένες σε ECoG και ενδοφλοιϊκές καταγραφές κατέδειξαν ότι με τη συνδρομή της τεχνητής νοημοσύνης καθίστανται δυνατή η προοπτική για αποκωδικοποίηση λόγου και συνεπώς φυσικότερη επικοινωνία (Mane et al., 2022· Luo et al., 2022· Stavisky, 2025). Τέλος, η ηχοποίηση (sonification), τόνισε τη δύναμη της ακουστικής αναπαράστασης δεδομένων. Έτσι, ενισχύεται η πρόσβαση στην πληροφορία αλλά και η δημιουργία νέων πολυτροπικών

διεπαφών (Nees & Walker, 2009· Commère & Rouat, 2023· Zhao & Tzanetakis, 2024).

Στο καλλιτεχνικό πεδίο, οι χμιαϊρικοί ήχοι λειτούργησαν ως εργαλείο πειραματισμού και αισθητικής διερεύνησης. Συγκεκριμένα, ο Florian Hecker αξιοποίησε τη χμιαϊροποίηση για να δημιουργήσει νέες ακουστικές εμπειρίες (Newman, 2016) και οι Siedenburg, Jones-Mollerup & McAdams (2016) μελέτησαν την αντιληπτική διαφοροποίηση χμιαϊρικών ηχοχρωμάτων. Επιπρόσθετα, οι Shan, Lalor & Maddox (2024) ανέδειξαν νέους τρόπους με τους οποίους η χμιαϊρική μουσική μπορεί να επιτρέψει την εξερεύνηση του τόνου και του ρυθμού. Κατά συνέπεια, η τέχνη αποτέλεσε όχι μόνο ένα χώρο εφαρμογής αυτών των ήχων, αλλά και έναν τομέα που επεκτείνει τα όρια της επιστημονικής κατανόησης. Συνοψίζοντας, τα ευρήματα καταδεικνύουν ότι οι χμιαϊρικοί ήχοι και όλες οι σχετικές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εργαλεία βασικής έρευνας, αλλά και σαν μέσα σε τεχνολογικό και καλλιτεχνικό επίπεδο. Η πολυδιάστατη φύση τους, ενώνει τη νευροεπιστήμη, τη γλωσσολογία, την τεχνολογία και την τέχνη, αναδεικνύοντας έτσι, τον ήχο ως κεντρικό μέσο κατανόησης αλλά και δημιουργίας.

*Πίνακας 2. Σύνοψη συμπερασμάτων*

Συμπέρασμα	Εφαρμογή
Η περιβάλλουσα είναι κρίσιμη για την κατανόηση λόγου.	Βελτίωση κοχλιακών εμφυτευμάτων.
Η λεπτοδομή σχετίζεται με ύψος, μελωδία και τόνους.	Βελτίωση στην αναγνώριση μελωδίας και τονικών γλωσσών.
Διαφορετικοί μηχανισμοί για λόγο και μουσική.	Νευροπλαστικότητα και στρατηγικές αποκατάστασης.
Οι χμιαϊρικοί ήχοι αποκαλύπτουν μηχανισμούς ακουστικής επεξεργασίας.	Εργαλείο βασικής νευροακουστικής έρευνας.
Κατανόηση περιβάλλουσας και λεπτοδομής. Ηχοποίηση και αισθητική χρήση.	Ανάπτυξη BCIs και αλγορίθμων AI για λόγο. Νέες μορφές προσβασιμότητας και καλλιτεχνικής έκφρασης.
Πολυδιάστατη φύση.	Διεπιστημονική γέφυρα επιστήμης, τεχνολογίας και τέχνης.

---

## 4.2. Κριτική αξιολόγηση της βιβλιογραφίας

Η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε σημαντικά βήματα προόδου στην κατανόηση της ακουστικής αντίληψης και στις εφαρμογές της. Ωστόσο, προκύπτουν και ορισμένοι περιορισμοί. Καταρχάς, η βασική έρευνα έδειξε ότι οι χμιαϊκοί ήχοι προσέφεραν ένα ισχυρό εργαλείο για τη διάκριση του ρόλου της περιβάλλουσας και της λεπτοδομής (Smith et al., 2002· Heinz & Swaminathan, 2009). Παρόλα αυτά, οι περισσότερες μελέτες βασίζονται σε εργαστηριακά ερεθίσματα, γεγονός που περιορίζει τη γενίκευση σε πιο φυσικά ακουστικά περιβάλλοντα. Η σημασία της λεπτοδομής είναι τεκμηριωμένη σε μεγάλο βαθμό, ωστόσο οι ακριβείς τρόποι με τους οποίους ο εγκέφαλος συνθέτει περιβάλλουσα και λεπτοδομή δεν έχουν ακόμη αποσαφηνιστεί πλήρως (Prinsloo & Lalor, 2022).

Στο πεδίο της γλωσσολογίας, υπάρχουν αποδείξεις ότι η λεπτοδομή παίζει καθοριστικό ρόλο στην κατανόηση των τονικών γλωσσών. Στις τονικές γλώσσες, η αλλαγή στο ύψος ή στον τόνο μιας συλλαβής μπορεί να αλλάξει πλήρως το νόημα μιας λέξης (Xu & Pfingst, 2003· Jeng et al., 2016· Jeng, Hart & Lin, 2021). Βέβαια, η μανδαρινική γλώσσα είναι εκείνη που έχει χρησιμοποιηθεί στις περισσότερες μελέτες. Σαν αποτέλεσμα, δεν είναι σαφές το αν οι ίδιες αρχές ισχύουν και σε άλλες τονικές γλώσσες. Επίσης, λείπουν έρευνες που να εξετάζουν πώς η λεπτοδομή επεξεργάζεται σε πολύγλωσσους ομιλητές, κάτι το οποίο θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς εκείνοι έχουν εμπειρία με περισσότερα συστήματα τόνων.

Όσον αφορά τις τεχνολογικές εφαρμογές, όπως τα κοχλιακά εμφυτεύματα, έχουν βελτιώσει σημαντικά την πρόσβαση στην ομιλία, προσφέροντας έτσι, σε πολλά άτομα με βαρηκοΐα τη δυνατότητα επικοινωνίας (Wilson & Dorman, 2008· Zeng et al., 2008). Ωστόσο, αυτά τα συστήματα εξακολουθούν να έχουν περιορισμούς στη μετάδοση της λεπτοδομής. Σαν αποτέλεσμα, οι χρήστες αντιμετωπίζουν δυσκολίες στο να αντιληφθούν τη μελωδία στη μουσική ή τους τόνους σε γλώσσες όπως η μανδαρινική. Αυτό αποτελεί ένα βασικό εμπόδιο σε επίπεδο τεχνολογικό αλλά και μεθοδολογικό.

Αντίστοιχα, τα BCIs έχουν δείξει εντυπωσιακή πρόοδο τα τελευταία χρόνια. Η χρήση της ηλεκτροκορτικογραφίας (ECoG) και η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης έχουν κάνει δυνατή την αποκωδικοποίηση λόγου και πιο φυσικές μορφές επικοινωνίας (Mane et al., 2022· Luo et al., 2022· Stavisky, 2025). Παρ' όλα αυτά, η χρήση τους σε κλινικά περιβάλλοντα είναι

ακόμη περιορισμένη. Αυτό οφείλεται κυρίως στην επεμβατικότητα των μεθόδων και την προφανή ανάγκη για αποκωδικοποίηση πραγματικού χρόνου που να είναι αξιόπιστη και σαφής.

Στην περίπτωση της ηχοποίησης (sonification), η έρευνα δείχνει ότι μπορεί να βοηθήσει τόσο στην ανάλυση δεδομένων όσο και σε τεχνολογίες υποβοήθησης (Nees & Walker, 2009· Commère & Rouat, 2023· Zhao & Tzanetakis, 2024). Παρ' όλα αυτά, δεν υπάρχουν ακόμα ξεκάθαρες μέθοδοι για να αξιολογηθεί πόσο καλά κατανοούν διαφορετικοί χρήστες αυτές τις ακουστικές αναπαραστάσεις. Τέλος, στο πεδίο της τέχνης, η χρήση χιμαιρικών ήχων και υβριδικών ηχοχρωμάτων έχει δώσει μια νέα κατεύθυνση στη δημιουργική έρευνα (Newman, 2016· Siedenburtg et al., 2016· Shan, Lalor & Maddox, 2024). Μέσα από τέτοιους πειραματισμούς, οι καλλιτέχνες και οι ερευνητές επιχειρούν να διερευνήσουν νέους τρόπους ακουστικής έκφρασης και να επεκτείνουν τα όρια της εμπειρίας του ήχου. Παρ' όλα αυτά, οι περισσότερες μελέτες παραμένουν κυρίως περιγραφικές, χωρίς συστηματική εμπειρική τεκμηρίωση. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα δύσκολα μπορούν να συγκριθούν ή να ενσωματωθούν άμεσα στα πιο αυστηρά πλαίσια της επιστημονικής έρευνας.

Στο σύνολό της η βιβλιογραφία προσφέρει μια εικόνα πλούσια αλλά όχι ισορροπημένη. Σε κάποιες περιοχές η έρευνα είναι πολύ ανεπτυγμένη, με σαφή αποτελέσματα και καλά τεκμηριωμένες μελέτες, ενώ σε άλλες παραμένει απλώς περιγραφική και μη ολοκληρωμένη και συνεπώς λιγότερο αξιόπιστη. Αυτό αφήνει ανοιχτά ζητήματα που έχουν να κάνουν με τη γενίκευση των συμπερασμάτων, την πρακτική τους εφαρμογή και το πώς μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα πιο ενιαίο θεωρητικό πλαίσιο.

### **4.3. Προεκτάσεις Ηθικές και Κοινωνικές**

Η εξέλιξη των νευροτεχνολογιών, όπως τα κοχλιακά εμφυτεύματα και τα BCIs, αφορά αφενός την τεχνική καινοτομία αλλά αγγίζει αφετέρου και κρίσιμα ζητήματα ιδιωτικότητας, ηθικής και κοινωνικής ισότητας. Αυτές τις συσκευές καταγράφουν δεδομένα ιδιαίτερης ευαισθησίας, καθώς συνδέονται άμεσα με την εγκεφαλική δραστηριότητα και συνεπώς με την προσωπική ταυτότητα του κάθε ατόμου. Σαν αποτέλεσμα, η προστασία της ιδιωτικότητας και η διασφάλιση της συγκατάθεσης αποτελούν κεντρικά ζητήματα που πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη. Είναι πολύ σημαντικό, λοιπόν, να οριστούν θεσμικά πλαίσια που θα προστατεύουν την ελευθερία της σκέψης και της βούλησης απέναντι σε πιθανές καταχρήσεις αυτών των τεχνολογιών (Stavisky, 2025).

Τα κοχλιακά εμφυτεύματα, αν και έχουν βελτιώσει σημαντικά την επικοινωνία σε άτομα με βαρηκοΐα, εξακολουθούν να παρουσιάζουν περιορισμούς στην πιστή αναπαράσταση της λεπτοδομής, γεγονός που δημιουργεί δυσκολίες στην αντίληψη της μουσικής και των τονικών γλωσσών (Wilson & Dorman, 2008· Zeng et al., 2008). Οι περιορισμοί αυτοί δεν αφορούν μόνο την τεχνολογία, αλλά σχετίζονται και με κοινωνικούς παράγοντες. Σύμφωνα με έρευνες η πρόσβαση σε πιο προηγμένες λύσεις μπορεί να επηρεάζεται από κοινωνικοοικονομικούς δείκτες αλλά και κοινωνικές ανισότητες. Ως αποτέλεσμα εντοπίζονται διαφορές τόσο στην αξιοποίηση όσο και στην κλινική έκβαση των εμφυτεύσεων (Schuh & Bush, 2021· Lee et al., 2025).

Αντίστοιχα, τα BCIs έχουν δείξει εντυπωσιακές δυνατότητες στην αποκωδικοποίηση λόγου και στη βελτίωση της επικοινωνίας για ασθενείς με σοβαρές κινητικές ή γλωσσικές διαταραχές (Mane et al., 2022· Luo et al., 2022). Ωστόσο, η χρήση τους στην κλινική πράξη παραμένει περιορισμένη, κυρίως λόγω θεμάτων που σχετίζονται με την ασφάλεια, την αξιοπιστία και τον βαθμό επεμβατικότητας. Αυτό σημαίνει ότι πέρα από την τεχνική βελτίωση, απαιτείται και κοινωνική συζήτηση γύρω από τη χρήση τους, ώστε να αποφευχθούν ανισότητες στην πρόσβαση.

Γενικά, η βιβλιογραφία δείχνει ότι η τεχνολογική πρόοδος δεν μπορεί να προχωρήσει ανεξάρτητα από τις ηθικές και κοινωνικές της συνέπειες. Η προστασία δεδομένων, ο σεβασμός της αυτονομίας και η ίση πρόσβαση είναι βασικές προϋποθέσεις ώστε οι νευροτεχνολογίες να υπηρετούν τον άνθρωπο και όχι αποκλειστικά την τεχνολογική πρόοδο (Stavisky, 2025· Wilson & Dorman, 2008· Zeng et al., 2008· Mane et al., 2022· Luo et al., 2022).

#### **4.4. Μελλοντικές κατευθύνσεις**

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, φαίνεται καθαρά ότι υπάρχουν πολλά ανοιχτά ερωτήματα και σημαντικά βήματα που μπορούν να γίνουν στο μέλλον. Πρωτίστως, στη βασική έρευνα απαιτούνται περισσότερες μελέτες που να συνδυάζουν την περιβάλλουσα (envelope) και τη λεπτοδομή (fine structure) με πιο φυσικά ακουστικά ερεθίσματα. Με αυτό τον τρόπο, θα μπορέσει να κατανοηθεί καλύτερα πώς συνεργάζονται οι χαμηλοί και οι υψηλοί μηχανισμοί επεξεργασίας (Prinsloo & Lalor, 2022). Επίσης, είναι σημαντικό να εξεταστεί πιο συστηματικά πώς κωδικοποιείται η περιβάλλουσα στο ακουστικό νεύρο και πώς επηρεάζεται αυτό από τη βαρηκοΐα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να μπορεί να γίνει μια πιο άμεση σύνδεση των νευροφυσιολογικών δεδομένων με την ακουστική αντίληψη (Heinz & Swaminathan, 2009). Παράλληλα, στη γλωσσολογία παρατηρείται ότι η έρευνα έχει εστιάσει κυρίως στη

μανδαρινική. Προτείνεται, λοιπόν, η μελέτη και άλλων τονικών γλωσσών, αλλά και δίγλωσσων ακροατών, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικά και πιο γενικευμένα συμπεράσματα (Xu & Pfingst, 2003· Jeng et al., 2016· Jeng, Hart & Lin, 2021).

Όσον αφορά τα κοχλιακά εμφυτεύματα, η βασική πρόκληση είναι να βελτιωθεί η μετάδοση της λεπτοδομής. Αυτό έχει ως σκοπό να δώσει στους χρήστες καλύτερη πρόσβαση στη μουσική και στις τονικές γλώσσες, όπου οι σημερινές τεχνολογίες παρουσιάζουν κάποιους περιορισμούς (Wilson & Dorman, 2008· Zeng et al., 2008).

Η έρευνα έχει επίσης επιστήσει την προσοχή στο ότι οι παρεμβάσεις πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την κατάλληλη χρονική περίοδο για την ακουστική εκπαίδευση, ιδιαίτερα στην περίπτωση των παιδιών (Bavelier et al., 2006· Cardon et al., 2012). Τέλος, η επεξεργασία μπορεί να γίνει πιο εξατομικευμένη με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης, μειώνοντας έτσι τον γνωστικό φόρτο και βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη (Woo et al., 2021· Nees & Walker, 2009).

Όσον αφορά τις διεπαφές εγκεφάλου–υπολογιστή, η βασική πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η μετάβαση από το εργαστήριο στην κλινική πράξη. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται σίγουρα η λήψη σήματος να γίνεται με μεγαλύτερη αξιοπιστία, η αποκωδικοποίηση να συμβαίνει ταχύτατα και σε πραγματικό χρόνο και τέλος απαιτούνται μέθοδοι λιγότερο επεμβατικές αλλά ταυτόχρονα ακριβείς (Mane et al., 2022· Luo et al., 2022· Stavisky, 2025). Η τεχνητή νοημοσύνη έχει τη δυνατότητα να κάνει την επικοινωνία πιο φυσική, όπως δείχνουν και μελέτες για τη συνθετική ομιλία. Επομένως, είναι ιδιαίτερα σημαντική η αξιοποίησή της (Anumanchipalli et al., 2019· Moses et al., 2021). Παράλληλα, είναι σημαντικό η ασφάλεια και η προστασία των δεδομένων να εξασφαλίζονται από την αρχή. Άλλωστε είναι δυο έννοιες άρρηκτα συνδεδεμένες με την ελευθερία της σκέψης και της βούλησης και θα έπρεπε να ληφθούν σοβαρά υπόψη (Stavisky, 2025).

Η ηχοποίηση (sonification) και οι διεπαφές εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας (VR/AR) ανοίγουν πολλές νέες προοπτικές. Χρειάζονται, ωστόσο, και τυποποιημένες μεθοδολογίες, ώστε να διασφαλίζεται πώς οι χρήστες κατανοούν τις ακουστικές αναπαραστάσεις αλλά και αντιστοιχίζουν αποτελεσματικά τα δεδομένα με ήχο (Nees & Walker, 2009). Η χωρική ηχοποίηση θα μπορούσε, ακόμη, να συνεισφέρει στην ποιότητα της πλοήγησης, ιδιαίτερα στην περίπτωση ατόμων με προβλήματα όρασης (Commère & Rouat, 2023). Στα περιβάλλοντα εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας (VR/AR), φυσικά, πρέπει να μελετηθεί πιο συστηματικά ο ρόλος του χωρικού ήχου και της ακουστικής ανατροφοδότησης. Αυτά τα στοιχεία επηρεάζουν ουσιαστικά την εμπύθιση, τη μάθηση και το γνωστικό φορτίο σε ποικίλα σενάρια, από την

εκπαίδευση και τη ρομποτική μέχρι τον κινηματογράφο (Reissmüller, 2024· Bosman et al., 2024· Ulmer et al., 2022· Takahara et al., 2025· Bremner et al., 2022· Chaurasia & Majhi, 2021).

Επίσης, οι προσαρμοστικές διεπαφές με χρήση τεχνητής νοημοσύνης αποτελούν μια ανερχόμενη κατεύθυνση, τόσο για την υγεία όσο και για την καθημερινή ζωή (Zhao & Tzanetakis, 2024· Nijholt et al., 2022). Στην τέχνη, από την άλλη πλευρά, οι χιμαιρικοί ήχοι έχουν δείξει τη δύναμή τους ως δημιουργικό μέσο, αλλά χρειάζονται πιο συστηματικές μελέτες που να καταγράφουν τα αποτελέσματα ως προς την αντίληψη και την αίσθηση (Siedenburg, Jones-Mollerup & McAdams, 2016· Shan, Lalor & Maddox, 2024). Προτείνεται, λοιπόν, καλλιτέχνες και επιστήμονες να βρεθούν σε μία συνεργασία με απότερο σκοπό την ανάπτυξη νέων πειραματικών δεδομένων και υποθέσεων για περαιτέρω έρευνα και μελέτη (Newman, 2016· McAdams, 2019).

Τέλος, η έρευνα στην ηχοποίηση (sonification) και στους χιμαιρικούς ήχους θα μπορούσε να ωφεληθεί από πιο τυποποιημένες μεθοδολογίες, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα και να μπορούν να επαναληφθούν εύκολα (Nees & Walker, 2009· Flowers & Hauer, 1993· Flowers et al., 2005). Εξίσου σημαντική είναι η ανάπτυξη μεθόδων που θα συνδυάζουν την ακοή με την όραση και την αφή, δημιουργώντας πιο ολοκληρωμένες πολυαισθητηριακές εμπειρίες (Song & Beilharz, 2008· Recanzone & Sutter, 2008). Ακόμη, η αξιοποίηση της νευροπλαστικότητας σε διαφορετικούς πληθυσμούς και ηλικίες παραμένει βασική προτεραιότητα (Bavelier et al., 2006· Cardon et al., 2012· Hildt, 2020), προκειμένου να σχεδιαστούν πιο αποτελεσματικές παρεμβάσεις αποκατάστασης και να βελτιωθεί η προσαρμογή σε νέες ακουστικές τεχνολογίες. Συνολικά, οι μελλοντικές κατευθύνσεις δείχνουν ότι οι χιμαιρικοί ήχοι και οι εφαρμογές τους δεν είναι ένα κλειστό πεδίο, αλλά μια δυναμική και διεπιστημονική περιοχή όπου η βασική έρευνα, η τεχνολογία και η τέχνη μπορούν να ενωθούν, προσφέροντας νέα εργαλεία κατανόησης, αποκατάστασης και δημιουργίας.

#### **4.5. Συμπεράσματα**

Η παρούσα ανασκόπηση έδειξε ότι οι χιμαιρικοί ήχοι αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για τη μελέτη της ακουστικής αντίληψης. Μέσα από αυτά τα πειράματα έγινε πιο καθαρός ο ρόλος της περιβάλλουσας και της λεπτοδομής. Η περιβάλλουσα φαίνεται να στηρίζει κυρίως τη γλωσσική κατανόηση και τη ρυθμική οργάνωση της ομιλίας. Αντίθετα, η λεπτοδομή είναι απαραίτητη για στοιχεία όπως η μελωδία, το ύψος και οι τονικές διαφορές. Έρευνες σε ομιλία

και μουσική (Smith et al., 2002· Xu & Pflingst, 2003· Heinz & Swaminathan, 2009· Prinsloo & Lalor, 2022) έδειξαν ότι η περιβάλλουσα και η λεπτοδομή έχουν διαφορετικούς αλλά συμπληρωματικούς ρόλους, που μαζί διαμορφώνουν την ακουστική εμπειρία. Επιπλέον, πικοίλες μελέτες σε τονικές γλώσσες (Jeng et al., 2016· Jeng, Hart & Lin, 2021) απέδειξαν ότι η λεπτοδομή είναι σημαντική όχι μόνο στην μουσική επεξεργασία, αλλά και στη γλωσσική.

Στο επίπεδο της τεχνολογικής ανάπτυξης, τα κοχλιακά εμφυτεύματα και οι διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή έδειξαν πώς τα παραπάνω ευρήματα μπορούν να αξιοποιηθούν και στην πράξη. Για παράδειγμα, τα κοχλιακά εμφυτεύματα έχουν αλλάξει ριζικά την καθημερινότητα πολλών ανθρώπων με βαρηκοΐα. Ωστόσο, η περιορισμένη μετάδοση της λεπτοδομής εξακολουθεί να δυσκολεύει την αντίληψη μουσικής και τόνων (Wilson & Dorman, 2008· Zeng et al., 2008).

Τα BCIs έδειξαν ότι είναι δυνατόν να μετατραπεί η εγκεφαλική δραστηριότητα σε συνθετική ομιλία ή σε απλές εντολές. Δεδομένου αυτού αναδύονται νέες δυνατότητες επικοινωνίας για ανθρώπους με σοβαρές διαταραχές (Mane et al., 2022· Luo et al., 2022· Stavisky, 2025). Η τεχνική της ηχοποίησης, με τη σειρά της, ανέδειξε τη δύναμη του ήχου ως εργαλείο αλληλεπίδρασης αλλά και ανάλυσης δεδομένων. Επιπρόσθετα, αποδείχθηκε ότι ο ήχος μπορεί να μεταφέρει πληροφορίες με διαφορετικό τρόπο, ακόμη και πιο αποτελεσματικά σε ορισμένες περιπτώσεις, σε σχέση με τις οπτικές αναπαραστάσεις (Nees & Walker, 2009· Zhao & Tzanetakis, 2024).

Στον τομέα της τέχνης, οι χιμαιρικοί ήχοι χρησιμοποιήθηκαν ως ένα επιστημονικό εργαλείο αλλά αποτέλεσαν επίσης και μια δημιουργική πρακτική. Έφεραν στην επιφάνεια νέες αισθητικές εμπειρίες, άνοιξαν νέους δρόμους για την καλλιτεχνική έκφραση μέσα από πειραματικά ηχοχρώματα, χιμαιρικούς ήχους και ηχοτοπία, (Newman, 2016· Siedenburg et al., 2016· Shan, Lalor & Maddox, 2024).

Κλείνοντας, οι χιμαιρικοί ήχοι αποτελούν ένα σημείο συνάντησης για διαφορετικά πεδία, όπως η νευροεπιστήμη, η γλωσσολογία, η τεχνολογία και η τέχνη. Μέσα από αυτά γίνεται φανερό ότι ο ήχος δεν αποτελεί μόνο αντικείμενο επιστημονικής μελέτης. Μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως μέσο κατανόησης του εγκεφάλου και της γλώσσας, ως εργαλείο αποκατάστασης σε κλινικές εφαρμογές, αλλά και ως πηγή έμπνευσης και δημιουργικότητας στον καλλιτεχνικό χώρο. Αυτή η διεπιστημονική προοπτική δείχνει ότι η συνέχιση της έρευνας σε αυτό το πεδίο είναι πολλά υποσχόμενη. Δεν θα εμπλουτίσει μόνο τη γνώση για την ακουστική αντίληψη, αλλά θα προσφέρει και νέες δυνατότητες για την επιστήμη, την τεχνολογία και την τέχνη.



## Βιβλιογραφία

- Adcock, K. S., Chandler, C., Buell, E. P., Solorzano, B. R., Loerwald, K. W., Borland, M. S., & Engineer, C. T. (2020). Vagus nerve stimulation paired with tones restores auditory processing in a rat model of Rett syndrome. *Brain stimulation*, 13(6), 1494-1503.
- Alain, C., Arnott, S. R., & Picton, T. W. (2001). Bottom-up and top-down influences on auditory scene analysis: Evidence from event-related brain potentials. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(5), 1072.
- Anderson, C. A., Wiggins, I. M., Kitterick, P. T., & Hartley, D. E. (2017). Adaptive benefit of cross-modal plasticity following cochlear implantation in deaf adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(38), 10256-10261.
- Angrick, M., Luo, S., Rabbani, Q., Candrea, D. N., Shah, S., Milsap, G. W., ... & Crone, N. E. (2024). Online speech synthesis using a chronically implanted brain-computer interface in an individual with ALS. *Scientific reports*, 14(1), 9617.
- Anumanchipalli, G. K., Chartier, J., & Chang, E. F. (2019). Speech synthesis from neural decoding of spoken sentences. *Nature*, 568(7753), 493-498.
- Araújo Porto, I., & de Souza Rossini, M. (2021). Soundscapes of the Pernambuco New Cycle of Cinema. *Intermedialités*, (37), 1-17.
- Bavelier, D., & Neville, H. J. (2002). Cross-modal plasticity: where and how?. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(6), 443-452.
- Bavelier, D., Dye, M. W., & Hauser, P. C. (2006). Do deaf individuals see better?. *Trends in cognitive sciences*, 10(11), 512-518.
- Bengtsson, S. L., Nagy, Z., Skare, S., Forsman, L., Forssberg, H., & Ullén, F. (2005). Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development. *Nature Neuroscience*, 8(11), 1148-1150.
- Bermudez, P., Lerch, J. P., Evans, A. C., & Zatorre, R. J. (2009). Neuroanatomical correlates of musicianship as revealed by cortical thickness and voxel-based morphometry. *Cerebral cortex*, 19(7), 1583-1596.
- Best, C. T. (1995). *A direct realist perspective on cross-language speech perception*. In W. Strange (Ed.), *Speech perception and linguistic experience* (pp. 171-204). Timonium, MD: York Press.

- Bidelman, G. M., & Krishnan, A. (2009). Neural correlates of consonance, dissonance, and the hierarchy of musical pitch in the human brainstem. *Journal of Neuroscience*, 29(42), 13165-13171.
- Bidelman, G. M., Bush, L. C., & Boudreaux, A. M. (2020). Effects of noise on the behavioral and neural categorization of speech. *Frontiers in neuroscience*, 14, 153.
- Binder, J., & Price, C. J. (2001). Functional neuroimaging of language. *Handbook of functional neuroimaging of cognition*, 187-251.
- Blessner, B., & Salter, L. R. (2007). Spaces speak, are you listening. *Experiencing aural architecture*, 232.
- Boersen, R. (2022). Enactive Listening: Perceptual reflections on soundscape composition. *Organised Sound*, 27(1), 69-79.
- Boll, S. (2003). Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction. *IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 27(2), 113-120.
- Bonetti, L., Fernández-Rubio, G., Carlomagno, F., Dietz, M., Pantazis, D., Vuust, P., & Kringelbach, M. L. (2024). Spatiotemporal brain hierarchies of auditory memory recognition and predictive coding. *Nature Communications*, 15(1), 4313.
- Borland, M. S., Vrana, W. A., Moreno, N. A., Fogarty, E. A., Buell, E. P., Vanneste, S., ... & Engineer, C. T. (2019). Pairing vagus nerve stimulation with tones drives plasticity across the auditory pathway. *Journal of neurophysiology*.
- Borland, M. S., Buell, E. P., Riley, J. R., Carroll, A. M., Moreno, N. A., Sharma, P., ... & Engineer, C. T. (2023). Precise sound characteristics drive plasticity in the primary auditory cortex with VNS-sound pairing. *Frontiers in Neuroscience*, 17, 1248936.
- Bosch, L., & Sebastián-Gallés, N. (2003). Simultaneous bilingualism and the perception of a language-specific vowel contrast in the first year of life. *Language and speech*, 46(2-3), 217-243.
- Bosman, I. D. V., Buruk, O. O., Jørgensen, K., & Hamari, J. (2024). The effect of audio on the experience in virtual reality: a scoping review. *Behaviour & Information Technology*, 43(1), 165-199.
- Brattico, E., & Pearce, M. (2013). The neuroaesthetics of music. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 7(1), 48.
- Bregman, A. S. (1984, July). Auditory scene analysis. In *Proceedings of the 7th International Conference on Pattern Recognition* (pp. 168-175).
- Bregman, A. S. (1990). *Auditory Scene Analysis*. MIT Press.

- Bregman, A. S. (1994). *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*. MIT press.
- Bremner, P., Mitchell, T. J., & McIntosh, V. (2022). The impact of data sonification in virtual reality robot teleoperation. *Frontiers in Virtual Reality*, 3, 904720.
- Brumberg, J. S., Nieto-Castanon, A., Kennedy, P. R., & Guenther, F. H. (2010). Brain–computer interfaces for speech communication. *Speech communication*, 52(4), 367-379.
- Butorova, A., & Sergeev, A. (2025). From traditional algorithms to artificial intelligence: a review of the development of sensory substitution sonification methods. *The European Physical Journal Special Topics*, 1-23.
- Byrne, J. H. (2017). *Learning and memory: a comprehensive reference*. Academic Press.
- Cambridge, G., Taylor, T., Arnott, W., & Wilson, W. J. (2022). Auditory training for adults with cochlear implants: A systematic review. *International Journal of Audiology*, 61(11), 896-904.
- Cardon, G., Campbell, J., & Sharma, A. (2012). Plasticity in the developing auditory cortex: evidence from children with sensorineural hearing loss and auditory neuropathy spectrum disorder. *Journal of the American Academy of Audiology*, 23(06), 396-411.
- Chambers, C., Akram, S., Adam, V., Pelofi, C., Sahani, M., Shamma, S., & Pressnitzer, D. (2017). Prior context in audition informs binding and shapes simple features. *Nature communications*, 8(1), 15027.
- Chang, M., Iizuka, H., Naruse, Y., Ando, H., & Maeda, T. (2014). Unconscious learning of auditory discrimination using mismatch negativity (MMN) neurofeedback. *Scientific reports*, 4(1), 6729.
- Chaurasia, H. K., & Majhi, M. (2021, December). Sound design for cinematic virtual reality: a state-of-the-art review. In *International conference of the Indian society of ergonomics* (pp. 357-368). Cham: Springer International Publishing.
- Chen, F., Yasoda-Mohan, A., Sé, C. Ó., & Vanneste, S. (2025). Auditory illusory models as proxies to investigate bottom-up and top-down neural networks of phantom perception. *Imaging Neuroscience*, 3, imag\_a\_00574.
- Chibalashvili, A., Kharchenko, P., Bezuhla, R., Savchuk, I., & Sydorenko, V. (2022). Interactive Sound Installation as an Implementation of Contemporary Communication Models. *Postmodern Openings*, 13(2), 239-253.
- Chibalashvili, A., Savchuk, I., Olianina, S., Shalinskyi, I., & Korenyuk, Y. (2023). Creative Coding as a Modern Art Tool. *BRAIN. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, 14(2).

- Commère, L., & Rouat, J. (2023). Evaluation of short-range depth sonifications for visual-to-auditory sensory substitution. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 53(3), 479-489.
- Crollen, V., Spruyt, T., Mahau, P., Bottini, R., & Collignon, O. (2019). How visual experience and task context modulate the use of internal and external spatial coordinate for perception and action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 45(3), 354.
- Crum, R., Chowsilpa, S., Kaski, D., Giunti, P., Bamio, D. E., & Koochi, N. (2024). Hearing rehabilitation of adults with auditory processing disorder: a systematic review and meta-analysis of current evidence-based interventions. *Frontiers in Human Neuroscience*, 18, 1406916.
- Cummings, L. (2009). *Clinical pragmatics*. Cambridge University Press.
- Davis, M. H., & Johnsrude, I. S. (2007). Hearing speech sounds: top-down influences on the interface between audition and speech perception. *Hearing research*, 229(1-2), 132-147.
- Davis, S., & Mermelstein, P. (1980). Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 28(4), 357-366.
- Defenderfer, J., Kerr-German, A., Hedrick, M., & Buss, A. T. (2017). Investigating the role of temporal lobe activation in speech perception accuracy with normal hearing adults: An event-related fNIRS study. *Neuropsychologia*, 106, 31-41.
- Dell'Anna, A., Leman, M., & Berti, A. (2021). Musical interaction reveals music as embodied language. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 667838.
- Denham, S. L., & Winkler, I. (2020). Predictive coding in auditory perception: challenges and unresolved questions. *European Journal of Neuroscience*, 51(5), 1151-1160.
- Derke, F., Filipović-Grčić, L., Raguž, M., Lasić, S., Orešković, D., & Demarin, V. (2023). Neuroaesthetics: how we like what we like. In *Mind, brain and education* (pp. 1-12). Cham: Springer International Publishing.
- Deutsch, D. (1986). A musical paradox. *Music Perception*, 3(3), 275-280.
- Bregman, A. S. (1984, July). Auditory scene analysis. In *Proceedings of the 7th International Conference on Pattern Recognition* (pp. 168-175).
- Di Bona, E. (2022). Hearing chimeras. *Synthese*, 200(3), 257.
- Ding, N., & Simon, J. Z. (2014). Cortical entrainment to continuous speech: functional roles and interpretations. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 311.

- Dornhoffer, J. R., Chidarala, S., Patel, T., Khandalavala, K. R., Nguyen, S. A., Schwartz-Leyzac, K. C., ... & Mcrackan, T. R. (2024). Systematic review of auditory training outcomes in adult cochlear implant recipients and meta-analysis of outcomes. *Journal of Clinical Medicine*, 13(2), 400.
- Drever, J. L. (2002). Soundscape composition: the convergence of ethnography and acousmatic music. *Organised Sound*, 7(1), 21-27.
- Drosos, K., Papanicolaou, A., Voniati, L., Panayidou, K., & Thodi, C. (2024). Auditory processing and speech-sound disorders. *Brain Sciences*, 14(3), 291.
- Drullman, R., Festen, J. M., & Plomp, R. (1994). Effect of temporal envelope smearing on speech reception. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 95(2), 1053-1064.
- Engineer, N. D., Riley, J. R., Seale, J. D., Vrana, W. A., Shetake, J. A., Sudanagunta, S. P., ... & Kilgard, M. P. (2011). Reversing pathological neural activity using targeted plasticity. *Nature*, 470(7332), 101-104.
- Ephraim, Y., & Malah, D. (2003). Speech enhancement using a minimum-mean square error short-time spectral amplitude estimator. *IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 32(6), 1109-1121.
- Evans, E. F. (1993, June). Basic physiology of the hearing mechanism. In *Audio Engineering Society Conference: 12th International Conference: The Perception of Reproduced Sound*. Audio Engineering Society.
- Fahlenbrach, K. (2005). Aesthetics and audiovisual metaphors in media perception. *CLCWeb: Comparative Literature and Culture*, 7(4), 4.
- Faramarzi, M., Kasten, F. H., Altaş, G., Aleman, A., Ćurčić-Blake, B., & Herrmann, C. S. (2021). Similar EEG activity patterns during experimentally-induced auditory illusions and veridical perceptions. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 602437.
- Farquharson, K., & Tambyraja, S. (2022). Introduction: innovations in treatment for children with speech sound disorders. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*, 53(3), 627-631.
- Farrar, R., Ashjaei, S., & Arjmandi, M. K. (2024). Speech-evoked cortical activities and speech recognition in adult cochlear implant listeners: a review of functional near-infrared spectroscopy studies. *Experimental Brain Research*, 242(11), 2509-2530.
- Filimon, R. C. (2024). Illusions of Auditory Reception and Paradoxes of Perception—Psychoacoustic Effects Generated by Sounds. *Artes. Journal of musicology*, (29-30), 85-94.

- Flowers, J. H., & Hauer, T. A. (1993). "Sound" alternatives to visual graphics for exploratory data analysis. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 25(2), 242-249.
- Flowers, J. H., Turnage, K. D., & Buhman, D. C. (2005). Desktop data sonification: Comments on Flowers et al., ICAD 1996. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 2(4), 473-476.
- Formisano, E., Kim, D. S., Di Salle, F., Van de Moortele, P. F., Ugurbil, K., & Goebel, R. (2003). Mirror-symmetric tonotopic maps in human primary auditory cortex. *Neuron*, 40(4), 859-869.
- Fu, Q. J., Galvin, J., Wang, X., & Nogaki, G. (2004). Effects of auditory training on adult cochlear implant patients: a preliminary report. *Cochlear implants international*, 5(sup1), 84-90.
- Fujii, S., & Wan, C. Y. (2014). The role of rhythm in speech and language rehabilitation: The SEP hypothesis. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 777.
- Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B., & Mangun, G. R. (2006). *Cognitive Neuroscience. The biology of the mind.*(2014).
- George, M. S., & Aston-Jones, G. (2010). Noninvasive techniques for probing neurocircuitry and treating illness: vagus nerve stimulation (VNS), transcranial magnetic stimulation (TMS) and transcranial direct current stimulation (tDCS). *Neuropsychopharmacology*, 35(1), 301-316.
- Gfeller, K., Driscoll, V., Kenworthy, M., & Van Voorst, T. (2011). Music therapy for preschool cochlear implant recipients. *Music Therapy Perspectives*, 29(1), 39.
- Gilbert, G., & Lorenzi, C. (2006). The ability of listeners to use recovered envelope cues from speech fine structure. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(4), 2438-2444.
- Giomi, A. (2019). The case for an embodied approach to listening. *Bodies, technologies and perception. Hybrid. Revue des arts et médiations humaines*, (6).
- Giraud, A. L., & Poeppel, D. (2012). Cortical oscillations and speech processing: emerging computational principles and operations. *Nature neuroscience*, 15(4), 511-517.
- Giraud, A. L., Lorenzi, C., Ashburner, J., Wable, J., Johnsrude, I., Frackowiak, R., & Kleinschmidt, A. (2000). Representation of the temporal envelope of sounds in the human brain. *Journal of neurophysiology*, 84(3), 1588-1598.
- Glennon, E., Svirsky, M. A., & Froemke, R. C. (2020). Auditory cortical plasticity in cochlear implant users. *Current opinion in neurobiology*, 60, 108-114.

- Glennon, E., Valtcheva, S., Zhu, A., Wadghiri, Y. Z., Svirsky, M. A., & Froemke, R. C. (2023). Locus coeruleus activity improves cochlear implant performance. *Nature*, 613(7943), 317-323.
- Glick, H. A., & Sharma, A. (2020). Cortical neuroplasticity and cognitive function in early-stage, mild-moderate hearing loss: evidence of neurocognitive benefit from hearing aid use. *Frontiers in neuroscience*, 14, 93.
- Granzow, M. (1999). Ventriloquial Dummy Tones: Embodied Cognition of Pitch Direction. *Cognitive Science Reports*.
- Grey, J. M. (1977). Multidimensional perceptual scaling of musical timbres. *the Journal of the Acoustical Society of America*, 61(5), 1270-1277.
- Hearnshaw, S., Baker, E., & Munro, N. (2019). Speech perception skills of children with speech sound disorders: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 62(10), 3771-3789.
- Heinz, M. G., & Swaminathan, J. (2009). Quantifying envelope and fine-structure coding in auditory nerve responses to chimaeric speech. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 10(3), 407-423.
- Heng, J., Cantarero, G., Elhilali, M., & Limb, C. J. (2011). Impaired perception of temporal fine structure and musical timbre in cochlear implant users. *Hearing research*, 280(1-2), 192-200.
- Herholz, S. C., & Zatorre, R. J. (2012). Musical training as a framework for brain plasticity: behavior, function, and structure. *Neuron*, 76(3), 486-502.
- Hermansky, H. (1990). Perceptual linear predictive (PLP) analysis of speech. *the Journal of the Acoustical Society of America*, 87(4), 1738-1752.
- Hockley, A., Bohórquez, L. H., & Malmierca, M. S. (2025). Top-down prediction signals from the medial prefrontal cortex govern auditory cortex prediction errors. *Cell Reports*, 44(4).
- Hopyan, T., Peretz, I., Chan, L. P., Papsin, B. C., & Gordon, K. A. (2012). Children using cochlear implants capitalize on acoustical hearing for music perception. *Frontiers in psychology*, 3, 425.
- Hu, W., Zhang, J., Chen, T., & Sun, Y. (2025). Effects of auditory training on children with developmental language disorder: a systematic review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 19, 1606860.
- Humes, L. E., Lee, J. H., & Coughlin, M. P. (2006). Auditory measures of selective and divided attention in young and older adults using single-talker competition. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(5), 2926-2937.

- Ikoniadou, E. (2014). Abstract time and affective perception in the sonic work of art. *Body & Society*, 20(3-4), 140-161.
- Irvine, D. R. (2018). Auditory perceptual learning and changes in the conceptualization of auditory cortex. *Hearing research*, 366, 3-16.
- Ishizu, T., & Zeki, S. (2011). Toward a brain-based theory of beauty. *PloS one*, 6(7), e21852.
- Ishizu, T., & Zeki, S. (2013). The brain's specialized systems for aesthetic and perceptual judgment. *European Journal of Neuroscience*, 37(9), 1413-1420.
- Iverson, P., Kuhl, P. K., Akahane-Yamada, R., Diesch, E., Tohkura, Y. I., Kettermann, A., & Siebert, C. (2003). A perceptual interference account of acquisition difficulties for non-native phonemes. *Cognition*, 87(1), B47-B57.
- Jacobsen, T., Buchta, K., Köhler, M., & Schröger, E. (2004). The primacy of beauty in judging the aesthetics of objects. *Psychological reports*, 94(3\_suppl), 1253-1260.
- Jamil, N., Belkacem, A. N., Ouhbi, S., & Lakas, A. (2021). Noninvasive electroencephalography equipment for assistive, adaptive, and rehabilitative brain-computer interfaces: a systematic literature review. *Sensors*, 21(14), 4754.
- Jeng, F. C., Hu, J., Dickman, B., Montgomery-Reagan, K., Tong, M., Wu, G., & Lin, C. D. (2011). Cross-linguistic comparison of frequency-following responses to voice pitch in American and Chinese neonates and adults. *Ear and hearing*, 32(6), 699-707.
- Jeng, F. C., Lin, C. D., Sabol, J. T., Hollister, G. R., Chou, M. S., Chen, C. H., ... & Tsou, Y. A. (2016). Pitch perception and frequency-following responses elicited by lexical-tone chimeras. *International Journal of Audiology*, 55(1), 53-63.
- Jeng, F. C., Hart, B. N., & Lin, C. D. (2021). Separating the Novel Speech Sound Perception of Lexical Tone Chimeras From Their Auditory Signal Manipulations: Behavioral and Electroencephalographic Evidence. *Perceptual and Motor Skills*, 128(6), 2527-2543.
- Kappel, V., Moreno, A. C. D. P., & Buss, C. H. (2011). Plasticity of the auditory system: theoretical considerations. *Brazilian Journal of otorhinolaryngology*, 77, 670-674.
- Kayser et al. (2005) – *Mechanisms for allocating auditory attention: An auditory saliency map*
- Kayser, C., Petkov, C. I., & Logothetis, N. K. (2007). Tuning to sound frequency in auditory field potentials. *Journal of neurophysiology*, 98(3), 1806-1809.
- Kayser, C., Petkov, C. I., Augath, M., & Logothetis, N. K. (2007). Functional imaging reveals visual modulation of specific fields in auditory cortex. *Journal of Neuroscience*, 27(8), 1824-1835
- Kendall, R. A., & Carterette, E. C. (1993). Identification and blend of timbres as a basis for orchestration. *Contemporary Music Review*, 9(1-2), 51-67.

- Keylin, V. (2020). Crash, boom, bang: Affordances for participation in sound art. *SoundEffects- An Interdisciplinary Journal of Sound and Sound Experience*, 9(1), 98-115.
- Kilgard, M. P., & Merzenich, M. M. (1998). Plasticity of temporal information processing in the primary auditory cortex. *Nature Neuroscience*, 1(8), 727–731.
- Kim, S., Emory, C., & Choi, I. (2021). Neurofeedback training of auditory selective attention enhances speech-in-noise perception. *Frontiers in human neuroscience*, 15, 676992.
- King, A. J. (2023). Plasticity of Information Processing in the Auditory System. In *Oxford Research Encyclopedia of Neuroscience*.
- Kiran, S., & Thompson, C. K. (2019). Neuroplasticity of language networks in aphasia: Advances, updates, and future challenges. *Frontiers in neurology*, 10, 295.
- Kniaż, L. (2019). Sound design as narrative device in contemporary film: Subliminal soundscape of war and terror in *Sicario* (2015). *Crossroads. A Journal of English Studies*, (03 (26)), 33-46.
- Knudsen, E. I. (2004). Sensitive periods in the development of the brain and behavior. *Journal of cognitive neuroscience*, 16(8), 1412-1425.
- Kojima, S., & Kanoh, S. I. (2024). An auditory brain-computer interface based on selective attention to multiple tone streams. *Plos one*, 19(5), e0303565.
- Komeiji, S., Mitsuhashi, T., Iimura, Y., Suzuki, H., Sugano, H., Shinoda, K., & Tanaka, T. (2024). Feasibility of decoding covert speech in ECoG with a Transformer trained on overt speech. *Scientific Reports*, 14(1), 11491.
- Kotchoubey, B. (2014). Objectivity of human consciousness is a product of tool usage. *Frontiers in Psychology*, 5, 1152.
- Koumura, T., Terashima, H., & Furukawa, S. (2020). Chimeric sounds with shuffled texture and content synthesized by a model of the auditory system. *Acoustical Science and Technology*, 41(1), 337-340.
- Kral, A., Kronenberger, W. G., Pisoni, D. B., & O'Donoghue, G. M. (2016). Neurocognitive factors in sensory restoration of early deafness: a connectome model. *The Lancet Neurology*, 15(6), 610-621.
- Kraus, N., & Chandrasekaran, B. (2010). Music training for the development of auditory skills. *Nature reviews neuroscience*, 11(8), 599-605.
- Kraus, N., & White-Schwoch, T. (2015). Unraveling the biology of auditory learning: A cognitive–sensorimotor–reward framework. *Trends in cognitive sciences*, 19(11), 642-654.

- Krishnan, A., Xu, Y., Gandour, J., & Cariani, P. (2005). Encoding of pitch in the human brainstem is sensitive to language experience. *Cognitive Brain Research*, 25(1), 161-168.
- Kubovy, M., & Van Valkenburg, D. (2001). Auditory and visual objects. *Cognition*, 80(1-2), 97-126.
- Kuhl, P. K. (2004). Early language acquisition: cracking the speech code. *Nature reviews neuroscience*, 5(11), 831-843.
- Kulezic-Wilson, D. (2008). Sound design is the new score. *Music, Sound, and the Moving Image*, 2(2), 127-131.
- Kumar, P., Singh, N. K., & Hussain, R. O. (2021). Effect of speech in noise training in the auditory and cognitive skills in children with auditory processing disorders. *International journal of pediatric otorhinolaryngology*, 146, 110735.
- Kuriki, S., Yokosawa, K., & Takahashi, M. (2013). Neural representation of scale illusion: magnetoencephalographic study on the auditory illusion induced by distinctive tone sequences in the two ears. *Plos one*, 8(9), e75990.
- LaBelle, B. (2015). *Background noise: perspectives on sound art*. Bloomsbury Publishing USA.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). The metaphorical structure of the human conceptual system. *Cognitive science*, 4(2), 195-208.
- Lalor, E. C., & Foxe, J. J. (2010). Neural responses to uninterrupted natural speech can be extracted with precise temporal resolution. *European journal of neuroscience*, 31(1), 189-193.
- Lazard, D. S., Doelling, K. B., & Arnal, L. H. (2023). Plasticity after hearing rehabilitation in the aging brain. *Trends in Hearing*, 27, 23312165231156412.
- Lee, Y. E., & Lee, S. H. (2022, February). EEG-transformer: Self-attention from transformer architecture for decoding EEG of imagined speech. In *2022 10th International winter conference on brain-computer interface (BCI)* (pp. 1-4). IEEE.
- Lefaucheur, J. P., Antal, A., Ayache, S. S., Benninger, D. H., Brunelin, J., Cogiamanian, F., ... & Paulus, W. (2017). Evidence-based guidelines on the therapeutic use of transcranial direct current stimulation (tDCS). *Clinical neurophysiology*, 128(1), 56-92.
- Leman, M., & Maes, P. J. (2014). Music perception and embodied music cognition. In *The Routledge handbook of embodied cognition* (pp. 81-89). Routledge.
- Liberman, A. M., & Mattingly, I. G. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, 21(1), 1-36.

- Littlejohn, K. T., Cho, C. J., Liu, J. R., Silva, A. B., Yu, B., Anderson, V. R., ... & Anumanchipalli, G. K. (2025). A streaming brain-to-voice neuroprosthesis to restore naturalistic communication. *Nature neuroscience*, 1-11.
- Loizou, P. C. (2006). Speech processing in vocoder-centric cochlear implants. *Advances in Oto Rhino Laryngology*, 64, 109-143.
- Luo, H., & Poeppel, D. (2007). Phase patterns of neuronal responses reliably discriminate speech in human auditory cortex. *Neuron*, 54(6), 1001-1010.
- Luo, S., Rabbani, Q., & Crone, N. E. (2022). Brain-computer interface: applications to speech decoding and synthesis to augment communication. *Neurotherapeutics*, 19(1), 263-273.
- Lutters, B. T., & Koehler, P. J. (2017). Brainwaves in Concert: the 20th Century Sonification of the Electroencephalogram (S28. 004). *Neurology*, 88(16\_supplement), S28-004.
- Magnotti, J. F., Ma, W. J., & Beauchamp, M. S. (2013). Causal inference of asynchronous audiovisual speech. *Frontiers in psychology*, 4, 798.
- Mäkelä, J. P., Hari, R., & Linnankivi, A. (1987). Different analysis of frequency and amplitude modulations of a continuous tone in the human auditory cortex: a neuromagnetic study. *Hearing research*, 27(3), 257-264.
- Malenka, R. C., & Bear, M. F. (2004). LTP and LTD: an embarrassment of riches. *Neuron*, 44(1), 5-21.
- Mane, R., Wu, Z., & Wang, D. (2022). Poststroke motor, cognitive and speech rehabilitation with brain–computer interface: a perspective review. *Stroke and vascular neurology*, 7(6).
- Markatos, N., Bibas, A., Pasiadis, K., Bamiou, D. E., Dimitriadis, D., & Kikidis, D. (2024). Development and validation of words in babble test in the modern Greek language. *Hearing Balance and Communication*, 22(2), 45-51.
- Martin, K. A., Papadoyannis, E. S., Schiavo, J. K., Fadaei, S. S., Issa, H. A., Song, S. C., ... & Froemke, R. C. (2024). Vagus nerve stimulation recruits the central cholinergic system to enhance perceptual learning. *Nature neuroscience*, 27(11), 2152-2166.
- Martin, S., Iturrate, I., Millán, J. D. R., Knight, R. T., & Pasley, B. N. (2018). Decoding inner speech using electrocorticography: Progress and challenges toward a speech prosthesis. *Frontiers in neuroscience*, 12, 422.
- Maurer, D., & Lewis, T. L. (2007). Sensitive periods in human development: evidence from musical training. *Cortex*, 47(9), 1126–1137.
- McAdams, S. (2019). Timbre as a structuring force in music. In *Timbre: Acoustics, perception, and cognition* (pp. 211-243). Cham: Springer International Publishing.

- McConnachie, P. (2023). Soundings: A Practice Led investigation into Interactive and Immersive Sound Art Installations 2000-2018 (Doctoral dissertation, Liverpool John Moores University (United Kingdom)).
- McDermott, J. H. (2009). The cocktail party problem. *Current Biology*, *19*(22), R1024-R1027.
- McGurk, H., & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, *264*(5588), 746-748.
- McMahon, E., Wintermark, P., & Lahav, A. (2012). Auditory brain development in premature infants: the importance of early experience. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1252*(1), 17-24.
- Mehta, A. H., Jacoby, N., Yasin, I., Oxenham, A. J., & Shamma, S. A. (2017). An auditory illusion reveals the role of streaming in the temporal misallocation of perceptual objects. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *372*(1714), 20160114.
- Merzenich, M. M., Jenkins, W. M., Johnston, P., Schreiner, C., Miller, S. L., & Tallal, P. (1996). Temporal processing deficits of language-learning impaired children ameliorated by training. *Science*, *271*(5245), 77-81.
- Merzenich, M., Wright, B., Jenkins, W., Xerri, C., Byl, N., Miller, S., & Tallal, P. (1996, January). Cortical plasticity underlying perceptual, motor, and cognitive skill development: implications for neurorehabilitation. In *Cold Spring Harbor symposia on quantitative biology* (Vol. 61, pp. 1-8). Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- Mesgarani, N., Cheung, C., Johnson, K., & Chang, E. F. (2014). Phonetic feature encoding in human superior temporal gyrus. *Science*, *343*(6174), 1006-1010.
- Milekovic, T., Sarma, A. A., Bacher, D., Simeral, J. D., Saab, J., Pandarinath, C., ... & Hochberg, L. R. (2018). Stable long-term BCI-enabled communication in ALS and locked-in syndrome using LFP signals. *Journal of neurophysiology*, *120*(7), 343-360.
- Moore, B. C. (2008). The role of temporal fine structure processing in pitch perception, masking, and speech perception for normal-hearing and hearing-impaired people. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, *9*(4), 399-406.
- Moore, B. C. (2012). An introduction to the psychology of hearing. Brill.
- Morucci, P., Nara, S., Lizarazu, M., Martin, C., & Molinaro, N. (2024). Language experience shapes predictive coding of rhythmic sound sequences. *Elife*, *12*, RP91636.
- Moses, D. A., Metzger, S. L., Liu, J. R., Anumanchipalli, G. K., Makin, J. G., Sun, P. F., ... & Chang, E. F. (2021). Neuroprosthesis for decoding speech in a paralyzed person with anarthria. *New England Journal of Medicine*, *385*(3), 217-227.

- Moucha, R., Pandya, P. K., Engineer, N. D., Rathbun, D. L., & Kilgard, M. P. (2005). Background sounds contribute to spectrotemporal plasticity in primary auditory cortex. *Experimental brain research*, 162(4), 417-427.
- Murphy, D. L., Koponen, L. M., Wood, E., Li, Y., Bukhari-Parlakturk, N., Goetz, S. M., & Peterchev, A. V. (2024). Reduced auditory perception and brain response with quiet TMS coil. *Brain stimulation*, 17(6), 1197-1207.
- Nakajima, Y. (1992). Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound.
- Nees, M. A., & Walker, B. N. (2009). Auditory Interfaces and Sonification.
- Neves, L., Correia, A. I., Castro, S. L., Martins, D., & Lima, C. F. (2022). Does music training enhance auditory and linguistic processing? A systematic review and meta-analysis of behavioral and brain evidence. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 140, 104777.
- Newman, M. (2016). Florian Hecker: Chimerization and Form.
- Nijholt, A., Contreras-Vidal, J. L., Jeunet, C., & Väljamäe, A. (2022). Brain-computer interfaces for non-clinical (home, sports, art, entertainment, education, well-being) applications. *Frontiers in Computer Science*, 4, 860619.
- Nurdin, M. (2024). Distortions in sound – acoustics & psychoacoustics. *Acoustic Science Review*.
- Nwagu, C., AlSlaity, A., & Orji, R. (2023). EEG-based brain-computer interactions in immersive virtual and augmented reality: A systematic review. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 7(EICS), 1-33.
- Oba, S. I., Fu, Q. J., & Galvin III, J. J. (2011). Digit training in noise can improve cochlear implant users' speech understanding in noise. *Ear and hearing*, 32(5), 573-581.
- Obleser, J., Wise, R. J., Dresner, M. A., & Scott, S. K. (2007). Functional integration across brain regions improves speech perception under adverse listening conditions. *Journal of Neuroscience*, 27(9), 2283-2289.
- Obleser, J., & Eisner, F. (2009). Pre-lexical abstraction of speech in the auditory cortex. *Trends in cognitive sciences*, 13(1), 14-19.
- Opoku-Baah, C., Schoenhaut, A. M., Vassall, S. G., Tovar, D. A., Ramachandran, R., & Wallace, M. T. (2021). Visual influences on auditory behavioral, neural, and perceptual processes: A review. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 22(4), 365-386.
- Oppenheim & Schaffer (2010). *Discrete-Time Signal Processing*.
- Ortega-Llebaria, M., Gu, H., & Fan, J. (2013). English speakers' perception of Spanish lexical stress: Context-driven L2 stress perception. *Journal of Phonetics*, 41(3-4), 186-197.

- O'sullivan, J. A., Power, A. J., Mesgarani, N., Rajaram, S., Foxe, J. J., Shinn-Cunningham, B. G., ... & Lalor, E. C. (2015). Attentional selection in a cocktail party environment can be decoded from single-trial EEG. *Cerebral cortex*, *25*(7), 1697-1706.
- Oxenham, A. J. (2018). How we hear: The perception and neural coding of sound. *Annual review of psychology*, *69*(1), 27-50.
- Pascual-Leone, A., Amedi, A., Fregni, F., & Merabet, L. B. (2005). The plastic human brain cortex. *Annu. Rev. Neurosci.*, *28*(1), 377-401.
- Perron, M., Liu, Q., Tremblay, P., & Alain, C. (2024). Enhancing speech perception in noise through articulation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1537*(1), 140-154.
- Plack, C. J. (2023). *The sense of hearing*. Routledge.
- Poeppel, D. (2003). The analysis of speech in different temporal integration windows: cerebral lateralization as 'asymmetric sampling in time'. *Speech communication*, *41*(1), 245-255.
- Polley, D. B., Steinberg, E. E., & Merzenich, M. M. (2006). Perceptual learning directs auditory cortical map reorganization through top-down influences. *Journal of Neuroscience*, *26*(12), 4970-4982.
- Prinsloo, K. D., & Lalor, E. C. (2022). General auditory and speech-specific contributions to cortical envelope tracking revealed using auditory chimeras. *Journal of Neuroscience*, *42*(41), 7782-7798.
- Qiu et al. (2025) . *A Review of Brain-Computer Interface-Based Language Decoding: From Signal Interpretation to Intelligent Communication*
- Rabiner, L., & Juang, B. H. (1993). *Fundamentals of speech recognition*. Prentice-Hall, Inc..
- Rao, R. P., & Ballard, D. H. (1999). Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects. *Nature neuroscience*, *2*(1), 79-87.
- Rayes, H., Al-Malky, G., & Vickers, D. (2019). Systematic review of auditory training in pediatric cochlear implant recipients. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *62*(5), 1574-1593.
- Recanzone, G. H., Guard, D. C., & Phan, M. L. (2000). Frequency and intensity response properties of single neurons in the auditory cortex of the behaving macaque monkey. *Journal of neurophysiology*, *83*(4), 2315-2331.
- Recanzone, G. H., & Sutter, M. L. (2008). The biological basis of audition. *Annu. Rev. Psychol.*, *59*(1), 119-142.
- Reissmüller, S. (2024). Effects of sensory stimulation in Virtual Reality (Doctoral dissertation, Technische Universität Wien).

- Rhode, W. S., Oertel, D., & Smith, P. H. (1983). Physiological response properties of cells labeled intracellularly with horseradish peroxidase in cat ventral cochlear nucleus. *Journal of Comparative Neurology*, 213(4), 448-463.
- Roman, S., Rochette, F., Triglia, J. M., Schön, D., & Bigand, E. (2016). Auditory training improves auditory performance in cochlear implanted children. *Hearing research*, 337, 89-95.
- Rosen, S. (1992). Temporal information in speech: acoustic, auditory and linguistic aspects. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 336(1278), 367-373.
- Rosen, S., Faulkner, A., & Wilkinson, L. (1999). Adaptation by normal listeners to upward spectral shifts of speech: Implications for cochlear implants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(6), 3629-3636.
- S Shinn-Cunningham, B. G., & Best, V. (2008). Selective attention in normal and impaired hearing. *Trends in amplification*, 12(4), 283-299.
- Schafer, R. M. (1993). *The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world*. Simon and Schuster.
- Schilling, A., Sedley, W., Gerum, R., Metzner, C., Tziridis, K., Maier, A., ... & Krauss, P. (2022). Predictive coding and stochastic resonance as fundamental principles of auditory perception. *arXiv preprint arXiv:2204.03354*.
- Schlaug, G., Norton, A., Marchina, S., Zipse, L., & Wan, C. Y. (2010). From singing to speaking: facilitating recovery from nonfluent aphasia. *Future Neurology*, 5(5), 657–665.
- Schneider, P., Engelmann, D., et al. (2023). Neuroanatomical Disposition, Natural Development, and Training-Induced Plasticity of the Human Auditory System from Childhood to Adulthood. *Journal of Neuroscience*, 43(37), 6430–6446.
- Schneider, P., Scherg, M., Dosch, H. G., Specht, H. J., Gutschalk, A., & Rupp, A. (2002). Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. *Nature Neuroscience*, 5(7), 688–694.
- Schönwiesner, M., Rübsamen, R., & von CRAMON, D. Y. (2005). Spectral and temporal processing in the human auditory cortex—revisited. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060(1), 89-92.
- Sekiyama, K., & Tohkura, Y. I. (1993). Inter-language differences in the influence of visual cues in speech perception. *Journal of Phonetics*, 21(4), 427-444.

- Shah, U., Alzubaidi, M., Mohsen, F., Abd-Alrazaq, A., Alam, T., & Househ, M. (2022). The role of artificial intelligence in decoding speech from EEG signals: a scoping review. *Sensors*, 22(18), 6975.
- Shamma, S. A., & Micheyl, C. (2010). Behind the scenes of auditory perception. *Current opinion in neurobiology*, 20(3), 361-366.
- Shams, L., & Kim, R. (2010). Crossmodal influences on visual and auditory perception. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365(1594), 2701–2707.
- Shan, T., Lalor, E. C., & Maddox, R. K. (2024). Chimeric music reveals an interaction of pitch and time in electrophysiological signatures of music encoding. *bioRxiv*, 2024-11.
- Shannon, R. V., Zeng, F. G., Kamath, V., Wygonski, J., & Ekelid, M. (1995). Speech recognition with primarily temporal cues. *Science*, 270(5234), 303-304.
- Sharma, A., Dorman, M. F., & Spahr, A. J. (2002). A sensitive period for the development of the central auditory system in children with cochlear implants: implications for age of implantation. *Ear and hearing*, 23(6), 532-539.
- Sharma, A., Cormier, K., & Grigsby, J. (2025). Effect of Supplemental Language Therapy on Cortical Neuroplasticity and Language Outcomes in Children with Hearing Loss. *Brain Sciences*, 15(2), 119.
- Shepard, R. N. (1964). Circularity in judgments of relative pitch. *The journal of the acoustical society of America*, 36(12), 2346-2353.
- Shim, H., Gibbs, L., Rush, K., Ham, J., Kim, S., Kim, S., & Choi, I. (2023). Neural mechanisms related to the enhanced auditory selective attention following neurofeedback training: Focusing on cortical oscillations. *Applied sciences*, 13(14), 8499.
- Shim, L., Kim, J., Kim, G., & Lee, H. J. (2025). Ear-specific neuroplasticity for sound localization in individuals with single-sided deafness. *Hearing Research*, 459, 109207.
- Shinn-Cunningham, B. G. (2008). Object-based auditory and visual attention. *Trends in cognitive sciences*, 12(5), 182-186.
- Siedenburg, K., Jones-Mollerup, K., & McAdams, S. (2016). Acoustic and categorical dissimilarity of musical timbre: Evidence from asymmetries between acoustic and chimeric sounds. *Frontiers in Psychology*, 6, 1977.
- Siedenburg, K., Graves, J., & Pressnitzer, D. (2023). A unitary model of auditory frequency change perception. *PLOS Computational Biology*, 19(1), e1010307.
- Siemons-Lühring, D. I., Euler, H. A., Mathmann, P., Suchan, B., & Neumann, K. (2021). The effectiveness of an integrated treatment for functional speech sound disorders—A randomized controlled trial. *Children*, 8(12), 1190.

- Sininger, Y. S. (2009). An Introduction to the Physiology of Hearing. *Ear and Hearing*, 30(3), 386-387.
- Smith, Z. M., Delgutte, B., & Oxenham, A. J. (2002). Chimaeric sounds reveal dichotomies in auditory perception. *Nature*, 416(6876), 87-90.
- Song, H. J., & Beilharz, K. (2008, September). Aesthetic and auditory enhancements for multi-stream information sonification. In *Proceedings of the 3rd international conference on Digital Interactive Media in Entertainment and Arts* (pp. 224-231).
- Stavisky, S. D. (2025). Restoring Speech Using Brain–Computer Interfaces. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 27.
- Stegeman, I., Velde, H. M., Robe, P. A. J. T., Stokroos, R. J., & Smit, A. L. (2021). Tinnitus treatment by vagus nerve stimulation: a systematic review. *PloS one*, 16(3), e0247221.
- Stein, J., von Kriegstein, K., & Tabas, A. (2021). Frequency and frequency modulation share the same predictive encoding mechanisms in human auditory cortex
- Stilp, C. E., & Kluender, K. R. (2010). Cochlea-scaled entropy, not consonants, vowels, or time, best predicts speech intelligibility. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(27), 12387-12392.
- Styles, E. (2006). *The psychology of attention*. Psychology Press.
- Sun, P., Anumanchipalli, G. K., & Chang, E. F. (2020). Brain2Char: a deep architecture for decoding text from brain recordings. *Journal of neural engineering*, 17(6), 066015.
- Takahara, Y., Niiijima, A., Park, C., & Ogawa, T. (2025). Enhancing eyes-free interaction in virtual reality using sonification for multiple object selection. *Frontiers in Virtual Reality*, 6, 1598776.
- Talavage, T. M., Sereno, M. I., Melcher, J. R., Ledden, P. J., Rosen, B. R., & Dale, A. M. (2004). Tonal organization in human auditory cortex revealed by progressions of frequency sensitivity. *Journal of neurophysiology*, 91(3), 1282-1296.
- Tates, A., Matran-Fernandez, A., Halder, S., & Daly, I. (2025). Speech imagery brain-computer interfaces: a systematic literature review. *Journal of Neural Engineering*.
- Tierney, A. T., Krizman, J., & Kraus, N. (2015). Music training alters the course of adolescent auditory development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(32), 10062-10067.
- Timofeeva, O. P., Gvozdeva, A. P., Shamantseva, N. D., Moshonkina, T. R., & Andreeva, I. G. (2023). Destabilization of Human Vertical Posture by Affective Auditory Stimuli. *Human Physiology*, 49(Suppl 1), S28-S41.

- Torppa, R., & Huotilainen, M. (2019). Why and how music can be used to rehabilitate and develop speech and language skills in hearing-impaired children. *Hearing research*, 380, 108-122.
- Toscano, J. C., & McMurray, B. (2010). Cue integration with categories: Weighting acoustic cues in speech using unsupervised learning and distributional statistics. *Cognitive science*, 34(3), 434-464.
- Trainor, L. J., & Cirelli, L. (2015). Rhythm and interpersonal synchrony in early social development. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1337(1), 45-52.
- Tremblay, K. L., & Kraus, N. (2002). Auditory training induces asymmetrical changes in cortical neural activity. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 45(3), 564-572.
- Tremblay, K. L., Shahin, A. J., Picton, T., & Ross, B. (2009). Auditory training alters the physiological detection of stimulus-specific cues in humans. *Clinical Neurophysiology*, 120(1), 128-135.
- Ulmer, J., Braun, S., Cheng, C. T., Dowey, S., & Wollert, J. (2022). Gamification of virtual reality assembly training: Effects of a combined point and level system on motivation and training results. *International Journal of Human-Computer Studies*, 165, 102854.
- van Tellingen, M., Hurkmans, J., Terband, H., Jonkers, R., & Maassen, B. (2023). Music and musical elements in the treatment of childhood speech sound disorders: A systematic review of the literature. *International Journal of Speech-Language Pathology*, 25(4), 549-565.
- Vera C. Rubin Observatory. (n.d.). *Rubin Rhapsodies project description*. Rubin Rhapsodies. Retrieved September 4, 2025, from <https://lsst-tvssc.github.io/RubinRhapsodies/project.html>
- Wang, D., & Chen, J. (2018). Supervised speech separation based on deep learning: An overview. *IEEE/ACM transactions on audio, speech, and language processing*, 26(10), 1702-1726.
- Wang, S., Liu, Y., Kou, N., Chen, Y., Liu, T., Wang, Y., & Wang, S. (2025). Impact of age-related hearing loss on decompensation of left DLPFC during speech perception in noise: a combined EEG-fNIRS study. *GeroScience*, 47(2), 2119-2134.
- Wang, W. J., Wu, X. H., & Li, L. (2008). The dual-pathway model of auditory signal processing. *Neuroscience bulletin*, 24(3), 173-182.
- Wang, Y., Liu, H., Wang, Y., Xuan, C., Hou, Y., Feng, S., ... & Wang, Y. (2024). Decoding Linguistic Representations of Human Brain. *arXiv preprint arXiv:2407.20622*.

- Warnecke, M., Peng, Z. E., & Litovsky, R. Y. (2020). The impact of temporal fine structure and signal envelope on auditory motion perception. *PLoS One*, 15(8), e0238125.
- Watson, C. S., & Kidd, G. R. (1994, November). Factors in the design of effective auditory displays. In *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD1994)*, Sante Fe, NM.
- Werker, J. F., & Tees, R. C. (1984). Cross-language speech perception: Evidence for perceptual reorganization during the first year of life. *Infant behavior and development*, 7(1), 49-63.
- Wilson, B. S., & Dorman, M. F. (2008). Cochlear implants: current designs and future possibilities. *J Rehabil Res Dev*, 45(5), 695-730.
- Wong, E. C. H., Wong, M. N., Velleman, S. L., Tong, M. C. F., & Lee, K. Y. S. (2023). Lexical tone perception and production in Cantonese-speaking children with childhood apraxia of speech: A pilot study. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 37(4-6), 316-329.
- Xu, L., & Pfingst, B. E. (2003). Relative importance of temporal envelope and fine structure in lexical-tone perception (L). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(6), 3024-3027.
- Xu, L., & Pfingst, B. E. (2008). Spectral and temporal cues for speech recognition: Implications for auditory prostheses. *Hearing research*, 242(1-2), 132-140.
- Yoo, S. H., Santosa, H., Kim, C. S., & Hong, K. S. (2021). Decoding multiple sound-categories in the auditory cortex by neural networks: an fNIRS study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 636191.
- Zendel, B. R., & Alain, C. (2012). Musicians experience less age-related decline in central auditory processing. *Psychology and aging*, 27(2), 410.
- Zeng, F. G., Nie, K., Stickney, G. S., Kong, Y. Y., Vongphoe, M., Bhargave, A., ... & Cao, K. (2005). Speech recognition with amplitude and frequency modulations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(7), 2293-2298.
- Zeng, T., Wang, Z., Lin, Y., Cheng, Y., Shan, X., Tao, Y., ... & Liu, Y. (2023). Doppler frequency-shift information processing in WOX-based memristive synapse for auditory motion perception. *Advanced Science*, 10(13), 2300030.
- Zhang, H., Xie, J., Zhao, C., Jin, Z., Du, F., Chen, Y., ... & Li, M. (2025). A Novel Spatial Auditory Brain-Computer Interface based on Low-Frequency Periodic Auditory Motion Stimulation Paradigm. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*.
- Zhang, Y., Jiang, Z., & Zheng, H. (2022, August). Research on Audience Cognition of Audio-Visual Interactive Art from the Perspective of Mental. In *Man-Machine-Environment*

- System Engineering: Proceedings of the 22nd International Conference on MMESE (Vol. 941, p. 77). Springer Nature.
- Zhang, Y., Chai, Y., Zhang, Y., Jia, H., Wang, Z., Zhang, Z., ... & Wu, H. (2025). Neural Plasticity and Hearing-Speech Development in Children with Auditory Brainstem Implants for Congenital Hearing Loss Due to Severe Inner Ear Malformation. *Advanced Science*, 2406092.
- Zhao, Y., & Tzanetakis, G. (2024). Interactive sonification for health and energy using chuck and unity. *arXiv preprint arXiv:2404.08813*.
- Zhou et al. (2024) – *Nonauditory effects of noise on special populations*
- Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: a psycholinguistic grain size theory. *Psychological bulletin*, 131(1), 3.
- Zucker, R. S., & Regehr, W. G. (2002). Short-term synaptic plasticity. *Annual review of physiology*, 64(1), 355-405.
- Χριστοδουλίδης, Π. (2021). Η συμβολή της μεγαλοκυτταρικής θεωρίας στη διερεύνηση της δυσλεξίας.