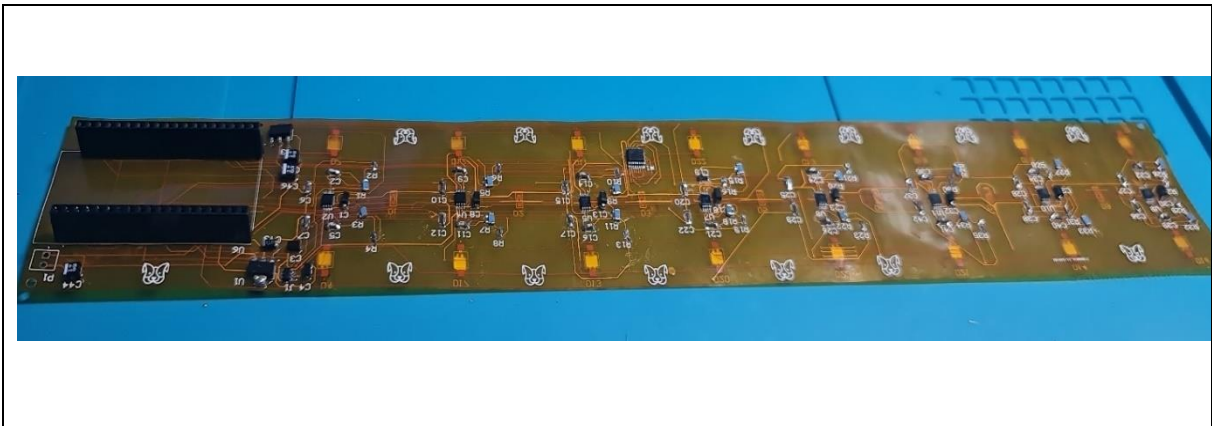


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σχεδίαση και Υλοποίηση Διάταξης για την
Καταγραφή της Δραστηριότητας του Εγκεφάλου
βασισμένη στη Λειτουργική Φασματοσκοπία Εγγύς
Υπέρυθρου (fNIRS)»



Του φοιτητή
Χονδρούδη Οδυσσέα
Αρ. Μητρώου: ele518180

Επιβλέπων
Όνοματεπώνυμο Δελημαράς Βασίλειος
Βαθμίδα Ακαδημαϊκός Υπότροφος

Ημερομηνία 10/02/2024

Τίτλος Δ.Ε. Neuro-Robotics: Μια προσέγγιση fNIRS για την αποκωδικοποίηση εγκεφαλικών
σημάτων για ρομποτικό έλεγχο

Κωδικός Δ.Ε. 23327

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Χονδρούδης Οδυσσέας

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Δελημαράς Βασίλειος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 03/11/2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 12/3/2023

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

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

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

«Στην εξέλιξη της τεχνολογίας»

Πρόλογος

Η απόφαση του σχεδιασμού και της υλοποίησης μιας φορητής συσκευής λειτουργικής φασματοσκοπίας εγγύς υπερύθρου (fNIRS) για τη μέτρηση της εγκεφαλικής δραστηριότητας καθοδηγήθηκε από μια έντονη περιέργεια για τις περιπλοκές του ανθρώπινου νου. Η γοητεία της συμβολής στη νευροεπιστημονική έρευνα, την κλινική διάγνωση και την αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή παρακίνησε αυτό το εγχείρημα. Μέσω αυτής της διατριβής, η εμπειρία που απέκτησα από την έρευνα και την τεχνολογία ήταν πολύ σημαντική. Η διαδικασία εξερεύνησης της φυσιολογίας του εγκεφάλου, της τεχνολογίας fNIRS και των νευρωνικών δικτύων όχι μόνο εμπάθυνη την κατανόησή μου αλλά και διεύρυνε την οπτική μου για τη διεπιστημονική φύση της σύγχρονης έρευνας. Οι προτάσεις βελτίωσης υπογραμμίζουν τη δέσμευση για αριστεία και συνεχή πρόοδο στον τομέα. Η συνειδητοποίηση ότι η εργασία αυτή θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια των μετρήσεων της εγκεφαλικής δραστηριότητας, επηρεάζοντας ενδεχομένως διάφορους τομείς, τροφοδοτεί την αίσθηση της ολοκλήρωσης και του σκοπού.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μιας φορητής συσκευής λειτουργικής φασματοσκοπίας εγγύς υπερόθρου (fNIRS) για τη μέτρηση της εγκεφαλικής δραστηριότητας, η οποία προσφέρει φορητότητα και ευελιξία για ποικίλες εφαρμογές. Η μελέτη περιλαμβάνει τη διερεύνηση της φυσιολογίας του εγκεφάλου, τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας fNIRS, τον ρόλο των νευρωνικών δικτύων και τις λεπτομέρειες κατασκευής της συσκευής. Η περίληψη υπογραμμίζει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το έργο και προτείνει βελτιώσεις για την ενίσχυση της ακρίβειας και της ευαισθησίας της συσκευής στη μέτρηση της εγκεφαλικής δραστηριότητας.

Η φορητή συσκευή fNIRS αποδεικνύεται πολύτιμο εργαλείο σε διάφορους τομείς, όπως η νευροεπιστήμη, η κλινική διάγνωση, οι ψυχοφυσιολογικές μελέτες, η εκπαίδευση και η αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή. Στον τομέα των νευροεπιστημών, η συσκευή επιτρέπει την ελεύθερη παρακολούθηση της εγκεφαλικής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια δυναμικών δραστηριοτήτων, παρέχοντας στους ερευνητές πληροφορίες για τις γνωστικές διαδικασίες. Στις κλινικές ρυθμίσεις, η συνεχής παρακολούθηση διευκολύνει την αξιολόγηση των νευρολογικών λειτουργιών κατά τη διάρκεια της θεραπείας. Οι ψυχολόγοι και οι ερευνητές αξιοποιούν τη συσκευή για την καταγραφή της αντίδρασης του εγκεφάλου σε διάφορες ψυχολογικές καταστάσεις. Επιπλέον, η συσκευή χρησιμεύει ως χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της ψυχικής κατάστασης και της απόδοσης σε προπονήσεις και απαιτητικά σενάρια. Σε εφαρμογές αλληλεπίδρασης ανθρώπου-υπολογιστή, βρίσκει ενσωμάτωση σε περιβάλλοντα επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας, επιτρέποντας τον ακριβή έλεγχο με βάση τις κινητικές δραστηριότητες.

Οι προτεινόμενες βελτιώσεις επικεντρώνονται στη βελτιστοποίηση της σταθερότητας, της φορητότητας και της ακρίβειας των μετρήσεων με την ενσωμάτωση Flex PCB, την προσαρμογή των αποστάσεων αισθητήρα-LED και τη βελτίωση των ρυθμίσεων των αισθητήρων. Αυτές οι βελτιώσεις αποσκοπούν στην παροχή λεπτομερέστερων και ακριβέστερων δεδομένων, προωθώντας περαιτέρω την αξιοπιστία και την πληρότητα των μετρήσεων της εγκεφαλικής δραστηριότητας.

«Design and Implementation of a Device for Recording Brain Activity Based on Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS)»

«Chondroudis Odysseas»

Abstract

This paper presents the design and implementation of a portable near-infrared functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) device for measuring brain activity, which offers portability and flexibility for a variety of applications. The study includes an exploration of brain physiology, the advantages of fNIRS technology, the role of neural networks, and the details of the device's construction. The abstract highlights the conclusions drawn from the project and suggests improvements to enhance the accuracy and sensitivity of the device in measuring brain activity.

The fNIRS handheld device is proving to be a valuable tool in various fields, such as neuroscience, clinical diagnosis, psychophysiological studies, education and human-computer interaction. In the field of neuroscience, the device allows free monitoring of brain activity during dynamic activities, providing researchers with information on cognitive processes. In clinical settings, continuous monitoring facilitates the assessment of neurological functions during treatment. Psychologists and researchers utilize the device to record the brain's response to various psychological situations. In addition, the device serves as a useful tool for evaluating mental state and performance in training and challenging scenarios. In human-computer interaction applications, it finds integration in augmented and virtual reality environments, allowing precise control based on motor activities.

The proposed improvements focus on optimizing the stability, portability, and accuracy of the measurements by incorporating Flex PCBs, adjusting sensor-LED spacings, and improving sensor configurations. These improvements are aimed at providing more detailed and accurate data, further promoting the reliability and completeness of brain activity measurements.

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένεια μου και τους καθηγητές μου οι οποίοι με βοήθησαν και στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια του ακαδημαϊκού μου ταξιδιού. Είμαι ευγνώμων για την καθοδήγηση και την υποστήριξη του καθηγητή μου Δελημαρά Βασίλειο, η οποία ήταν ανεκτίμητη στη διαμόρφωση της εκπαιδευτικής μου εμπειρίας και στην προετοιμασία μου για αυτή την εργασία. Είμαι υπερήφανος που υπήρξα μέλος αυτού του ιδρύματος και ανυπομονώ να χρησιμοποιήσω τις γνώσεις και τις δεξιότητες που απέκτησα για να έχω θετικό αντίκτυπο στον κόσμο.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Εικόνων.....	x
Κατάλογος Πινάκων	xi
Συνομογραφίες.....	xii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1 Ιστορικό	1
1.2 Στόχοι	1
1.3 Δομή της εργασίας.....	1
Κεφάλαιο 2ο: Η φυσιολογία του εγκεφάλου.....	2
2.1 Η φυσιολογική δραστηριότητα του εγκεφάλου	2
2.1.1 Κύρια μέρη του εγκεφάλου και οι λειτουργίες τους.....	2
2.2 Νευρώνες και νευρωνικά δίκτυα.....	5
2.3 Νευροδιαβιβαστές και ορμόνες.....	6
2.4 Ανάπτυξη του εγκεφάλου	7
2.5 Πλαστικότητα και προσαρμοστικότητα.....	8
2.6 Εγκέφαλος και συμπεριφορά	9
2.7 Μη φυσιολογική λειτουργία του εγκεφάλου.....	10
2.8 Δυναμική οξυγόνωση: Η αντίδραση του εγκεφάλου στην κίνηση του κυκλοφορικού συστήματος.....	11
2.9 Επίλογος.....	12
Κεφάλαιο 3ο: Λειτουργική Φασματοσκοπία Εγγύς Υπέρυθρου (fNIRS)	14
3.1 Ορισμός	14
3.2 fNIRS αντί MRI	17
3.2.1 Η μαγνητική τομογραφία (MRI).....	17
3.2.2 fNIRS αντί fMRI	19
3.3 Επίλογος.....	22
Κεφάλαιο 4ο: Νευρωνικά δίκτυα	24
4.1 Ορισμός	24

4.2	Σημαντικότητα	26
4.3	Επίλογος.....	27
Κεφάλαιο 5ο:.....		28
5.1	Βασικά χαρακτηριστικά ενός σήματος fNIRS	28
5.1.1	Cardiac wave	31
5.1.2	Respiratory wave	31
5.1.3	Mayer wave	32
5.1.4	Επίδραση των κινήσεων του οφθαλμού	33
5.1.5	Επίδραση του θορύβου.....	34
Κεφάλαιο 6ο: Κατασκευή		38
6.1	Περιγραφή λειτουργίας.....	38
6.2	Εξέλιξη της κατασκευής	38
6.2.1	Altium Designer.....	38
6.2.2	Επιλογή υλικών.....	41
6.2.3	Σχεδιασμός σχηματικού	48
6.2.4	Επιλογή και σχεδιασμός πλακέτας PCB	53
6.3	Κόστος παραγωγής.....	57
6.3.1	Κατασκευή κυκλώματος	58
6.4	Περιγραφή κώδικα	59
6.4.1	Κώδικας για το esp32.....	60
6.4.2	Κώδικας και παραμετροποίηση του νευρωνικού δικτύου.....	64
6.5	Λήψη δεδομένων.....	67
Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης		72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		73

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Κύρια μέρη του εγκεφάλου	3
Εικόνα 2 Τυπικός βιολογικός νευρώνας με τα μέρη από τα οποία αποτελείται.....	9
Εικόνα 3 Μη φυσιολογική λειτουργία του εγκεφάλου	11
Εικόνα 4 fNIRS	17
Εικόνα 5 Η μαγνητική τομογραφία (MRI).....	19
Εικόνα 6 Παράδειγμα ταυτόχρονης απεικόνισης fMRI και fNIRS κατά τη διάρκεια ενός πειράματος πατήματος του αριστερού και του δεξιού δακτύλου. Αριστερά>Δεξιά (μπλε) και Δεξιά>Αριστερά (κόκκινο)	20
Εικόνα 7 fMRI.....	21
Εικόνα 8 Στατιστικά αποτελέσματα της ΟΤ (επάνω σειρά) και της μαγνητικής τομογραφίας (κάτω σειρά) με χρήση δεξιών και αριστερών δακτύλων. Επισημαίνεται ότι η υψηλή ενεργοποίηση κωδικοποιείται με μπλε χρώμα (αρνητικές τιμές t) στους χάρτες ΟΤ. Τα αποτελέσματα της.....	22
Εικόνα 9 Απλό νευρωνικό δίκτυο Investopedia (2020) [63].....	25
Εικόνα 10 Ένα παράδειγμα του φιλτραρισμένου σήματος O ₂ Hb, των αντίστοιχων περιπλανήσεων της βασικής γραμμής και του αναπνευστικού σήματος αναφοράς.....	32
Εικόνα 11 Ποσοτικοποίηση των παραμέτρων των κυμάτων Mayer: (α) κεντρική συχνότητα των συνιστωσών ταλάντωσης, (β) εύρος ζώνης ταλάντωσης και (γ) ισχύς της συνιστώσας ταλάντωσης. Σημειώνεται ότι η ισχύς των κυμάτων Mayer δεν είναι κανονικά κατανομημένη, με ορισμένο	33
Εικόνα 12 Χρονοδιάγραμμα μεταβολής της διαμέτρου της κόρης κατά τη διάρκεια της MRT. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει την έναρξη της εργασίας (ερεθίσματα), η οποία είχε τρεις διαφορετικές φιγούρες προς περιστροφή ανά μπλοκ, αποδίδοντας 30 δευτερόλεπτα ερεθισμάτων ($p = 0,0006$) και 10 δευτερόλεπτα βασικής γραμμής. Η συμπαγής γραμμή υποδεικνύει τον μέσο όρο (μ) και η διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύει ± 1 τυπικό σφάλμα (σ).	34
Εικόνα 13: Στην εικόνα παρουσιάζεται μια ανακατασκευασμένη HbO με την προσέγγιση ICA στην οποία χρησιμοποιούνται τα δεδομένα 40 καναλιών μακράς διαίρεσης. Όπως φαίνεται στο β , οι συχνότητες θορύβου 0,07 και 0,11 Hz δεν εξαλείφθηκαν.	35
Εικόνα 14 Σύγκριση μεθόδων διόρθωσης στατιστικών μοντέλων. Η προσομοιωμένη δραστηριότητα προστέθηκε στα πειραματικά δεδομένα fNIRS σε κατάσταση ηρεμίας και αναλύθηκε με τη χρήση διαφόρων μοντέλων. (α) Μια καμπύλη ευαισθησίας-ειδικότητας (καμπύλη χειριστή δέκτη) για τη σύγκριση αυτών των μεθόδων. Τα μοντέλα με καλύτερη απόδοση βρίσκονται πιο κοντά στην άνω αριστερή γωνία του διαγράμματος. (β) Ο έλεγχος των σφαλμάτων τύπου I (ποσοστά ψευδούς ανακάλυψης) για τις διάφορες μεθόδους. Αυτό το διάγραμμα δείχνει το πραγματικό ποσοστό ψευδούς ανακάλυψης (άξονας y) σε σχέση με την αναφερόμενη τιμή p-value που λαμβάνεται από τη μέθοδο (άξονας x). Οι αποκλίσεις από την ευθεία με κλίση της μονάδας δείχνουν την τάση υπερεκτίμησης της σημαντικότητας των αποτελεσμάτων και των μη ελεγχόμενων ψευδών ανακαλύψεων από τη μέθοδο αγοράς.	37
Εικόνα 15 είσοδος στο Altium designer	39
Εικόνα 16 Σχεδίαση ηλεκτρονικού στοιχείου	39
Εικόνα 17 Η μετατροπή των ηλεκτρονικών σχημάτων σε PCB	40
Εικόνα 18 Δημιουργία PCB	40
Εικόνα 19 Διαχείριση Δεδομένων	41
Εικόνα 20 SML-H15RTT86.....	42
Εικόνα 21 datasheet του SML-H15RTT86.	42
Εικόνα 22 MAX6966AEE+,782-VBPW34S. OPA2380AIDGKR.	43

Εικόνα 23 κύκλωμα φωτοδιόδου και OPA380 στο OrCAD Capture.....	44
Εικόνα 24 ESP32-DevKitC V4. Πηγή: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html	46
Εικόνα 25 Η αρχιτεκτονική του ESP32. Πηγή: http://www.exploreembedded.com/wiki/Overview_of_ESP32_features._What_do_they_practically_mean%3F	47
Εικόνα 26 Σχηματικό της τροφοδοσίας του κυκλώματος.....	49
Εικόνα 27 (α) Σχηματικό ams1117-5.0.....	49
Εικόνα 28 (β) Σχηματικό ams1117-3.3.....	50
Εικόνα 29 Σχηματικό υλοποίησης του ADR130.	50
Εικόνα 30 Σχηματικό υλοποίησης του TIA OPA2380, με φωτοδιόδους VBPW34S.....	51
Εικόνα 31 Σχηματικό υλοποίησης MAX6966AEE+ με τα IR LED 850nm.	52
Εικόνα 32 Σχηματικό σύνδεσης ESP32 με το υπόλοιπο κύκλωμα.....	53
Εικόνα 33 Ολοκληρωμένο κύκλωμα στο σχηματικό.....	53
Εικόνα 34(α) Μέγεθος μήκους της πλακέτας PCB.....	54
Εικόνα 35 (β) Μέγεθος ύψους της πλακέτας PCB	55
Εικόνα 36 Design Rules πλακέτας PCB.	55
Εικόνα 37 πυθαγόρειο θεώρημα με φωτοδιόδους και LED.....	56
Εικόνα 38 Ολοκληρωμένη πλακέτα fNIRS	57
Εικόνα 39 Πλακέτα flex PCB.....	58
Εικόνα 40 Σημείο υλοποίησης των τροφοδοσιών και του πρώτου TIA, στην πλακέτα.	58
Εικόνα 41 Ολοκληρωμένες κολλήσεις σε μερικές βαθμίδες της πλακέτας.	59
Εικόνα 42 (α) Ολοκληρωμένη συσκευή εμπρόςθια όψη.....	59
Εικόνα 43 (β) Ολοκληρωμένη συσκευή πίσω όψη.....	59
Εικόνα 44 πίνακας σύγχυσης για τα δεδομένα εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου	67
Εικόνα 45 πίνακας σύγχυσης για τα δεδομένα ελέγχου του νευρωνικού δικτύου	67
Πίνακας 2 Αντιστοίχιση καναλιών σε αισθητήρα από δεξιάς προ τα αριστερά κατά την χρήση της συσκευής	
Εικόνα 46 Σήματα κατά την ηρεμία.Εικόνα 47 Σήματα κατά την κίνηση του δεξιού χεριού.	68
Εικόνα 48 Σύνθεση σημάτων από τα σήματα που απαρτίζεται ο fNIRS.....	69
Εικόνα 49 Σωματικοί χάρτες στον πρωτογενή κινητικό φλοιό και στον σωματοαισθητικό φλοιό του εγκεφάλου Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης. Πηγή: Pearson Education Inc. Biology Manual, "Pearson, Anatomy and Physiology"	71

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Κόστος υλικών.....	57
------------------------------	----

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
fMRI	Λειτουργική μαγνητική τομογραφία
fNIRS	Λειτουργική φασματοσκοπία εγγύς υπερύθρου
LSTM	Μακροπρόθεσμη βραχυπρόθεσμη μνήμη
MRI	Μαγνητική τομογραφία
PCB	Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

Η έρευνα του εγκεφάλου αποτελεί εδώ και πολύ καιρό ένα συναρπαστικό και εξελισσόμενο πεδίο, το οποίο εμβαθύνει στις περίπλοκες λειτουργίες του ανθρώπινου νου. Η προσπάθεια κατανόησης και καταγραφής της εγκεφαλικής δραστηριότητας οδήγησε στην ανάπτυξη διαφόρων τεχνολογιών, καθεμία από τις οποίες συμβάλλει στη βαθύτερη κατανόηση των νευρολογικών διεργασιών. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας συσκευής που αποσκοπεί στην καταγραφή της εγκεφαλικής δραστηριότητας, αξιοποιώντας τις δυνατότητες της λειτουργικής φασματοσκοπίας εγγύς υπερύθρου (fNIRS).

1.1 Ιστορικό

Οι εξελίξεις στη νευροεπιστήμη έχουν ωθήσει την ανάγκη για εξελιγμένα εργαλεία για τη διερεύνηση των μυστηρίων του εγκεφάλου. Η λειτουργική φασματοσκοπία εγγύς υπερύθρου (fNIRS) αναδεικνύεται ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνική, προσφέροντας ένα μη επεμβατικό μέσο για τη μέτρηση και την καταγραφή της εγκεφαλικής δραστηριότητας. Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα κίνητρα πίσω από την ανάπτυξη της συσκευής καταγραφής της εγκεφαλικής δραστηριότητας που βασίζεται στο fNIRS και σκιαγραφεί τα επόμενα κεφάλαια.

1.2 Στόχοι

Ο πρωταρχικός στόχος του παρόντος έργου είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μιας συσκευής ικανής να καταγράφει την εγκεφαλική δραστηριότητα με χρήση της τεχνολογίας fNIRS. Με την επίτευξη αυτού του στόχου, η έρευνα στοχεύει να συμβάλει στην ευρύτερη κατανόηση της φυσιολογίας και της λειτουργίας του εγκεφάλου, ανοίγοντας δρόμους για εφαρμογές στην ιατρική διάγνωση, την έρευνα στις νευροεπιστήμες και την αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή.

1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία είναι δομημένη έτσι ώστε να παρέχει μια επισκόπηση του έργου. Μετά από αυτή την εισαγωγή, το Κεφάλαιο 2 εμβαθύνει στη φυσιολογία του εγκεφάλου, παρέχοντας μια κατανόηση των κύριων τμημάτων του εγκεφάλου, των νευρώνων, των νευροδιαβιβαστών και άλλων βασικών πτυχών. Το Κεφάλαιο 3 διερευνά τη λειτουργική φασματοσκοπία εγγύς υπερύθρου (fNIRS) ως την επιλεγμένη τεχνολογία για την καταγραφή της εγκεφαλικής δραστηριότητας, προσφέροντας πληροφορίες σχετικά με τον ορισμό της και τα πλεονεκτήματά της έναντι παραδοσιακών μεθόδων όπως η μαγνητική τομογραφία (MRI).

Το Κεφάλαιο 4 διερευνά τον ρόλο των νευρωνικών δικτύων στην κατανόηση της λειτουργίας του εγκεφάλου, τονίζοντας τη σημασία τους στην επεξεργασία σύνθετων δεδομένων και στη λήψη ευφώνων αποφάσεων. Τα επόμενα κεφάλαια επικεντρώνονται στην κατασκευή της συσκευής καταγραφής της εγκεφαλικής δραστηριότητας, καλύπτοντας την περιγραφή της λειτουργίας της, την εξέλιξη της κατασκευής, το κόστος παραγωγής και την υλοποίηση του κώδικα.

Στο κεφάλαιο 6, η εργασία ολοκληρώνεται με έναν προβληματισμό σχετικά με τα επιτευχθέντα αποτελέσματα, παρέχοντας προτάσεις βελτίωσης και πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις για την έρευνα στον τομέα της καταγραφής της εγκεφαλικής δραστηριότητας.

Κεφάλαιο 2ο: Η φυσιολογία του εγκεφάλου

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος είναι ίσως το πιο πολύπλοκο από όλα τα βιολογικά συστήματα, με τον ώριμο εγκέφαλο να αποτελείται από περισσότερα από 100 δισεκατομμύρια κύτταρα επεξεργασίας πληροφοριών που ονομάζονται νευρώνες. Ο εγκέφαλος είναι ένα όργανο αποτελούμενο από νευρικό ιστό που διοικεί τις αντιδράσεις που προκαλούνται από την εργασία, την κίνηση, τις αισθήσεις, τα συναισθήματα, τη γλώσσα, την επικοινωνία, τη σκέψη και τη μνήμη. Τα τρία κύρια μέρη του ανθρώπινου εγκεφάλου είναι ο εγκέφαλος, η παρεγκεφαλίδα και το εγκεφαλικό στέλεχος [1].

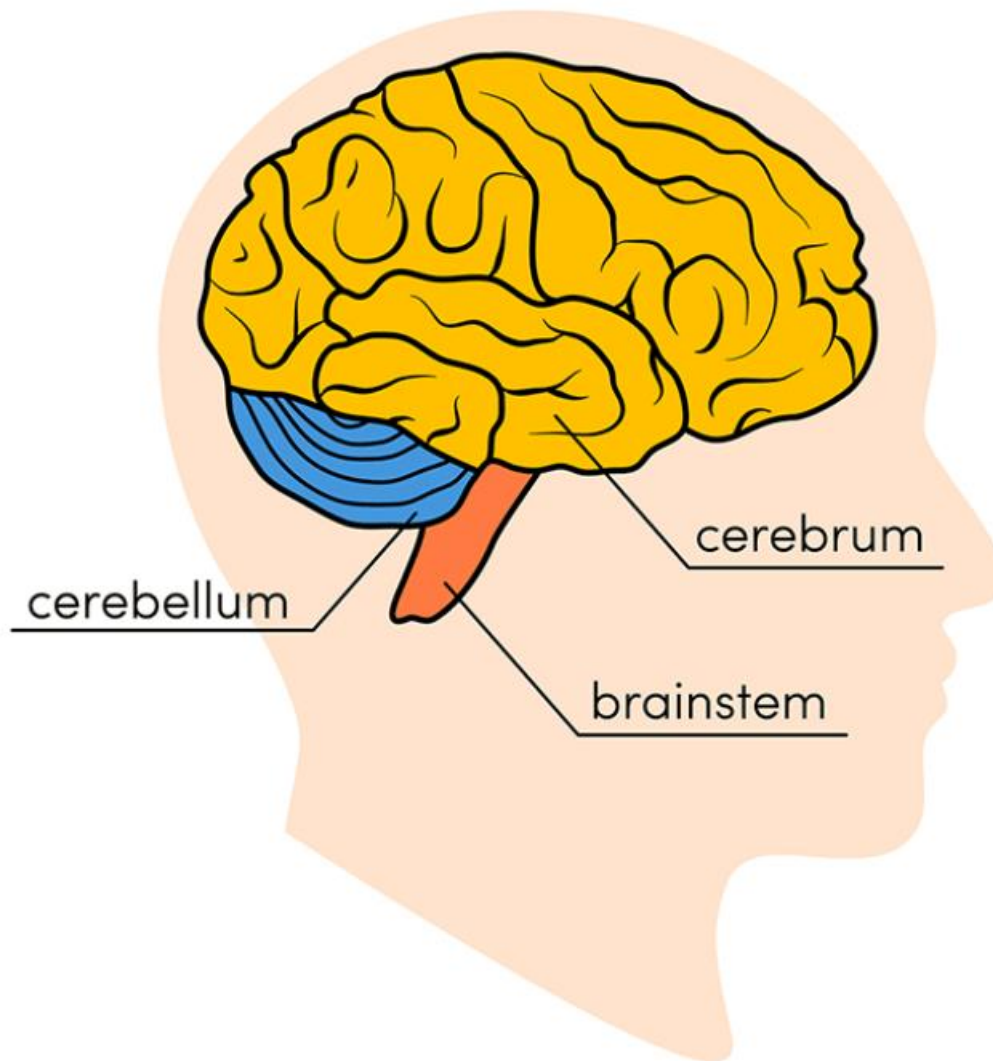
2.1 Η φυσιολογική δραστηριότητα του εγκεφάλου

Ο εγκέφαλος στέλνει και λαμβάνει χημικά και ηλεκτρικά σήματα σε όλο το σώμα. Διαφορετικά σήματα ελέγχουν διαφορετικές διεργασίες και ο εγκέφαλός σας ερμηνεύει το καθένα από αυτά. Ορισμένα κάνουν τον άνθρωπο να αισθάνεται κουρασμένος, για παράδειγμα, ενώ άλλα κάνουν τον άνθρωπο να αισθάνεται πόνο.

Ορισμένα μηνύματα διατηρούνται εντός του εγκεφάλου, ενώ άλλα μεταδίδονται μέσω της σπονδυλικής στήλης και μέσω του τεράστιου δικτύου νευρών του σώματος σε απομακρυσμένα άκρα. Για να γίνει αυτό, το κεντρικό νευρικό σύστημα βασίζεται σε δισεκατομμύρια νευρώνες (νευρικά κύτταρα) [2].

2.1.1 Κύρια μέρη του εγκεφάλου και οι λειτουργίες τους

Σε ένα υψηλό επίπεδο, ο εγκέφαλος μπορεί να χωριστεί στον εγκέφαλο, το εγκεφαλικό στέλεχος και την παρεγκεφαλίδα.



Εικόνα 1 Κύρια μέρη του εγκεφάλου

Εγκέφαλος:

Το εγκεφαλικό τμήμα (το μπροστινό μέρος του εγκεφάλου) αποτελείται από φαιά ουσία (τον εγκεφαλικό φλοιό) και λευκή ουσία στο κέντρο του. Το μεγαλύτερο τμήμα του εγκεφάλου ξεκινά και συντονίζει την κίνηση και ρυθμίζει τη θερμοκρασία. Άλλες περιοχές του εγκεφάλου καθιστούν δυνατή την ομιλία, την κρίση, τη σκέψη και τον συλλογισμό, την επίλυση προβλημάτων, τα συναισθήματα και τη μάθηση. Άλλες λειτουργίες αφορούν την όραση, την ακοή, την αφή και άλλες αισθήσεις [3].

Εγκεφαλικός φλοιός:

Ο φλοιός περιγράφει το εξωτερικό κάλυμμα της φαιάς ουσίας του εγκεφάλου. Ο φλοιός έχει μεγάλη επιφάνεια λόγω των πτυχών του και περιλαμβάνει περίπου το μισό βάρος του εγκεφάλου.

Ο εγκεφαλικός φλοιός χωρίζεται σε δύο μισά ή ημισφαίρια. Καλύπτεται από κορυφογραμμές (gyri) και πτυχές (sulci). Τα δύο μισά ενώνονται σε μια μεγάλη, βαθιά αύλακα (τη διαημισφαιρική σχισμή, ή αλλιώς τη μέση επιμήκη σχισμή) που εκτείνεται από το μπροστινό μέρος του κεφαλιού προς το πίσω μέρος. Το δεξιό ημισφαίριο ελέγχει την αριστερή πλευρά του σώματος και το αριστερό μισό ελέγχει τη δεξιά πλευρά του σώματος. Τα δύο μισά επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω μιας μεγάλης, σε σχήμα Γ,

Κεφάλαιο 2

δομής λευκής ουσίας και νευρικών οδών που ονομάζεται corpus callosum. Το corpus callosum βρίσκεται στο κέντρο του εγκεφάλου [4].

Εγκεφαλικό στέλεχος:

Το εγκεφαλικό στέλεχος (μέσο του εγκεφάλου) συνδέει το εγκεφαλικό με τον νωτιαίο μυελό. Το στέλεχος του εγκεφάλου περιλαμβάνει τον μέσο εγκέφαλο, τον πυρήνα του εγκεφάλου και τον μυελό.

Μεσαίος εγκέφαλος. Ο μέσος εγκέφαλος (ή μεσεγκέφαλος) είναι μια πολύ σύνθετη δομή με μια σειρά από διαφορετικές ομάδες νευρώνων (πυρήνες και κολποειδή), νευρικές οδούς και άλλες δομές. Αυτά τα χαρακτηριστικά διευκολύνουν διάφορες λειτουργίες, από την ακοή και την κίνηση μέχρι τον υπολογισμό των αντιδράσεων και των περιβαλλοντικών αλλαγών. Ο μέσος εγκέφαλος περιέχει επίσης την substantia nigra, μια περιοχή που προσβάλλεται από τη νόσο του Πάρκινσον, η οποία είναι πλούσια σε νευρώνες ντοπαμίνης και μέρος των βασικών γαγγλίων, τα οποία επιτρέπουν την κίνηση και τον συντονισμό [3].

Pons:

Από το pons ξεκινούν τέσσερα από τα 12 κρανιακά νεύρα, τα οποία επιτρέπουν μια σειρά από δραστηριότητες όπως η παραγωγή δακρύων, η μάσηση, το ανοιγοκλείσιμο των ματιών, η εστίαση της όρασης, η ισορροπία, η ακοή και η έκφραση του προσώπου. Ονομάστηκε έτσι από τη λατινική λέξη που σημαίνει "γέφυρα" και αποτελεί τη σύνδεση μεταξύ του μέσου εγκεφάλου και του μυελού [2].

Μυελός:

Στο κάτω μέρος του εγκεφαλικού στελέχους, ο μυελός είναι το σημείο όπου ο εγκέφαλος συναντά τον νωτιαίο μυελό. Ο μυελός είναι απαραίτητος για την επιβίωση. Οι λειτουργίες του μυελού ρυθμίζουν πολλές σωματικές δραστηριότητες, όπως ο καρδιακός ρυθμός, η αναπνοή, η ροή του αίματος και τα επίπεδα οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα. Ο μυελός παράγει αντανακλαστικές δραστηριότητες όπως το φτέρνισμα, ο εμετός, ο βήχας και η κατάποση.

Ο νωτιαίος μυελός εκτείνεται από το κάτω μέρος του μυελού και μέσω ενός μεγάλου ανοίγματος στο κάτω μέρος του κρανίου. Υποστηριζόμενος από τους σπονδύλους, ο νωτιαίος μυελός μεταφέρει μηνύματα από και προς τον εγκέφαλο και το υπόλοιπο σώμα [1].

Παρεγκεφαλίδα:

Η παρεγκεφαλίδα ("μικρός εγκέφαλος") είναι ένα τμήμα του εγκεφάλου σε μέγεθος γροθιάς που βρίσκεται στο πίσω μέρος του κεφαλιού, κάτω από τον κροταφικό και τον ινιακό λοβό και πάνω από το στέλεχος του εγκεφάλου. Όπως και ο εγκεφαλικός φλοιός, έχει δύο ημισφαίρια. Το εξωτερικό τμήμα περιέχει νευρώνες και η εσωτερική περιοχή επικοινωνεί με τον εγκεφαλικό φλοιό. Η λειτουργία του είναι να συντονίζει τις εκούσιες μυϊκές κινήσεις και να διατηρεί τη στάση του σώματος, την ισορροπία και την ισορροπία. Νέες μελέτες διερευνούν τους ρόλους της παρεγκεφαλίδας στη σκέψη, τα συναισθήματα και την κοινωνική συμπεριφορά, καθώς και την πιθανή συμμετοχή της στον εθισμό, τον αυτισμό και τη σχιζοφρένεια [4].

Καλύμματα εγκεφάλου- Μήνιγγες:

Τρία στρώματα προστατευτικού καλύμματος που ονομάζονται μήνιγγες περιβάλλουν τον εγκέφαλο και τον νωτιαίο μυελό.

Το εξωτερικό στρώμα, η σκληρή μήνιγγα, είναι παχύ και σκληρό. Περιλαμβάνει δύο στρώματα: Το περιεδρικό στρώμα της σκληράς μήνιγγας επενδύει τον εσωτερικό θόλο του κρανίου και το στρώμα

των μηνίγγων βρίσκεται κάτω από αυτό. Οι χώροι μεταξύ των στρωμάτων επιτρέπουν τη διέλευση των φλεβών και των αρτηριών που τροφοδοτούν τη ροή του αίματος στον εγκέφαλο.

Η αραχνοειδής μήνιγγα είναι ένα λεπτό, δικτυωτό στρώμα συνδετικού ιστού που δεν περιέχει νεύρα ή αιμοφόρα αγγεία. Κάτω από την αραχνοειδή ουσία βρίσκεται το εγκεφαλονωτιαίο υγρό ή ENY. Αυτό το υγρό μαλακώνει ολόκληρο το κεντρικό νευρικό σύστημα (εγκέφαλος και νωτιαίος μυελός) και κυκλοφορεί συνεχώς γύρω από αυτές τις δομές για να απομακρύνει τις ακαθαρσίες.

Η Pia mater είναι μια λεπτή μεμβράνη που αγκαλιάζει την επιφάνεια του εγκεφάλου και ακολουθεί το περίγραμμά του. Η pia mater είναι πλούσια σε φλέβες και αρτηρίες [5].

2.2 Νευρώνες και νευρωνικά δίκτυα

Η κατανόηση των εγκεφαλικών λειτουργιών αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της σύγχρονης επιστήμης [6]. Ωστόσο, η διερεύνηση των εγκεφαλικών λειτουργιών παρουσιάζει ειδικά προβλήματα που δεν είναι κοινά σε άλλα ερευνητικά πεδία. Αφενός, ο εγκέφαλος αξιοποιεί μοριακούς και κυτταρικούς μηχανισμούς, οι οποίοι δεν διαφέρουν κατ' αρχήν από εκείνους άλλων κυττάρων και ιστών. Από την άλλη πλευρά, ο εγκέφαλος αποτελείται από δίκτυα που συνδέουν 10 12 νευρώνες μέσω 10 15 συνάψεων, ικανά να παράγουν αισθητικοκινητικές λειτουργίες, νόηση, συναίσθημα και, τελικά, συμπεριφορά και συνείδηση. Ποια είναι λοιπόν η σύνδεση μεταξύ του ψυχικού και του βιολογικού επιπέδου; Πειραματικά στοιχεία από τη φυσιολογία και τη νευρολογία έχουν διδάξει ότι η απάντηση πρέπει να αναζητηθεί μέσω των κυτταρικών αρχών της κωδικοποίησης σημάτων, της επικοινωνίας και της πλαστικότητας. Ενώ η έρευνα σε συγκεκριμένους επιμέρους τομείς συμβάλλει στην αποσαφήνιση αυτών των μηχανισμών, μια ακόμη πιο σύνθετη πρόκληση είναι αυτή της αποσαφήνισης των λεπτομερειών της νευρωνικής συνδεσιμότητας και δυναμικής και των επιπτώσεών τους στη λειτουργία του εγκεφάλου [7].

Η εγκεφαλική δραστηριότητα βασίζεται σε μια σειρά αρχών, οι οποίες έχουν αποσαφηνιστεί σε μεγάλο βαθμό τους τελευταίους δύο αιώνες. Τα κυτταρικά στοιχεία του εγκεφάλου, οι νευρώνες, αλληλεπιδρούν στο επίπεδο των συνάψεων και σχηματίζουν νευρωνικά μικροκυκλώματα που αποτελούνται από χιλιάδες έως εκατομμύρια στοιχεία. Αυτά τα μικροκυκλώματα οργανώνονται στη συνέχεια σε μεγάλης κλίμακας σύνολα που σχηματίζουν όλο και μεγαλύτερα δίκτυα και, τελικά, ολόκληρο τον εγκέφαλο [6].

Οι νευρώνες είναι διεγέρσιμα στοιχεία, τα οποία μπορούν να παράγουν μεταβολές δυναμικού κατά μήκος της πλασματικής τους μεμβράνης. Οι νευρώνες είναι πολωμένοι σε κατάσταση ηρεμίας, αλλά μπορούν να αποπολωθούν από συναπτικά ρεύματα και να δημιουργήσουν δυναμικά δράσης όταν επιτευχθεί ένα ορισμένο όριο. Ο πυρήνας της νευρωνικής λειτουργίας βρίσκεται στην πλασματική μεμβράνη, στην οποία είναι ενσωματωμένα διάφορα είδη μορίων, συμπεριλαμβανομένων των διαύλων ιόντων και των αντλιών. Σχηματικά, οι αντλίες δημιουργούν ενεργά ηλεκτροχημικές κλίσεις για τα κύρια ιόντα (Na^+ , K^+ , Cl^- , Ca^{2+}) μέσω της υδρόλυσης ATP και της κατανάλωσης ενέργειας. Το ισοζύγιο αυτών των κλίσεων καθορίζει ένα ηλεκτρικό δυναμικό κατά μήκος της πλασματικής μεμβράνης (που προσεγγίζεται από την εξίσωση Goldman-Hodgkin-Katz). Το άνοιγμα ιοντικών διαύλων επιλεκτικών για συγκεκριμένα ιόντα επιτρέπει τη ροή ρεύματος κατά μήκος των ηλεκτροχημικών κλίσεων, τροποποιώντας έτσι το δυναμικό της μεμβράνης. Το γεγονός ότι υπάρχουν πολλαπλές μοριακές παραλλαγές των διαύλων ιόντων επιτρέπει τη λεπτή ρύθμιση των ιοντικών ροών και του δυναμικού της μεμβράνης. Η διαδικασία της πύλης των ιοντικών διαύλων είναι πολύπλοκη και συνήθως εξαρτάται από την ευαισθησία στην τάση της μεμβράνης και σε χημικούς ρυθμιστές, όπως οι νευροδιαβιβαστές, τα ιόντα ασβεστίου, τα κυκλικά νουκλεοτίδια και οι G-πρωτεΐνες [7].

Οι νευρώνες μπορούν να οργανώνουν αιχμές σε συγκεκριμένα μοτίβα και να τα χρησιμοποιούν για να κωδικοποιούν πληροφορίες και να τις μεταδίδουν κατά μήκος των αξόνων σε άλλους νευρώνες [8]. Στις συνάψεις, οι νευροδιαβιβαστές απελευθερώνονται μέσω ενός μηχανισμού σύντηξης κυστιδίων ενεργοποιώντας υποδοχείς στη μεμβράνη των νευρώνων υποδοχής. Διαφορετικοί νευροδιαβιβαστές και υποδοχείς μπορούν να δημιουργήσουν μια μεγάλη ποικιλία ηλεκτρικών και μεταβολικών επιδράσεων στους μετασυναπτικούς νευρώνες. Οι μηχανισμοί που ρυθμίζουν την απελευθέρωση των νευροδιαβιβαστών και την ενεργοποίηση των υποδοχέων δημιουργούν φαινόμενα βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης πλαστικότητας, ελέγχοντας τη χρονική δυναμική της μετάδοσης σημάτων και παρέχοντας κυτταρικούς μηχανισμούς για τη μάθηση και τη μνήμη.

2.3 Νευροδιαβιβαστές και ορμόνες

Κάθε δευτερόλεπτο που περνάει είναι μάρτυρας περίπλοκων διεργασιών μέσα στο ανθρώπινο σώμα, με την κυτταρική επικοινωνία να αλλάζει τις εμπειρίες της ζωής αμέτρητες φορές. Αυτές οι διαδικασίες περιλαμβάνουν μικροσκοπικές αλλαγές που καθοδηγούνται από χημικούς αγγελιοφόρους γνωστούς ως νευροδιαβιβαστές, νευροδιαμορφωτές και ορμόνες. Αυτοί οι αγγελιοφόροι που βασίζονται σε πρωτεΐνες επηρεάζουν δυναμικά διάφορες πτυχές της ανθρώπινης λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένης της διάθεσης, της μνήμης, της μάθησης, της νόησης και των συνολικών λειτουργιών του σώματος. Παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση και τροποποίηση των εσωτερικών αναπαραστάσεων του εαυτού και των άλλων, επηρεάζοντας τη μακροπρόθεσμη υγεία και την προσωπικότητα [9].

Οι επιδράσεις των νευροδιαβιβαστών, των νευροδιαμορφωτών και των ορμονών εμβαθύνουν την εκτίμηση των περιπλοκών τόσο του εαυτού μας όσο και των άλλων. Παρά τις χημικές ομοιότητές τους, η σημασία έγκειται στον τρόπο με τον οποίο αυτοί οι αγγελιοφόροι φτάνουν στους στόχους τους και στη βαθιά επίδραση που έχουν στις φυσιολογικές και ψυχολογικές διεργασίες. Οι νευροδιαβιβαστές, για παράδειγμα, είτε διεγείρουν είτε αναστέλλουν τους νευρώνες, σχηματίζοντας νευρωνικά δίκτυα που ρυθμίζουν διεργασίες του νου και του σώματος, όπως η κίνηση των μυών ή οι παρορμητικές ενέργειες. Η επικοινωνία εντός αυτών των δικτύων περιλαμβάνει τη μετάδοση πληροφοριών από προσυναπτικούς σε μετασυναπτικούς νευρώνες, με κάθε κύτταρο του δικτύου να διαθέτει υποδοχείς για συγκεκριμένα μόρια νευροδιαβιβαστών [9].

Σε αντίθεση με τους νευροδιαβιβαστές, οι ορμόνες ταξιδεύουν πιο αργά μέσω των συστημάτων του σώματος που βασίζονται σε υγρά, επηρεάζοντας τους υποδοχείς σε όλο το σώμα. Οι ορμόνες, που παράγονται από αδένες, διευκολύνουν την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών αδένων, οργάνων, ιστών, κυττάρων και νευρωνικών δικτύων. Με μεγαλύτερο χρόνο κυκλοφορίας και την ικανότητα να επηρεάζουν τους υποδοχείς σε όλο το σώμα, η εξισορρόπηση των ορμονικών επιδράσεων γίνεται πιο σύνθετη υπόθεση. Οι γυναίκες, ειδικότερα, βιώνουν τις περίπλοκες επιπτώσεις των ορμονών και του στρες λόγω της φυσιολογίας τους [10].

Τα ορμονικά συστήματα λειτουργούν με βρόχους ανατροφοδότησης, σηματοδοτώντας πότε πρέπει να σταματήσουν να παράγουν ορμόνες. Για παράδειγμα, η αντίδραση του ενδοκρινικού συστήματος στο στρες περιλαμβάνει έναν βρόχο ανατροφοδότησης που ξεκινά από τον υποθάλαμο που εκκρίνει την ορμόνη απελευθέρωσης κορτικοτροπίνης (CRH). Η απελευθέρωση κορτιζόλης από τα επινεφρίδια ολοκληρώνει τον βρόχο, βοηθώντας την προετοιμασία του οργανισμού για το στρες. Αν και πιο αργό από το νευρικό σύστημα, το ενδοκρινικό σύστημα είναι ενεργειακά αποδοτικό και ικανό για ευρεία επιρροή.

Οι νευροτροποποιητές, που δρουν ως γέφυρα μεταξύ των νευροδιαβιβαστών και των ορμονών, επηρεάζουν τη μεταφορά μηνυμάτων σε περιοχές του εγκεφάλου επηρεάζοντας πολλαπλές συνάψεις

και τα περιβάλλοντα κύτταρα. Μπορούν είτε να εξασθενήσουν είτε να ενισχύσουν τα νευρικά σήματα, περιλαμβάνοντας μια σειρά νευροδραστικών ουσιών από νευροπεπτίδια έως στεροειδή. Ορισμένοι νευροδιαμορφωτές, όπως η ωκυτοκίνη, λειτουργούν τόσο ως νευροδιαβιβαστές όσο και ως ορμόνες, επηρεάζοντας τον δεσμό σύνδεσης, μειώνοντας τις αντιδράσεις στρες και βελτιώνοντας τη νευρική ανάπτυξη [10 - 11- 12].

Συνοπτικά, οι φυσιολογικές διεργασίες που αφορούν τους νευροδιαβιβαστές, τους νευροδιαμορφωτές και τις ορμόνες υπογραμμίζουν την πολυπλοκότητα της ανθρώπινης λειτουργίας, επηρεάζοντας τόσο τις σωματικές όσο και τις ψυχικές πτυχές της ζωής. Η περίπλοκη αλληλεπίδραση αυτών των χημικών αγγελιοφόρων διαμορφώνει τις εμπειρίες των ατόμων και αναδεικνύει τη διασύνδεση του νευρικού και του ενδοκρινικού συστήματος [13- 14].

2.4 Ανάπτυξη του εγκεφάλου

Σε γενικές γραμμές, η ανάπτυξη του εγκεφάλου αρχίζει λίγες εβδομάδες μετά τη σύλληψη και θεωρείται ότι ολοκληρώνεται στην πρώιμη ενήλικη ζωή. Η βασική δομή του εγκεφάλου δημιουργείται κυρίως κατά την προγεννητική περίοδο και την πρώιμη παιδική ηλικία, ενώ ο σχηματισμός και η τελειοποίηση των νευρωνικών δικτύων συνεχίζεται μακροπρόθεσμα. Οι πολλές λειτουργίες του εγκεφάλου δεν αναπτύσσονται ταυτόχρονα ούτε τα μοτίβα ανάπτυξής τους ακολουθούν το ίδιο χρονικό πλαίσιο. Παρόλο που τα βασικά συστήματα αίσθησης και αντίληψης είναι πλήρως ανεπτυγμένα μέχρι τη στιγμή που τα παιδιά φτάνουν στην ηλικία του νηπιαγωγείου, άλλα συστήματα, όπως αυτά που εμπλέκονται στη μνήμη, στη λήψη αποφάσεων και στο συναίσθημα, συνεχίζουν να αναπτύσσονται μέχρι και την παιδική ηλικία. Τα θεμέλια πολλών από αυτές τις ικανότητες, ωστόσο, κατασκευάζονται κατά τη διάρκεια των πρώτων ετών [15].

Οι αρχές της ανατομικής αλλαγής είναι απαραίτητες για την ωρίμανση και την ανάπτυξη του εγκεφάλου. Αυτές οι διαδικασίες είναι με τη σειρά τους υπεύθυνες για την ανάπτυξη ενός τεράστιου ρεπερτορίου συμπεριφορών που χαρακτηρίζει τα πρώτα χρόνια της ζωής. Όσον αφορά την κινητική ανάπτυξη, τόσο η συναπτική πλαστικότητα όσο και η μυελίνωση είναι υπεύθυνες για τη βελτίωση της ακρίβειας και της ταχύτητας της συντονισμένης κίνησης. Επιπλέον, είναι σημαντικές για την ανάπτυξη των γνωστικών δεξιοτήτων. Η βελτιωμένη αντίληψη των ήχων της ομιλίας και η αναγνώριση προσώπων, για παράδειγμα, είναι πιθανότατα το αποτέλεσμα της συναπτικής αναδιοργάνωσης, μιας διαδικασίας που εξαρτάται από την εμπειρία [16].

Παρόλο που η ανάπτυξη συνεχίζεται μέχρι τα πρώτα χρόνια της ενήλικης ζωής, η πρώιμη παιδική ηλικία αποτελεί μια περίοδο ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη ενός υγιούς εγκεφάλου. Τα θεμέλια των αισθητηριακών και αντιληπτικών συστημάτων που είναι κρίσιμα για τη γλώσσα, την κοινωνική συμπεριφορά και το συναίσθημα διαμορφώνονται στα πρώτα χρόνια και επηρεάζονται έντονα από τις εμπειρίες κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Αυτό δεν σημαίνει ότι η μεταγενέστερη ανάπτυξη δεν μπορεί να επηρεάσει αυτές τις συμπεριφορές - αντίθετα, οι εμπειρίες αργότερα στη ζωή είναι επίσης πολύ σημαντικές για τη λειτουργία του εγκεφάλου. Ωστόσο, οι εμπειρίες κατά τα πρώτα χρόνια της παιδικής ηλικίας επηρεάζουν την ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής του εγκεφάλου με τρόπο που οι μεταγενέστερες εμπειρίες δεν επηρεάζουν [17].

Ο εγκέφαλος των βρεφών είναι αρχικά συντονισμένος στους ήχους των διαφόρων γλωσσών, αλλά με την έκθεση εξειδικεύεται στη μητρική τους γλώσσα, αποτελώντας τη βάση για την εκμάθηση της γλώσσας. Αυτή η αντιληπτική προκατάληψη, που αναπτύσσεται μέσα στον πρώτο χρόνο, συσχετίζεται με τις μετέπειτα γλωσσικές δεξιότητες [18].

Κατά τη διάρκεια των πρώτων ετών, ο εγκέφαλος παρουσιάζει αυξημένη ευαισθησία στις εμπειρίες, οδηγώντας σε πλαστικότητα που υποστηρίζει τη μάθηση. Αυτή η ευαισθησία, όπως φαίνεται στα παραδείγματα επεξεργασίας της γλώσσας και του προσώπου, δεν περιορίζεται σε μια κρίσιμη περίοδο-συγκεκριμένες εμπειρίες μπορούν να παρατείνουν την ευαίσθητη περίοδο. Η πλαστικότητα είναι επίσης εμφανής στην οπτική οξύτητα, όπου οι πρώιμες εμπειρίες, ακόμη και μετά την αφαίρεση του καταρράκτη, επηρεάζουν τα αποτελέσματα [19].

Η εμπειρία όχι μόνο ρυθμίζει την πλαστικότητα αλλά και διαμορφώνει τη δομή του εγκεφάλου. Το πρόγραμμα πρώιμης παρέμβασης του Βουκουρεστίου (BEIP) καταδεικνύει ότι η ιδρυματοποίηση σε νεαρή ηλικία έχει βαθιές συνέπειες στην ανάπτυξη του εγκεφάλου και της συμπεριφοράς. Τα παιδιά που μεγαλώνουν σε ιδρύματα παρουσιάζουν καχεκτική ανάπτυξη, καθυστερημένη γνωστική ανάπτυξη και μεταβαλλόμενη εγκεφαλική δραστηριότητα. Η χρονική στιγμή της παρέμβασης είναι κρίσιμη, με την τοποθέτηση σε ανάδοχη οικογένεια πριν από την ηλικία των 2 ετών να παρουσιάζει πιο θετικά αποτελέσματα [20].

2.5 Πλαστικότητα και προσαρμοστικότητα

Η γνωστική ευελιξία είναι βαθιά ριζωμένη στις περίπλοκες λειτουργίες του εγκεφάλου. Η νευροπλαστικότητα, η ικανότητα του εγκεφάλου να αναδιοργανώνεται με τη δημιουργία νέων νευρωνικών συνδέσεων, παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη και την ενίσχυση της γνωστικής ευελιξίας. Με τη συνεχή επανασύνδεση και προσαρμογή, ο εγκέφαλος γίνεται πιο ευέλικτος και προσαρμόσιμος στην αντιμετώπιση πολύπλοκων καθηκόντων και στην εξεύρεση λύσεων. Η νευροπλαστικότητα είναι ένα εντυπωσιακό φαινόμενο που επιτρέπει στον εγκέφαλο να αναδιαμορφώνεται ως απάντηση στις εμπειρίες και τη μάθηση. Δεν είναι ένα στατικό και άκαμπτο όργανο, αλλά μάλλον μια δυναμική και προσαρμόσιμη δομή που μπορεί να υποστεί ανάπτυξη και αλλαγή καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του ανθρώπου. Αυτή η εξαιρετική ικανότητα του εγκεφάλου να επανασυνδέεται είναι που δίνει τη δυνατότητα στους ανθρώπους να αποκτούν νέες δεξιότητες, να αγκαλιάζουν νέα περιβάλλοντα και να ξεπερνούν τις προκλήσεις με νοοτροπία ανάπτυξης [21].

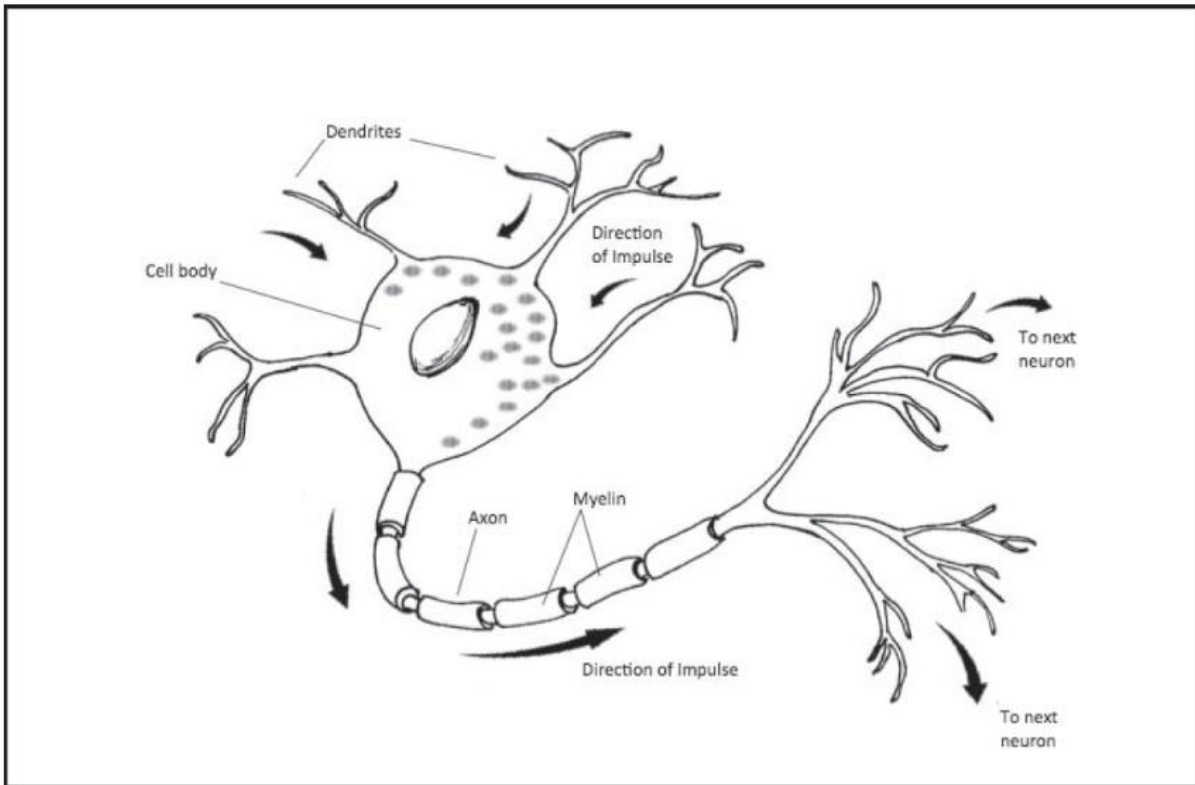
Η πλαστικότητα του εγκεφάλου επιτρέπει τη δημιουργία νέων οδών, διευκολύνοντας την αποτελεσματικότερη ροή πληροφοριών και τη συνδεσιμότητα μεταξύ διαφορετικών περιοχών. Αυτή η αυξημένη συνδεσιμότητα υποστηρίζει τη γνωστική ευελιξία, ενσωματώνοντας διαφορετικές προοπτικές και ενθαρρύνοντας τη διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων, απελευθερώνοντας τα άτομα από παγιωμένα μοτίβα σκέψης και προωθώντας την προσαρμοστική σκέψη [22].

Σύμφωνα με την αναλογία του εγκεφάλου ως ένα τεράστιο δίκτυο διασυνδεδεμένων δρόμων, καθένας από τους οποίους αντιπροσωπεύει μια νευρική οδό, ένας άκαμπτος εγκέφαλος διαθέτει στενούς και περιορισμένους δρόμους, περιορίζοντας τη ροή πληροφοριών. Αντίθετα, ένας εξαιρετικά πλαστικός εγκέφαλος παρουσιάζει ευρείς και καλά συνδεδεμένους δρόμους, επιτρέποντας την απρόσκοπτη ανταλλαγή ιδεών και πληροφοριών. Καθώς τα άτομα αντιμετωπίζουν νέες εμπειρίες και προκλήσεις, ο εγκέφαλος δημιουργεί νέες οδούς, που μοιάζουν με την κατασκευή δρόμων για τη σύνδεση προηγούμενων απομονωμένων περιοχών. Αυτή η διαδικασία όχι μόνο ενισχύει τις υπάρχουσες συνδέσεις αλλά δημιουργεί και νέες, διευρύνοντας τη γνωστική ευελιξία του εγκεφάλου και ανοίγοντας νέους δρόμους εξερεύνησης και δυνατοτήτων μέσα στο μυαλό [21].

Η νευροπλαστικότητα δεν περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη ηλικία ή στάδιο ζωής. Αν και είναι πιο έντονη κατά την παιδική ηλικία, η πλαστικότητα του εγκεφάλου συνεχίζεται καθ' όλη τη διάρκεια της ενήλικης ζωής. Αυτό σημαίνει ότι η γνωστική ευελιξία μπορεί να ενισχυθεί σε οποιαδήποτε ηλικία

μέσω της ενασχόλησης με δραστηριότητες που διεγείρουν τον εγκέφαλο, όπως η εκμάθηση νέων δεξιοτήτων, η επίλυση γρίφων ή η συμμετοχή σε δημιουργικές προσπάθειες [22].

Η υιοθέτηση της έννοιας της νευροπλαστικότητας και η αναγνώριση του ρόλου της στη γνωστική ευελιξία επιτρέπει την εκτίμηση της αξιοσημείωτης προσαρμοστικότητας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Υπογραμμίζει την ικανότητα του εγκεφάλου για ανάπτυξη και αλλαγή, παρέχοντας ατελείωτες ευκαιρίες για διεύρυνση της σκέψης, αμφισβήτηση των υποθέσεων και προσέγγιση των προβλημάτων από διαφορετικές οπτικές γωνίες [21].



Εικόνα 2 Τυπικός βιολογικός νευρώνας με τα μέρη από τα οποία αποτελείται

2.6 Εγκέφαλος και συμπεριφορά

Η σύνδεση μεταξύ του εγκεφάλου και της συμπεριφοράς αντανακλά μια απομάκρυνση από τον ιστορικό καρτεσιανό δυισμό νου-σώματος, όπου ο εγκέφαλος αποτελεί το φυσικό ή βιολογικό στοιχείο και η συμπεριφορά αντιπροσωπεύει τη νοητική ή ψυχολογική πτυχή. Παρά τη μακρόχρονη παρουσία της, η διχοτόμηση επιμένει ως άλυτο ζήτημα, διατηρώντας έναν εννοιολογικό διαχωρισμό. Αμφισβητώντας την έννοια της διακριτής νοητικής και φυσικής σφαίρας, η σύγχρονη κατανόηση αποκαλύπτει μια πιο περίπλοκη σχέση μεταξύ του νου και του σώματος, περιπλέκοντας την επιστημονική πρόοδο. Προκύπτει το θεμελιώδες ερώτημα: Είναι ο εγκέφαλος ο ενορχηστρωτής των πράξεών μας και ποιος είναι ο απώτερος σκοπός του; [23].

Αν και αναγνωρίζεται η συμμετοχή του εγκεφάλου σε εργασίες όπως η αντίληψη, η σκέψη, η λογική και η μάθηση, οι λειτουργίες αυτές εξυπηρετούν συλλογικά τον γενικότερο σκοπό της κατεύθυνσης της συμπεριφοράς. Οι αντιληπτικές διεργασίες, για παράδειγμα, ενημερώνουν τα άτομα για το περιβάλλον τους, προτρέποντας σε προσαρμοστικές συμπεριφορές. Η πρόκληση έγκειται στην καθιέρωση συγκεκριμένων συνδέσεων μεταξύ εγκεφαλικών συμβάντων και αντίστοιχων συμπεριφορών,

αναγνωρίζοντας την πολυπλοκότητα όπου πανομοιότυπες συμπεριφορές μπορεί να προκαλούνται από διαφορετικούς φυσιολογικούς μηχανισμούς.

Εξετάζοντας το ερώτημα κατά πόσον τα άτομα ορίζονται από τον εγκέφαλό τους, υποθετικά σενάρια που περιλαμβάνουν μεταμοσχεύσεις εγκεφάλου σε αξιοσημείωτες προσωπικότητες όπως ο Αϊνστάιν ή ο Μότσαρτ υπογραμμίζουν την περίπλοκη σχέση μεταξύ εγκεφάλου και συμπεριφοράς. Η υπόθεση ότι η κατοχή του εγκεφάλου μιας ιδιοφυΐας ισοδυναμεί με την αντιγραφή της συμπεριφοράς τους περιπλέκεται από την ευελιξία και την ικανότητα του εγκεφάλου να αλλάζει κατά τη διάρκεια της ζωής, προσαρμοζόμενος στα περιβαλλοντικά ερεθίσματα [24].

Διάφοροι παράγοντες διαμορφώνουν τη σχέση εγκεφάλου-συμπεριφοράς, όπως το περιβάλλον, οι κοινωνικοπολιτισμικές και ιστορικές επιρροές, οι φυλογενετικές εκτιμήσεις, η γενετική και η οντογένεση. Η ανταπόκριση του εγκεφάλου στα περιβαλλοντικά ερεθίσματα είναι εμφανής σε εμπλουτισμένα περιβάλλοντα που ευνοούν την αύξηση των συναπτικών συνδέσεων, ενώ ο υποσιτισμός στην πρώιμη ζωή μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη του νευρικού συστήματος. Τα κοινωνικοπολιτισμικά και ιστορικά πλαίσια διαμορφώνουν τη συμπεριφορά, αντανακλώντας την προσαρμογή σε συγκεκριμένες εποχές. Η φυλογενετική ιστορία του ανθρώπινου εγκεφάλου, που διέπεται από τη γενετική, υφίσταται εξελικτικές αλλαγές για να ανταποκριθεί στις περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Η ατομική ανάπτυξη (οντογένεση) ενσωματώνει τις μαθησιακές εμπειρίες που αποθηκεύονται στη μνήμη, επηρεάζοντας την τρέχουσα συμπεριφορά [23].

Επιπλέον, οι εγκεφαλικές κακώσεις προσφέρουν γνώσεις σχετικά με τις περίπλοκες συνδέσεις μεταξύ συγκεκριμένων εγκεφαλικών δομών και συμπεριφορών. Οι τεχνικές νευροαπεικόνισης, σε συνδυασμό με νευροψυχολογικές αξιολογήσεις ατόμων με εγκεφαλικές βλάβες, συμβάλλουν στην κατανόηση αυτών των συνδέσεων. Τελικά, η περίπλοκη και αλληλοεξαρτώμενη σχέση μεταξύ του εγκεφάλου και της συμπεριφοράς περιλαμβάνει συνεχή επεξεργασία πληροφοριών και προσαρμογή σε εσωτερικές και εξωτερικές επιδράσεις, διαμορφώνοντας τις κατάλληλες συμπεριφορές. Οι συνέπειες της συμπεριφοράς, που βιώνονται ως θετικές ή αρνητικές, συμβάλλουν στα μαθησιακά αποτελέσματα, προκαλώντας αλλαγές στις συναπτικές συνδέσεις του εγκεφάλου. Αυτή η πολύπλοκη αλληλεπίδραση υπογραμμίζει τη δυναμική φύση της σχέσης εγκεφάλου-συμπεριφοράς [24].

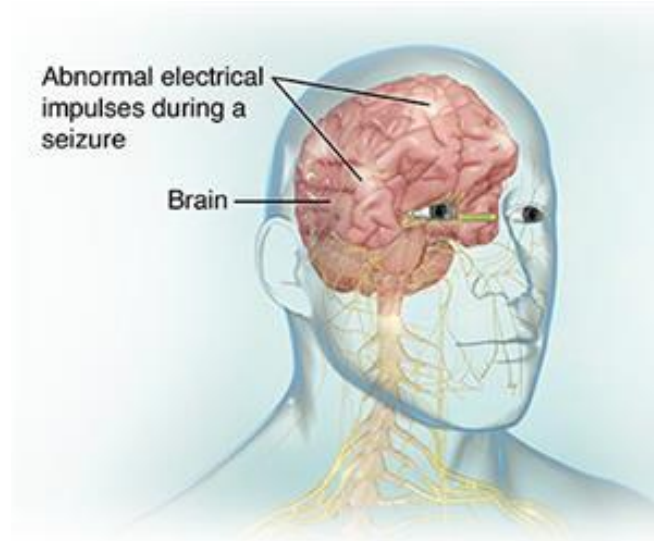
2.7 Μη φυσιολογική λειτουργία του εγκεφάλου

Ο όρος εγκεφαλικές ανωμαλίες αναφέρεται σε κάθε άτυπο χαρακτηριστικό στη λειτουργία, τη δομή ή τα βιοχημικά επίπεδα του εγκεφάλου. Οι αιτιολογίες των ανωμαλιών διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό, από γενετικές, περιγεννητικές συμπίεσεις, αναπτυξιακές και τραυματικές διαταραχές, τοξίνες και ασθένειες της μητέρας ή/και του παιδιού. Η σοβαρότητα των ανωμαλιών διαφέρει ευρέως και ο βαθμός στον οποίο είναι εμφανείς στον ασθενή δεν είναι πάντα προβλέψιμος. Οι ανωμαλίες του εγκεφάλου είναι ευρείας κλίμακας και μπορεί να είναι τόσο οργανικής όσο και αναπτυξιακής προέλευσης ή συνδυασμός και των δύο. Οι έρευνες έχουν συνδέσει την παρουσία εγκεφαλικών ανωμαλιών με διάφορες καταστάσεις, όπως αναπτυξιακές διαταραχές όπως ο αυτισμός [25], η σχιζοφρένεια [26], ο αλκοολισμός [27], διάφοροι τύποι όγκων του εγκεφάλου και άνοια.

Με την εξαιρετικά πολύπλοκη φύση της πρώιμης ανάπτυξης του εγκεφάλου, ο ανθρώπινος εγκέφαλος είναι εξαιρετικά ευάλωτος σε χημικές ανισορροπίες, προβλήματα με λοιμώξεις και υποσιτισμό. Όλοι αυτοί οι παράγοντες μπορούν να αλληλεπιδράσουν στον αναπτυσσόμενο εγκέφαλο και να προκαλέσουν τόσο λειτουργικές όσο και σωματικές ανωμαλίες, οι οποίες μπορεί να έχουν ευρύτερες συνέπειες. Ο αναπτυσσόμενος εγκέφαλος είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στις χημικές ανισορροπίες. Για παράδειγμα, σε έναν ώριμο εγκέφαλο, η δυσλειτουργία του θυρεοειδούς μπορεί να οδηγήσει σε λήθαργο. Σε έναν

αναπτυσσόμενο εγκέφαλο, ωστόσο, η δυσλειτουργία του θυρεοειδούς μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμη νοητική καθυστέρηση.

Η νευρολογική ανάπτυξη αρχίζει με τη σύλληψη και είναι μια ομαλή διαδικασία ευάλωτη σε παρεμβολές [28]. Οι ανωμαλίες του εγκεφάλου στα παιδιά μπορεί να είναι προσθετικές, με προβλήματα στην πρώιμη ανάπτυξη να οδηγούν ή να δημιουργούν άλλα προβλήματα αργότερα στη ζωή. Για το λόγο αυτό, είναι εξαιρετικά σημαντικό οι ψυχολόγοι που εργάζονται με παιδιά να γνωρίζουν ότι πολλαπλοί παράγοντες μπορεί να συμβάλλουν στην παρεμβολή της φυσιολογικής ανάπτυξης του εγκεφάλου από τη σύλληψη έως την εφηβεία [29]. Δυστυχώς, υπάρχει μεγάλος βαθμός ευχέρειας όσον αφορά τις αναπτυξιακές πορείες, ιδίως στα παιδιά, και έτσι είναι δύσκολο να γίνουν συνολικές δηλώσεις για τις εγκεφαλικές βλάβες με μεγάλη εμπιστοσύνη.



Εικόνα 3 Μη φυσιολογική λειτουργία του εγκεφάλου

2.8 Δυναμική οξυγόνωση: Η αντίδραση του εγκεφάλου στην κίνηση του κυκλοφορικού συστήματος

Ο βασικός βιολογικός μηχανισμός που περιλαμβάνει την κυκλοφορία οξυγονωμένου και μη οξυγονωμένου αίματος παίζει κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση των λειτουργιών του σώματος, με ιδιαίτερη έμφαση στον εγκέφαλο. Αυτό το κυκλοφορικό σύστημα αποτελείται από την καρδιά και τα αιμοφόρα αγγεία, εξασφαλίζοντας συνεχή παροχή οξυγόνου για την κάλυψη των μεταβολικών απαιτήσεων των διαφόρων ιστών, συμπεριλαμβανομένου του εγκεφάλου. Όταν το σώμα βρίσκεται σε ηρεμία, η καρδιά αντλεί οξυγονωμένο αίμα στην αορτή, η οποία στη συνέχεια διακλαδίζεται σε μικρότερες αρτηρίες. Αυτές οι αρτηρίες μεταφέρουν το πλούσιο σε οξυγόνο αίμα σε διάφορα μέρη του σώματος, συμπεριλαμβανομένου του εγκεφάλου. Καθώς το οξυγόνο χρησιμοποιείται από τα κύτταρα του εγκεφάλου για μεταβολικές διεργασίες, το αίμα αποξυγονώνεται [24].

Κατά τη διάρκεια κινήσεων ή σωματικής δραστηριότητας, το κυκλοφορικό σύστημα προσαρμόζεται για να καλύψει την αυξημένη ζήτηση οξυγόνου των ενεργών μυών και οργάνων, συμπεριλαμβανομένου του εγκεφάλου. Η καρδιά ανταποκρίνεται αντλώντας περισσότερο αίμα ανά λεπτό και οι αρτηρίες διαστέλλονται για να επιτρέπουν την αποτελεσματικότερη παροχή οξυγονωμένου αίματος. Αυτό διασφαλίζει ότι ο εγκέφαλος λαμβάνει επαρκή παροχή οξυγόνου για να υποστηρίξει την αυξημένη νευρική δραστηριότητα που σχετίζεται με την κίνηση, τη συγκέντρωση και τον συντονισμό [23].

Αντίθετα, όταν το σώμα βρίσκεται και πάλι σε ηρεμία, το κυκλοφορικό σύστημα προσαρμόζεται στη μειωμένη ζήτηση οξυγόνου. Ο καρδιακός ρυθμός μειώνεται και τα αιμοφόρα αγγεία συστέλλονται για να διατηρηθεί η αποτελεσματική κυκλοφορία. Αυτός ο κύκλος της παροχής οξυγονωμένου αίματος κατά τη διάρκεια της δραστηριότητας και της μείωσης της ζήτησης κατά την ανάπαυση είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της βέλτιστης λειτουργίας του εγκεφάλου. Η εξάρτηση του εγκεφάλου από τη συνεχή παροχή οξυγόνου είναι υψίστης σημασίας λόγω της υψηλής μεταβολικής του δραστηριότητας και της ευαισθησίας του στις μεταβολές των επιπέδων οξυγόνου. Οι διακοπές σε αυτή την παροχή οξυγόνου, ακόμη και για σύντομο χρονικό διάστημα, μπορεί να έχουν βαθιές επιπτώσεις στη γνωστική λειτουργία και τη συνολική νευρολογική υγεία [24].

2.9 Επίλογος

Εν κατακλείδι, το Κεφάλαιο 2 εμβαθύνει στην περίπλοκη φυσιολογία του ανθρώπινου εγκεφάλου, τονίζοντας την πολυπλοκότητά του και τον αναπόσπαστο ρόλο που διαδραματίζει στη διαμόρφωση της συμπεριφοράς. Ο εγκέφαλος, αποτελούμενος από πάνω από 100 δισεκατομμύρια νευρώνες, ενορχηστρώνει αντιδράσεις που σχετίζονται με την εργασία, την κίνηση, τις αισθήσεις, τα συναισθήματα, τη γλώσσα, την επικοινωνία, τη σκέψη και τη μνήμη. Χωρίζεται στο εγκεφαλικό, την παρεγκεφαλίδα και το στέλεχος του εγκεφάλου και κάθε τμήμα του εξυπηρετεί ξεχωριστές λειτουργίες.

Η φυσιολογική δραστηριότητα του εγκεφάλου περιλαμβάνει τη μετάδοση χημικών και ηλεκτρικών σημάτων, με το κεντρικό νευρικό σύστημα να βασίζεται σε δισεκατομμύρια νευρώνες για την επικοινωνία. Το κεφάλαιο αναλύει τα κύρια μέρη του εγκεφάλου, περιγράφοντας λεπτομερώς τις λειτουργίες του εγκεφαλικού φλοιού, του εγκεφαλικού στελέχους, του ρομφ, του μυελού και της παρεγκεφαλίδας. Εξετάζονται τα προστατευτικά καλύμματα, οι μήνιγγες, και τα τρία στρώματα - σκληρή μήνιγγα, αραχνοειδής μήνιγγα και μήνιγγα πλαγίας μήνιγγας - ως προς το ρόλο τους στη διαφύλαξη του εγκεφάλου.

Μεταβαίνοντας στους νευρώνες και τα νευρωνικά δίκτυα, το κεφάλαιο εξετάζει τις προκλήσεις στην κατανόηση των εγκεφαλικών λειτουργιών λόγω της πολυπλοκότητας των δικτύων που περιλαμβάνουν δισεκατομμύρια νευρώνες και συνάψεις. Συζητείται ο πυρήνας της νευρωνικής λειτουργίας, που περιλαμβάνει διαύλους και αντλίες ιόντων και την κωδικοποίηση της πληροφορίας μέσω των δυναμικών δράσης. Η συναπτική πλαστικότητα και η μυελίνωση είναι ζωτικής σημασίας για την κινητική ανάπτυξη και τις γνωστικές δεξιότητες.

Επισημαίνεται ο ρόλος των νευροδιαβιβαστών, των ορμονών και των νευροδιαμορφωτών στην κυτταρική επικοινωνία και η επίδρασή τους στη διάθεση, τη μνήμη, τη μάθηση και τη νόηση. Οι αναπτυξιακές πτυχές του εγκεφάλου, από τα προγεννητικά στάδια έως την πρώιμη ενήλικη ζωή, υπογραμμίζουν τη σημασία των εμπειριών της πρώιμης παιδικής ηλικίας στη διαμόρφωση της νευρικής αρχιτεκτονικής.

Η έννοια της νευροπλαστικότητας εισάγεται ως βασικός μηχανισμός για τη γνωστική ευελιξία, που επιτρέπει στον εγκέφαλο να αναδιοργανώνεται, να δημιουργεί νέες οδούς και να προσαρμόζεται στις εμπειρίες καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής. Η δυναμική σχέση μεταξύ του εγκεφάλου και της συμπεριφοράς αμφισβητεί τον καρτεσιανό δυισμό νους-σώμα, τονίζοντας τον γενικότερο ρόλο του εγκεφάλου στην καθοδήγηση της συμπεριφοράς.

Τέλος, το κεφάλαιο διερευνά τη μη φυσιολογική λειτουργία του εγκεφάλου, σημειώνοντας το ευρύ φάσμα των αιτιών και των συνεπειών που σχετίζονται με γενετικούς, περιγεννητικούς, αναπτυξιακούς,

τραυματικούς, τοξικούς και μητρικούς/παιδικούς παράγοντες. Η ευπάθεια του αναπτυσσόμενου εγκεφάλου σε χημικές ανισορροπίες υπογραμμίζει τη σημασία της διαφοροποιημένης κατανόησης κατά την εργασία με τα παιδιά.

Κεφάλαιο 3ο: Λειτουργική Φασματοσκοπία Εγγύς Υπέρυθρου (fNIRS)

3.1 Ορισμός

Η λειτουργική φασματοσκοπία στο εγγύς υπέρυθρο (fNIRS) είναι μια μη επεμβατική τεχνική οπτικής απεικόνισης που μετρά τις μεταβολές στις συγκεντρώσεις οξυγονωμένης και αποξυγονωμένης αιμοσφαιρίνης (Hb) εντός του εγκεφάλου μέσω των χαρακτηριστικών φασμάτων απορρόφησής τους στην περιοχή μηκών κύματος 700-1000 nm. Τα τελευταία χρόνια, οι θόνοιες fNIRS έχουν γίνει μικρότερες, φθηνότερες και ευκολότερες στη χρήση, καθιστώντας την πολύ αποδοτική νευροτεχνολογία σε διερευνητικές και διαγνωστικές ρυθμίσεις. Αυτό καθιστά το fNIRS πολύ βολικό για την εκτίμηση σε πραγματικό χρόνο της εξαρτώμενης από το επίπεδο οξυγόνου φλοιώδους δραστηριότητας πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από συγκεκριμένες γνωστικές εργασίες ή ορισμένες κλινικές παρεμβάσεις για τη διερεύνηση της εγκεφαλικής λειτουργίας και την πρόληψη πιθανών νευρικών βλαβών (π.χ. κατά τη διάρκεια καρδιοχειρουργικής επέμβασης) [30].

Από την πρώτη της εφαρμογή πριν από περίπου 40 χρόνια [31], η φασματοσκοπία στο εγγύς υπέρυθρο είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την παρακολούθηση των τοπικών μεταβολών της εγκεφαλικής οξυγόνωσης και της αιμοδυναμικής κατά τη διάρκεια της ενεργοποίησης του εγκεφάλου [32]. Το άθροισμα των συγκεντρώσεων της οξυ- και της δεοξυ-αιμοσφαιρίνης παρέχει ένα μέτρο του τοπικού όγκου αίματος του εγκεφαλικού ιστού, ενώ οι μεμονωμένες συγκεντρώσεις των δύο μορφών αιμοσφαιρίνης είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ φυσιολογικών παραμέτρων όπως ο περιφερειακός όγκος αίματος, η περιφερειακή ροή αίματος και ο μεταβολικός ρυθμός του οξυγόνου. Ως εκ τούτου, το fNIRS είναι ένα εργαλείο που υπόσχεται πολλά για πρωτόκολλα που σχετίζονται με την άσκηση και στα οποία δίνεται έμφαση σε περιβαλλοντικούς χειρισμούς (π.χ. ακουστικά ή οπτικά ερεθίσματα). Παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τον μεταβολισμό της άσκησης και διευκολύνει τη μελέτη των εγκεφαλικών μηχανισμών με αποδεκτό βαθμό χωρικής και χρονικής ανάλυσης.

Χρησιμοποιώντας fNIRS, οι Bigliassi et al. (2015b) [33] ανέφεραν προμετωπιαίες αιμοδυναμικές αλλαγές κατά τη διάρκεια παθητικής ακρόασης διαφορετικών στυλ μουσικής. Συγκεκριμένα, η κλασική μουσική (Συμφωνία αριθ. 6 [Ποιμενική Συμφωνία] του Μπετόβεν) ήταν αρκετά ισχυρή για να αυξήσει τη δραστηριότητα του δεξιού και του αριστερού ραχιαίου προμετωπιαίου φλοιού και να ρυθμίσει την παρασυμπαθητική δραστηριότητα του αυτόνομου νευρικού συστήματος σε μεγαλύτερο βαθμό από ό,τι η techno μουσική (Cyber Trip Techno Shock από τον Techno Magnetiko). Κατά συνέπεια, το fNIRS φαίνεται να είναι μια πολύτιμη τεχνική με την οποία μπορούν να μελετηθούν σύνθετες ψυχοφυσιολογικές αποκρίσεις και η αλληλεπίδραση μεταξύ αισθητηριακής διέγερσης, εγκεφαλικής δραστηριότητας και περιφερικών φυσιολογικών αποκρίσεων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την εφαρμογή του fNIRS στη σωματική άσκηση παρουσιάζει το γεγονός ότι παρέχει μια έμμεση μέτρηση των τοπικών μεταβολών της εγκεφαλικής οξυγόνωσης, η οποία αντανακλά την ενεργοποίηση του φλοιού - με εγκεφαλικές μετρήσεις ανθεκτικές στα τεχνουργήματα του κεφαλιού και του σώματος κατά τη διάρκεια της δυναμικής άσκησης [34].

Το fNIRS έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε νεογέννητα και βρέφη, έναν ιδιαίτερα κατάλληλο πληθυσμό λόγω της πορώδους φύσης του κεφαλιού, η οποία επιτρέπει στο υπέρυθρο φως να διεισδύσει στον ιστό με ελάχιστο βιολογικό θόρυβο που προκαλείται από τα οστά και τις τρίχες. Από τα μέσα της δεκαετίας του 2000 έχουν δημοσιευθεί πολλές μελέτες που αναφέρουν σημαντικές επιδράσεις οπτικών [35], οσφρητικών και ακουστικών ερεθισμάτων [36] στις αιμοδυναμικές αποκρίσεις του εγκεφάλου των

βρεφών. Για παράδειγμα, το ζήτημα της πλευρικότητας του εγκεφάλου έχει εξεταστεί σε σχέση με την επεξεργασία της μουσικής: οι Homae et al. (2012) [37] ανέφεραν μια αριστερή κυρίαρχη δραστηριότητα για την επεξεργασία της γλώσσας, αλλά καμία σαφή πλευρικότητα για το ύψος, τη μελωδία και τον ρυθμό σε ακουστικά ερεθίσματα ποικίλης φύσης (π.χ. ακολουθίες τόνων). Η πλευρικότητα του εγκεφάλου αναφέρεται στην ικανότητα του εγκεφάλου να επεξεργάζεται πληροφορίες και ερεθίσματα από τις περιφερειακές περιοχές του σώματος, καθώς και να ρυθμίζει τις λειτουργίες του σώματος. Αυτό περιλαμβάνει την αναγνώριση της αφής, της θερμοκρασίας, της πίεσης και άλλων αισθητηριακών ερεθισμάτων που προέρχονται από τον περιβάλλοντα κόσμο ή από το εσωτερικό του οργανισμού.

Τα αρχικά κινητικά παραδείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα fNIRS περιλάμβαναν εργασίες δακτυλοκόλλησης. Οι Sato et al. (2007) [38] ανέθεσαν στους συμμετέχοντες να τοποθετήσουν τους αντίχειρές τους στις άκρες κάθε δακτύλου του ίδιου χεριού με σειριακή σειρά όσο πιο γρήγορα και με ακρίβεια μπορούσαν. Όπως αναμενόταν, τα αποτελέσματα αποκάλυψαν αύξηση της οξυαιμοσφαιρίνης με ταυτόχρονη μείωση της δεοξυαιμοσφαιρίνης, γεγονός που υποδηλώνει αύξηση της λειτουργικής δραστηριότητας του κινητικού, του σωματοαισθητικού και του μετωπιαίου φλοιού. Χρησιμοποιώντας ένα έργο πατήματος κουμπιού, η έρευνα έδειξε ότι ο βαθμός νευρικής ενεργοποίησης του εγκεφάλου διαμορφωνόταν σε συνάρτηση με τη συχνότητα με την οποία οι συμμετέχοντες κινούσαν το δείκτη τους [39]. Παρομοίως, η πολυπλοκότητα της εργασίας (π.χ. απλές/πολύπλοκες μονοχειροκίνητες και διχειροκίνητες εργασίες) έχει επίσης αναγνωριστεί ως σημαντικός παράγοντας [40]. Τέτοιες μελέτες απεικόνισαν παρόμοια μοτίβα εγκεφαλικής αιμοδυναμικής δραστηριότητας με εκείνα που αναφέρθηκαν σε μελέτες fMRI [41]. Το πιο σημαντικό είναι ότι κατέδειξαν την πιθανή χρήση του fNIRS για την καλύτερη κατανόηση της εγκεφαλικής αιμοδυναμικής κατά τη διάρκεια κινητικών δραστηριοτήτων που απαιτούν σημαντική κίνηση του κεφαλιού.

Στο πλαίσιο της άσκησης, οι τεχνικές fNIRS έχουν χρησιμοποιηθεί ως μέσο για την περαιτέρω κατανόηση των νευροφυσιολογικών και ψυχοβιολογικών αλλαγών που συνοδεύουν την άσκηση. Για παράδειγμα, οι Tempst et al. (2014) [42] εξέτασαν τη λειτουργική ικανότητα του προμετωπιαίου φλοιού και διερεύνησαν τις αλλαγές στη συναισθηματική απόκριση που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της άσκησης που εκτελείται σε διάφορες εντάσεις. Οι συγγραφείς εντόπισαν ότι η οξυ-, η δεοξυ- και η ολική αιμοσφαιρίνη ήταν μεγαλύτερες κυρίως στις κοιλιακές παρά στις ραχιαίες περιοχές του προμετωπιαίου φλοιού κατά τη διάρκεια ασκήσεων που εκτελούνταν πάνω από το αναπνευστικό κατώφλι. Είναι ενδιαφέρον ότι παρατηρήθηκαν αρνητικές συσχετίσεις μεταξύ των συναισθηματικών αποκρίσεων και της οξυγόνωσης σε όλες τις περιοχές του αριστερού ημισφαιρίου. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι αλλαγές στη δραστηριότητα του προμετωπιαίου φλοιού μπορεί να μετριάσουν τις συναισθηματικές αποκρίσεις που βιώνονται κατά τη διάρκεια άσκησης που εκτελείται σε πολύ υψηλές εντάσεις.

Ένα παρόμοιο πρωτόκολλο άσκησης χρησιμοποιήθηκε από τους Chang et al. (2013) [43], οι οποίοι διερεύνησαν τις επιδράσεις της μουσικής και της άσκησης στη γνωστική απόδοση και την εγκεφαλική δραστηριότητα μέσω της εφαρμογής του fNIRS. Οι συγγραφείς εντόπισαν θετική επίδραση της άσκησης στη γνωστική απόδοση καθώς και αυξημένη ενεργοποίηση στον προμετωπιαίο φλοιό. Παρ' όλα αυτά, το μη αποκαλυπτόμενο μουσικό κομμάτι που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη δεν ήταν αρκετά ισχυρό ώστε να βελτιώσει τη γνωστική απόδοση ή να επηρεάσει την αιμοδυναμική δραστηριότητα στον προμετωπιαίο φλοιό [44].

Διατηρώντας έναν λογικό βαθμό χρονικής ανάλυσης, η χρήση πολυκαναλικών συσκευών είναι απαραίτητη για τον εντοπισμό της εγκεφαλικής δραστηριότητας στις υποφλοιώδεις περιοχές. Μόνο λίγες συσκευές fNIRS παρέχουν τέτοιες μετρήσεις (π.χ. τα μοντέλα Shimadzu και Artinis). Μία από τις

σπάνιες μελέτες που περιλαμβάνουν μετρήσεις συσκευών πολλών καναλιών (εισόδων) για ασκήσεις ολόκληρου του σώματος διεξήχθη από τους Miyai et al. (2001) [45], οι οποίοι ανέφεραν ότι οι αιμοδυναμικές αποκρίσεις τόσο του μεσαίου πρωτογενούς αισθητικοκινητικού φλοιού όσο και των συμπληρωματικών κινητικών περιοχών ήταν αυξητικές: όλο και μεγαλύτερα επίπεδα εγκεφαλικών συνενεργοποιήσεων παρατηρήθηκαν για την κινητική απεικόνιση, την κάμψη των ποδιών και το βάδισμα-βάδισμα.

Τα ευρήματα του ΗΕΓ υποδηλώνουν έντονα ότι η μουσική έχει τη δυνατότητα να καθυστερήσει την υποκειμενική εμπειρία της κόπωσης κατά τη διάρκεια της άσκησης. Οι Karageorghis et al. (2017) [46], πρότειναν ότι οι επιδράσεις της μουσικής στις συναισθηματικές αντιδράσεις, στην αντίληψη της προσπάθειας και στην αντοχή στην άσκηση διαμεσολαβούνται από αντίστοιχες αλλαγές στη δραστηριότητα του ραχιαίου προμετωπιαίου φλοιού [47]. Ειδικότερα, ο Ekkekakis (2009) [34] έδειξε ότι η οξυγόνωση αυτής της περιοχής αυξάνεται σε μέτρια ένταση άσκησης, αλλά πέφτει κάτω από τα βασικά επίπεδα λίγο πριν το άτομο φτάσει στην εκούσια εξάντληση. Ως εκ τούτου, φαίνεται εύλογο ότι, κατά τη διάρκεια της άσκησης, η παρουσία μουσικής μπορεί να καθυστερήσει την αύξηση της οξυγόνωσης. Αυτό συμβαίνει επειδή η άσκηση μέτριας έντασης βιώνεται ως πιο ευχάριστη ή λιγότερο δυσάρεστη σε σύγκριση με την ενασχόληση με την άσκηση χωρίς ακουστική διέγερση [46].

Σε παρόμοια κατεύθυνση, είναι επίσης εύλογο ότι η ακρόαση μουσικής κατά τη διάρκεια της άσκησης χρησιμεύει στη μετατόπιση ολόκληρης της καμπύλης οξυγόνωσης προς υψηλότερα επίπεδα έντασης. Αυτό προκαλεί καθυστέρηση της ενδεχόμενης πτώσης της προμετωπιαίας οξυγόνωσης και παρατείνει την απόδοση της άσκησης (δηλ. δημιουργεί ένα εργογόνο αποτέλεσμα). Ο έλεγχος αυτών των δύο υποθέσεων - η μουσική καθυστερεί την αύξηση της οξυγόνωσης ή/και μετατοπίζει την καμπύλη οξυγόνωσης - θα επιτρέψει στους μελλοντικούς ερευνητές να καθορίσουν τη φυσιολογική "ζώνη αποτελεσματικότητας" των παρεμβάσεων που σχετίζονται με τη μουσική κατά τη διάρκεια της άσκησης. Συγκεκριμένα, το εύρος της έντασης της άσκησης στο οποίο η μουσική αναμένεται να διευκολύνει τον γνωστικό έλεγχο των δυσάρεστων αισθήσεων. Οι εν λόγω αισθήσεις αυξάνονται αισθητά σε σοβαρότητα σε υψηλές εντάσεις άσκησης και, ως εκ τούτου, καθιστούν τη μουσική προοδευτικά αναποτελεσματική [48]- [49]. Η μειωμένη διαθεσιμότητα οξυγόνου στον εγκέφαλο μπορεί επίσης να επηρεάσει τη νευρική ενεργοποίηση των εργαζόμενων μυών και αποτελεί έτσι προάγγελο μιας απότομης υποβάθμισης της απόδοσης κατά την άσκηση [50].



Εικόνα 4 fNIRS

3.2 fNIRS αντί MRI

3.2.1 Η μαγνητική τομογραφία (MRI)

Η μαγνητική τομογραφία (MRI) είναι μια μη επεμβατική τεχνολογία απεικόνισης που παράγει τρισδιάστατες λεπτομερείς ανατομικές εικόνες. Χρησιμοποιείται συχνά για την ανίχνευση, τη διάγνωση και την παρακολούθηση της θεραπείας. Βασίζεται σε εξελιγμένη τεχνολογία που διεγείρει και ανιχνεύει την αλλαγή της κατεύθυνσης του άξονα περιστροφής των πρωτονίων που βρίσκονται στο νερό που συνθέτει τους ζωντανούς ιστούς [51]

Οι μαγνητικές τομογραφίες χρησιμοποιούν ισχυρούς μαγνήτες οι οποίοι παράγουν ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο που αναγκάζει τα πρωτόνια στο σώμα να ευθυγραμμιστούν με αυτό το πεδίο. Όταν στη συνέχεια ένα ρεύμα ραδιοσυχνότητας πάλλεται μέσα στον ασθενή, τα πρωτόνια διεγείρονται και περιστρέφονται εκτός ισορροπίας, αντιστεκόμενα στην έλξη του μαγνητικού πεδίου. Όταν το πεδίο ραδιοσυχνότητας απενεργοποιείται, οι αισθητήρες μαγνητικής τομογραφίας είναι σε θέση να ανιχνεύσουν την ενέργεια που απελευθερώνεται καθώς τα πρωτόνια ευθυγραμμίζονται εκ νέου με το μαγνητικό πεδίο. Ο χρόνος που χρειάζονται τα πρωτόνια για να ευθυγραμμιστούν με το μαγνητικό πεδίο, καθώς και η ποσότητα της ενέργειας που απελευθερώνεται, αλλάζει ανάλογα με το περιβάλλον και τη χημική φύση των μορίων. Οι γιατροί είναι σε θέση να διακρίνουν τη διαφορά μεταξύ διαφόρων τύπων ιστών με βάση αυτές τις μαγνητικές ιδιότητες. Για τη λήψη μιας εικόνας μαγνητικής

τομογραφίας, ο ασθενής τοποθετείται μέσα σε έναν μεγάλο μαγνήτη και πρέπει να παραμείνει πολύ ακίνητος κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απεικόνισης προκειμένου να μην θολώσει η εικόνα. Οι παράγοντες αντίθεσης (που συχνά περιέχουν το στοιχείο γαδολίνιο) μπορεί να χορηγηθούν στον ασθενή ενδοφλεβίως πριν ή κατά τη διάρκεια της μαγνητικής τομογραφίας για να αυξηθεί η ταχύτητα με την οποία τα πρωτόνια ευθυγραμμίζονται με το μαγνητικό πεδίο. Όσο πιο γρήγορα τα πρωτόνια ευθυγραμμίζονται, τόσο πιο φωτεινή είναι η εικόνα [52].

Οι σαρωτές μαγνητικής τομογραφίας είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για την απεικόνιση των μη οστέινων τμημάτων ή των μαλακών ιστών του σώματος. Διαφέρουν από την αξονική τομογραφία (CT) στο ότι δεν χρησιμοποιούν την επιβλαβή ιονίζουσα ακτινοβολία των ακτίνων X. Ο εγκέφαλος, ο νωτιαίος μυελός και τα νεύρα, καθώς και οι μύες, οι σύνδεσμοι και οι τένοντες φαίνονται πολύ πιο καθαρά με τη μαγνητική τομογραφία απ' ό,τι με τις κανονικές ακτινογραφίες και την αξονική τομογραφία- για το λόγο αυτό η μαγνητική τομογραφία χρησιμοποιείται συχνά για την απεικόνιση τραυματισμών στο γόνατο και τον ώμο [51].

Στον εγκέφαλο, η μαγνητική τομογραφία μπορεί να κάνει διάκριση μεταξύ λευκής και φαιάς ουσίας και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη διάγνωση ανευρυσμάτων και όγκων. Επειδή η μαγνητική τομογραφία δεν χρησιμοποιεί ακτίνες X ή άλλη ακτινοβολία, είναι η απεικονιστική μέθοδος επιλογής όταν απαιτείται συχνή απεικόνιση για διάγνωση ή θεραπεία, ιδίως στον εγκέφαλο. Ωστόσο, η μαγνητική τομογραφία είναι ακριβότερη από την απεικόνιση με ακτίνες X ή την αξονική τομογραφία [52].

Ένα είδος εξειδικευμένης μαγνητικής τομογραφίας είναι η λειτουργική απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού (fMRI). Αυτή χρησιμοποιείται για την παρατήρηση των εγκεφαλικών δομών και τον προσδιορισμό των περιοχών του εγκεφάλου που "ενεργοποιούνται" (καταναλώνουν περισσότερο οξυγόνο) κατά τη διάρκεια διαφόρων γνωστικών εργασιών. Χρησιμοποιείται για την προώθηση της κατανόησης της οργάνωσης του εγκεφάλου και προσφέρει ένα πιθανό νέο πρότυπο για την αξιολόγηση της νευρολογικής κατάστασης και του νευροχειρουργικού κινδύνου [53].

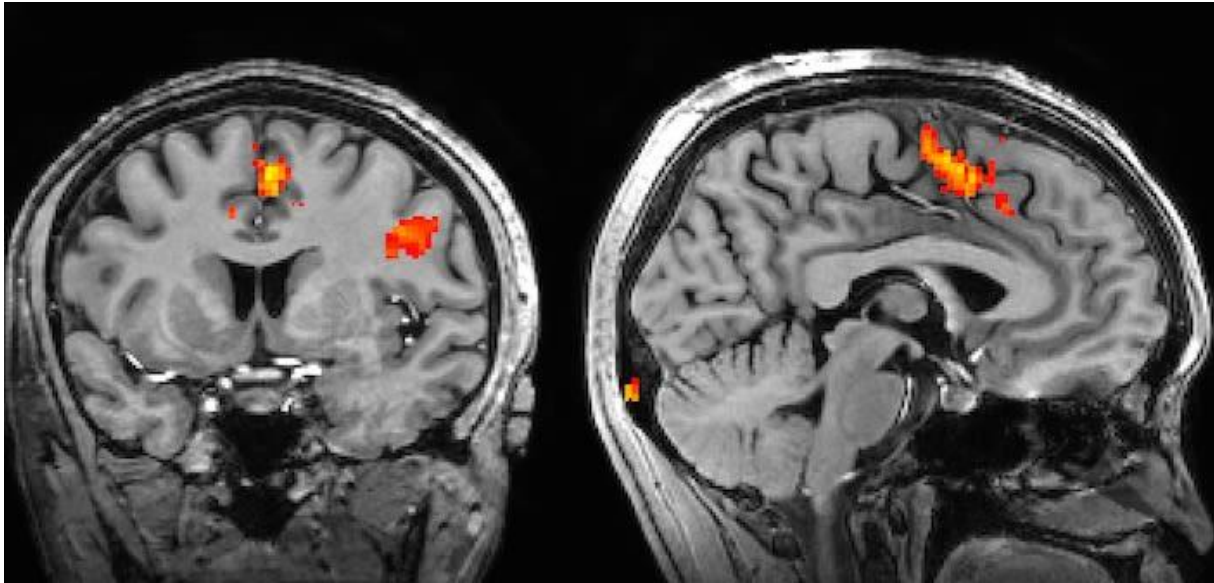
Η πρωταρχική μορφή της fMRI χρησιμοποιεί την αντίθεση που εξαρτάται από το επίπεδο οξυγόνου στο αίμα (BOLD), [54], η οποία ανακαλύφθηκε από τον Seiji Ogawa το 1990. Πρόκειται για έναν τύπο εξειδικευμένης σάρωσης του εγκεφάλου και του σώματος που χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση της νευρικής δραστηριότητας στον εγκέφαλο ή τον νωτιαίο μυελό ανθρώπων ή άλλων ζώων με την απεικόνιση της μεταβολής της ροής του αίματος (αιμοδυναμική απόκριση) που σχετίζεται με τη χρήση ενέργειας από τα εγκεφαλικά κύτταρα. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, η fMRI κυριάρχησε στην έρευνα για τη χαρτογράφηση του εγκεφάλου επειδή δεν περιλαμβάνει τη χρήση ενέσεων, χειρουργικών επεμβάσεων, την κατάποση ουσιών ή την έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία [55].

Η προκύπτουσα εγκεφαλική ενεργοποίηση μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά με χρωματική κωδικοποίηση της ισχύος της ενεργοποίησης σε ολόκληρο τον εγκέφαλο ή στη συγκεκριμένη περιοχή που μελετάται. Η τεχνική μπορεί να εντοπίσει τη δραστηριότητα με ακρίβεια χιλιοστού, αλλά, με τη χρήση τυπικών τεχνικών, όχι καλύτερα από ένα παράθυρο μερικών δευτερολέπτων. Άλλες μέθοδοι λήψης αντίθεσης είναι η αρτηριακή σήμανση σπιν και η μαγνητική τομογραφία διάχυσης. Η μαγνητική τομογραφία διάχυσης είναι παρόμοια με την BOLD fMRI, αλλά παρέχει αντίθεση με βάση το μέγεθος της διάχυσης των μορίων νερού στον εγκέφαλο [56].

Εκτός από την ανίχνευση των αποκρίσεων BOLD από τη δραστηριότητα που οφείλεται σε εργασίες ή ερεθίσματα, η μαγνητική τομογραφία μπορεί να μετρήσει την κατάσταση ηρεμίας ή την κατάσταση αρνητικής εργασίας, η οποία δείχνει τη βασική διακύμανση BOLD των υποκειμένων. Από το 1998 μελέτες έχουν δείξει την ύπαρξη και τις ιδιότητες του δικτύου προεπιλεγμένης λειτουργίας, ενός

λειτουργικά συνδεδεμένου νευρωνικού δικτύου φαινομενικών καταστάσεων ηρεμίας του εγκεφάλου [53].

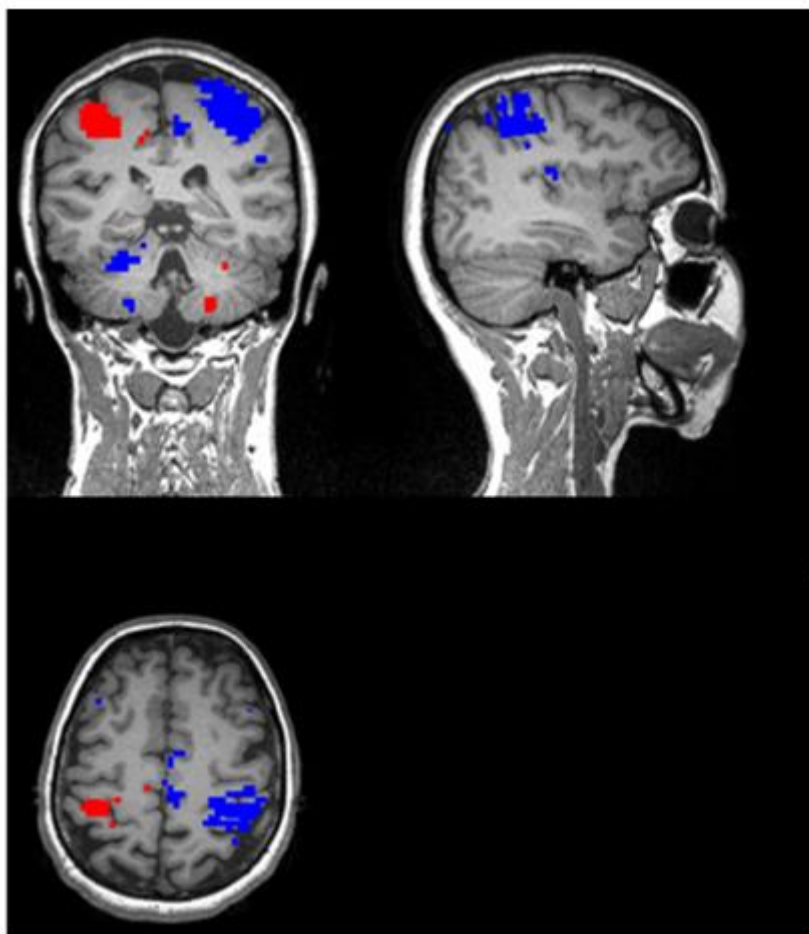
Η fMRI χρησιμοποιείται στην έρευνα και, σε μικρότερο βαθμό, στην κλινική εργασία. Μπορεί να συμπληρώσει άλλες μετρήσεις της φυσιολογίας του εγκεφάλου, όπως η ηλεκτροεγκεφαλογραφία (EEG) και η φασματοσκοπία εγγύς υπέρυθρου (NIRS). Ερευνώνται νεότερες μέθοδοι που βελτιώνουν τόσο τη χωρική όσο και τη χρονική ανάλυση, οι οποίες χρησιμοποιούν σε μεγάλο βαθμό βιοδείκτες άλλους από το σήμα BOLD. Ορισμένες εταιρείες έχουν αναπτύξει εμπορικά προϊόντα, όπως ανιχνευτές ψεύδους που βασίζονται σε τεχνικές fMRI, αλλά η έρευνα δεν πιστεύεται ότι είναι αρκετά ανεπτυγμένη για ευρεία εμπορική χρήση [57].



Εικόνα 5 Η μαγνητική τομογραφία (MRI)

3.2.2 fNIRS αντί fMRI

Σε σύγκριση με την fMRI, το fNIRS έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ενώ η fMRI έχει γίνει το χρυσό πρότυπο για την *in vivo* απεικόνιση του ανθρώπινου εγκεφάλου, το fNIRS ξεχωρίζει για τη φορητότητά του και την ανθεκτικότητά του στο θόρυβο, φέρνοντας τη λειτουργική απεικόνιση σε πολύ πιο ρεαλιστικά περιβάλλοντα. Αν και περιορίζεται από την κατώτερη χωρική ανάλυση και το μικρότερο βάθος διείσδυσης, το fNIRS έχει πολύ υψηλότερη χρονική ανάλυση από την fMRI, επιτρέποντας μετρήσεις των μεταβολών της συγκέντρωσης τόσο στην οξυγονωμένη όσο και στην αποξυγονωμένη αιμοσφαιρίνη [58].



Εικόνα 6 Παράδειγμα ταυτόχρονης απεικόνισης fMRI και fNIRS κατά τη διάρκεια ενός πειράματος πατήματος του αριστερού και του δεξιού δακτύλου. Αριστερά>Δεξιά (μπλε) και Δεξιά>Αριστερά (κόκκινο)

3.2.2.1 Σύγκριση της αιμοδυναμικής fNIRS με την αιμοδυναμική fMRI

Επομένως, πολλοί ερευνητές ενδιαφέρονται για το πώς συγκρίνεται το fNIRS με την fMRI σε μελέτες της λειτουργίας του εγκεφάλου. Ενώ οι ταυτόχρονες μετρήσεις fMRI και fNIRS έχουν ως επί το πλείστον ως στόχο την επικύρωση του fNIRS ως νεότερης τεχνολογίας ή τη μελέτη των χωρικών και χρονικών συσχετίσεων μεταξύ του σήματος BOLD του fMRI και των μεταβολών της συγκέντρωσης της οξυγονωμένης και της αποξυγονωμένης αιμοσφαιρίνης, είναι προφανές ότι ο συνδυασμός fNIRS και fMRI μπορεί να δώσει νέες πληροφορίες για τη λειτουργία του εγκεφάλου ξεπερνώντας ορισμένους από τους εγγενείς περιορισμούς των δύο μεθόδων [59].

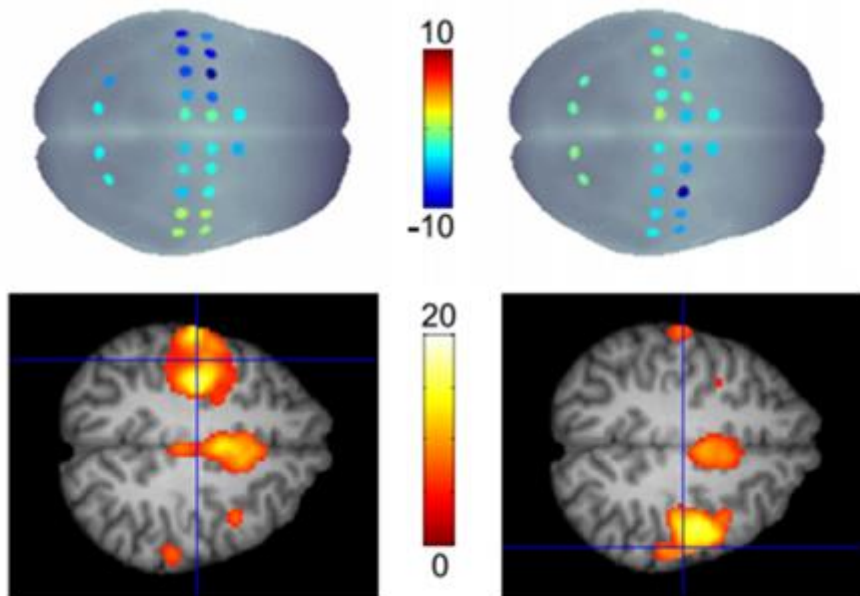
Η οπτική φύση του σήματος fNIRS, η ανθεκτικότητά του στην κίνηση, το σχετικά χαμηλότερο κόστος του, καθώς και το μικρό του μέγεθος και ο υψηλός βαθμός φορητότητάς του, καθιστούν το fNIRS ιδανικό υποψήφιο για πολυτροπικές μελέτες. Το fNIRS μπορεί αβίαστα να συνδυαστεί με fMRI, EEG, TMS, tDCS και πολλές άλλες απεικονιστικές μεθόδους, χωρίς να προκαλεί παρεμβολές στις μετρήσεις [59].



Εικόνα 7 fMRI

3.2.2.2 fNIRS-fMRI με συστήματα NIRx

Όλα τα συστήματα NIRx NIRSport και NIRScout μπορούν να προσαρμοστούν με μονάδες συμβατές με μαγνητική τομογραφία, συμπεριλαμβανομένων οπτικών ινών επαρκούς μήκους και οπτοδίων συμβατών με μαγνητική τομογραφία, για απρόσκοπτη εγκατάσταση σε περιβάλλον μαγνητικής τομογραφίας. Οι ψηφιακές είσοδοι σκανδαλισμού επιτρέπουν επίσης την ενσωμάτωση fNIRS/fMRI. Χάρη στον αρθρωτό σχεδιασμό των συσκευών NIRx, ο αριθμός των πηγών και ανιχνευτών fNIRS μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με την προβλεπόμενη κάλυψη [60].



Εικόνα 8 Στατιστικά αποτελέσματα της OT (επάνω σειρά) και της μαγνητικής τομογραφίας (κάτω σειρά) με χρήση δεξιών και αριστερών δακτύλων. Επισημαίνεται ότι η υψηλή ενεργοποίηση κωδικοποιείται με μπλε χρώμα (αρνητικές τιμές t) στους χάρτες OT. Τα αποτελέσματα της

3.3 Επίλογος

Εν κατακλείδι, αυτό το κεφάλαιο εμβαθύνει στις ιδιαιτερότητες της Λειτουργικής Φασματοσκοπίας Εγγύς Υπέρυθρης Ακτινοβολίας (fNIRS), τονίζοντας τη σημασία της ως μη επεμβατικής τεχνικής οπτικής απεικόνισης για τη μέτρηση των μεταβολών στις συγκεντρώσεις οξυγονωμένης και αποξυγονωμένης αιμοσφαιρίνης στον εγκέφαλο. Τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, η fNIRS έχει εξελιχθεί σε μια αποτελεσματική νευροτεχνολογία, η οποία έχει γίνει πιο προσιτή και εφαρμόσιμη σε διάφορα πλαίσια, συμπεριλαμβανομένων των διερευνητικών μελετών και των κλινικών παρεμβάσεων. Οι δυνατότητες αξιολόγησης σε πραγματικό χρόνο την καθιστούν ιδιαίτερα πολύτιμη για τη διερεύνηση της λειτουργίας του εγκεφάλου και την πρόληψη πιθανών νευρικών βλαβών, όπως κατά τη διάρκεια καρδιοχειρουργικών επεμβάσεων.

Το κεφάλαιο υπογραμμίζει το ιστορικό πλαίσιο της fNIRS, εντοπίζοντας τις ρίζες της στην πρωτοποριακή εργασία του Jöbsis το 1977. Με την πάροδο των ετών, το fNIRS έχει αποδειχθεί αποτελεσματικό στην παρακολούθηση των τοπικών μεταβολών της εγκεφαλικής οξυγόνωσης και της αιμοδυναμικής κατά τη διάρκεια της ενεργοποίησης του εγκεφάλου. Η ικανότητά της να παρέχει πληροφορίες για τα πρωτόκολλα που σχετίζονται με την άσκηση, ιδίως στο πλαίσιο περιβαλλοντικών χειρισμών όπως ακουστικά ή οπτικά ερεθίσματα, την καθιστά ένα ευέλικτο εργαλείο για τη μελέτη του μεταβολισμού της άσκησης και των μηχανισμών του εγκεφάλου.

Η συζήτηση επεκτείνεται στην εφαρμογή του fNIRS σε διάφορους πληθυσμούς, συμπεριλαμβανομένων των νεογέννητων και των βρεφών. Η πορώδης φύση του κεφαλιού τους επιτρέπει τη διείσδυση του υπέρυθρου φωτός με ελάχιστες παρεμβολές, επιτρέποντας μελέτες σχετικά με τις επιδράσεις διαφόρων ερεθισμάτων στις αιμοδυναμικές αποκρίσεις του βρεφικού εγκεφάλου. Έχουν χρησιμοποιηθεί κινητικά παραδείγματα και εργασίες, όπως το δάκτυλο και το πάτημα κουμπιών, που αποκάλυψαν πρότυπα εγκεφαλικής αιμοδυναμικής δραστηριότητας που συνάδουν με μελέτες fMRI.

Μελέτες fNIRS που σχετίζονται με την άσκηση, όπως αυτές που διεξήχθησαν από τους Tempest et al., (2014) [42] και Chang et al., (2013) [43], καταδεικνύουν την ικανότητα της τεχνολογίας να εξετάζει τη λειτουργικότητα του προμετωπιαίου φλοιού και την επίδρασή της στις συναισθηματικές αντιδράσεις κατά τη διάρκεια διαφορετικών εντάσεων άσκησης. Επιπλέον, διερευνάται η δυνατότητα της μουσικής να επηρεάζει τον γνωστικό έλεγχο και να καθυστερεί την υποκειμενική εμπειρία της κόπωσης, ρίχνοντας φως στον ρόλο του ραχιαίου προμετωπιαίου φλοιού.

Μια κρίσιμη πτυχή που συζητείται είναι η σύγκριση μεταξύ της fNIRS και της μαγνητικής τομογραφίας, ιδίως της λειτουργικής μαγνητικής τομογραφίας (fMRI). Ενώ η fMRI παραμένει το χρυσό πρότυπο για την in vivo απεικόνιση του εγκεφάλου, η fNIRS ξεχωρίζει για τη φορητότητά της, την αντοχή της στο θόρυβο και την υψηλότερη χρονική ανάλυση. Το κεφάλαιο δίνει έμφαση στη συμπληρωματική φύση της fNIRS και της fMRI, τονίζοντας ότι ο συνδυασμός τους μπορεί να παρέχει αποχρώσεις της εγκεφαλικής λειτουργίας, ξεπερνώντας τους εγγενείς περιορισμούς.

Επιπλέον, το κεφάλαιο διερευνά τις τεχνικές πτυχές της fMRI, περιγράφοντας λεπτομερώς τη χρήση ισχυρών μαγνητών, ρευμάτων ραδιοσυχνότητας και σκιαγραφικών παραγόντων για την απεικόνιση. Η συζήτηση επεκτείνεται στη λειτουργική μαγνητική τομογραφία (fMRI), η οποία παρατηρεί τις δομές του εγκεφάλου και προσδιορίζει τις ενεργοποιημένες περιοχές κατά τη διάρκεια γνωστικών εργασιών.

Παρά την κυριαρχία της στην έρευνα χαρτογράφησης του εγκεφάλου, η fMRI έχει περιορισμούς, όπως το κόστος και η ανάγκη για ελεγχόμενο περιβάλλον.

Τέλος εξετάζονται διεξοδικά τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες της fNIRS σε σύγκριση με την fMRI. Η φορητότητα και η αντίσταση στην κίνηση του fNIRS το καθιστούν κατάλληλο για ρεαλιστικά περιβάλλοντα, αν και με χαμηλότερη χωρική ανάλυση. Το κεφάλαιο υπογραμμίζει το αυξανόμενο ενδιαφέρον για ταυτόχρονες μετρήσεις fNIRS και fMRI για την επικύρωση της fNIRS και τη διερεύνηση των συσχετίσεων μεταξύ των δύο τεχνικών.

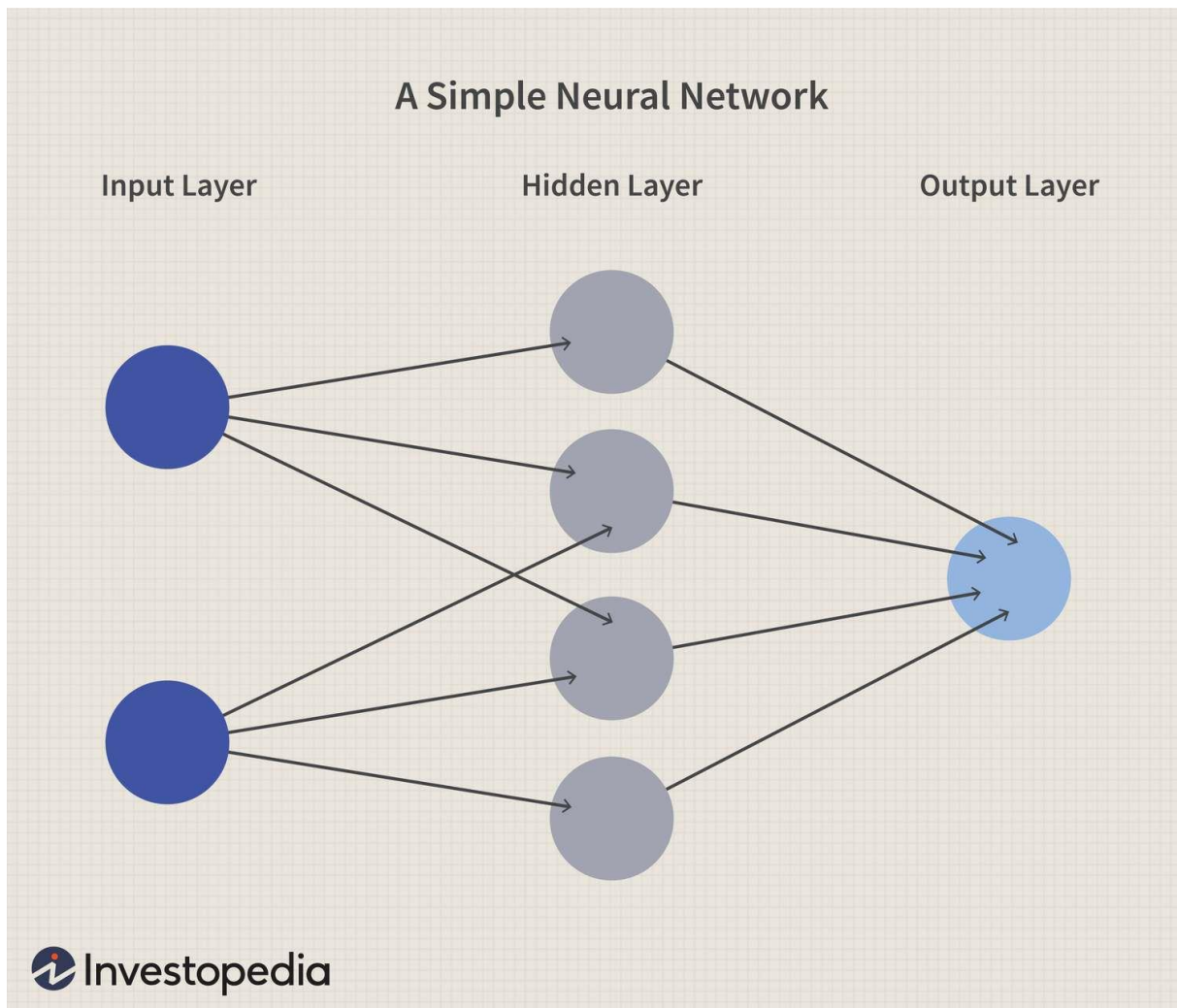
Κεφάλαιο 4ο: Νευρωνικά δίκτυα

4.1 Ορισμός

Τα νευρωνικά δίκτυα είναι μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούν αλγόριθμους μάθησης εμπνευσμένους από τον εγκέφαλο για την αποθήκευση πληροφοριών. Δεδομένου ότι τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται σε μηχανές, ονομάζονται συλλογικά "τεχνητά νευρωνικά δίκτυα". Σήμερα, ο όρος μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται συχνά σε αυτόν τον τομέα και είναι ο επιστημονικός κλάδος που ασχολείται με τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη αλγορίθμων που επιτρέπουν στους υπολογιστές να μαθαίνουν, με βάση δεδομένα, όπως από δεδομένα αισθητήρων ή βάσεις δεδομένων. Μια σημαντική εστίαση της έρευνας για τη μηχανική μάθηση είναι η αυτόματη μάθηση για την αναγνώριση σύνθετων μοτίβων και τη λήψη έξυπνων αποφάσεων με βάση δεδομένα. Ως εκ τούτου, η μηχανική μάθηση συνδέεται στενά με τομείς όπως η στατιστική, η εξόρυξη δεδομένων, η αναγνώριση προτύπων και η τεχνητή νοημοσύνη. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι ένα δημοφιλές πλαίσιο για την εκτέλεση της μηχανικής μάθησης, αλλά υπάρχουν πολλές άλλες μέθοδοι μηχανικής μάθησης, όπως η λογιστική παλινδρόμηση και οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης [61].

Παρόμοια με τον εγκέφαλο, τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από πολλούς νευρώνες με πολλές συνδέσεις μεταξύ τους. Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές για τη μοντελοποίηση των άγνωστων σχέσεων μεταξύ διαφόρων παραμέτρων με βάση μεγάλο αριθμό παραδειγμάτων. Παραδείγματα επιτυχημένων εφαρμογών των νευρωνικών δικτύων είναι οι ταξινομήσεις χειρόγραφων ψηφίων, η αναγνώριση ομιλίας και η πρόβλεψη των τιμών των μετοχών. Επιπλέον, τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε ιατρικές εφαρμογές. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι νευρωνικών δικτύων. Παραδείγματα διαφόρων τύπων νευρωνικών δικτύων είναι το δίκτυο Hopfield, το πολυεπίπεδο perceptron, η μηχανή Boltzmann και το δίκτυο Kohonen. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο και επιτυχημένο νευρωνικό δίκτυο είναι το πολυεπίπεδο perceptron [62].

Το πρώτο βήμα προς τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έγινε το 1943, όταν ο Warren McCulloch, ένας νευροφυσιολόγος, και ένας νεαρός μαθηματικός, ο Walter Pitts, έγραψαν μια εργασία για το πώς θα μπορούσαν να λειτουργούν οι νευρώνες. Μοντελοποίησαν ένα απλό νευρωνικό δίκτυο με ηλεκτρικά κυκλώματα. Στη δεκαετία του 1950, η εργασία του Rosenblatt οδήγησε σε ένα δίκτυο δύο επιπέδων, το perceptron, το οποίο ήταν ικανό να μαθαίνει ορισμένες ταξινομήσεις προσαρμόζοντας τα βάρη των συνδέσεων, αλλά είχε επίσης ορισμένους περιορισμούς. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, οι ερευνητές έδειξαν ανανεωμένο ενδιαφέρον για τα νευρωνικά δίκτυα [61].



Εικόνα 9 Απλό νευρωνικό δίκτυο Investopedia (2020) [63]

4.1.1.1 Τύποι τριών επιπέδων νευρωνικού δικτύου

Νευρωνικά δίκτυα τροφοδότησης προς τα εμπρός

Τα νευρωνικά δίκτυα τροφοδότησης προς τα εμπρός είναι ένας από τους πιο απλούς τύπους νευρωνικών δικτύων. Μεταφέρουν πληροφορίες προς μία κατεύθυνση μέσω των κόμβων εισόδου- οι πληροφορίες αυτές συνεχίζουν να επεξεργάζονται προς αυτή τη μοναδική κατεύθυνση μέχρι να φτάσουν στη λειτουργία εξόδου. Τα νευρωνικά δίκτυα τροφοδότησης προς τα εμπρός μπορούν να έχουν κρυφά επίπεδα για λειτουργικότητα και αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται συχνότερα για τεχνολογίες αναγνώρισης προσώπου [64].

Αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα

Ένας πιο σύνθετος τύπος νευρωνικού δικτύου, τα αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα (RNN) λαμβάνουν την έξοδο ενός κόμβου επεξεργασίας και μεταδίδουν τις πληροφορίες πίσω στο δίκτυο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη θεωρητική "εκμάθηση" και βελτίωση του δικτύου. Κάθε κόμβος αποθηκεύει ιστορικές διεργασίες και αυτές οι ιστορικές διεργασίες επαναχρησιμοποιούνται στο μέλλον κατά την επεξεργασία. Αυτό καθίσταται ιδιαίτερα κρίσιμο για τα δίκτυα στα οποία η πρόβλεψη είναι λανθασμένη- το σύστημα θα προσπαθήσει να μάθει γιατί προέκυψε το σωστό αποτέλεσμα και να προσαρμοστεί ανάλογα. Αυτός ο τύπος νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές μετατροπής κειμένου σε ομιλία [65].

Συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα

Τα συνεπτυγμένα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία αποκαλούνται επίσης ConvNets ή CNN, έχουν πολλά επίπεδα στα οποία τα δεδομένα ταξινομούνται σε κατηγορίες. Αυτά τα δίκτυα έχουν ένα στρώμα εισόδου, ένα στρώμα εξόδου και ένα κρυφό πλήθος στρωμάτων συμβολής στο ενδιάμεσο. Τα στρώματα δημιουργούν χάρτες χαρακτηριστικών που καταγράφουν περιοχές μιας εικόνας οι οποίες αναλύονται περαιτέρω μέχρι να δημιουργήσουν πολύτιμες εξόδους. Αυτά τα στρώματα μπορούν να είναι συγκεντρωμένα ή να συνδεθούν εξ ολοκλήρου και αυτά τα δίκτυα είναι ιδιαίτερα ωφέλιμα για εφαρμογές αναγνώρισης εικόνων [66].

Νευρωνικά δίκτυα αποσυμβολής

Τα αποσυμβολικά νευρωνικά δίκτυα λειτουργούν απλώς αντίστροφα από τα νευρωνικά δίκτυα συμβολής. Η εφαρμογή του δικτύου είναι η ανίχνευση στοιχείων που μπορεί να έχουν αναγνωριστεί ως σημαντικά στο πλαίσιο ενός νευρωνικού δικτύου συνελικτικής ανάλυσης. Αυτά τα στοιχεία θα είχαν πιθανότητα απορριφθεί κατά τη διαδικασία εκτέλεσης του νευρωνικού δικτύου συνελίξεων. Αυτός ο τύπος νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιείται επίσης ευρέως για την ανάλυση ή την επεξεργασία εικόνων [67].

Αρθρωτά νευρωνικά δίκτυα

Τα αρθρωτά νευρωνικά δίκτυα περιέχουν διάφορα δίκτυα που λειτουργούν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Αυτά τα δίκτυα δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας ανάλυσης. Αντίθετα, οι διαδικασίες αυτές γίνονται για να επιτρέψουν την αποτελεσματικότερη εκτέλεση πολύπλοκων, περίπλοκων υπολογιστικών διαδικασιών. Παρόμοια με άλλες σπονδυλωτές βιομηχανίες, όπως η σπονδυλωτή ακίνητη περιουσία, ο στόχος της ανεξαρτησίας του δικτύου είναι να είναι κάθε ενότητα υπεύθυνη για ένα συγκεκριμένο μέρος μιας συνολικής μεγαλύτερης εικόνας [68].

4.2 Σημαντικότητα

Τα νευρωνικά δίκτυα διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης, προσφέροντας μια μετασχηματιστική προσέγγιση στην επίλυση προβλημάτων και τη μάθηση. Η σημασία των νευρωνικών δικτύων έγκειται στην ικανότητά τους να προσομοιάζουν την αρχιτεκτονική του ανθρώπινου εγκεφάλου, επιτρέποντας στις μηχανές να επεξεργάζονται τεράστιες ποσότητες δεδομένων, να αναγνωρίζουν μοτίβα και να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις. Αυτή η ικανότητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε εργασίες όπως η αναγνώριση εικόνων και ομιλίας, η επεξεργασία φυσικής γλώσσας και η ανάλυση σύνθετων δεδομένων. Η προσαρμοστικότητα των νευρωνικών δικτύων τους επιτρέπει να μαθαίνουν από την εμπειρία, βελτιώνοντας συνεχώς την απόδοσή τους με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η ικανότητα αυτοεκμάθησης τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές όπου τα υποκείμενα πρότυπα μπορεί να εξελίσσονται ή να αλλάζουν, παρέχοντας μια ευέλικτη λύση για την αντιμετώπιση δυναμικών προκλήσεων του πραγματικού κόσμου [69].

Επιπλέον, η ευρεία υιοθέτηση των νευρωνικών δικτύων έχει οδηγήσει σε εξελίξεις σε διάφορους κλάδους, όπως η υγειονομική περίθαλψη, η χρηματοδότηση και η τεχνολογία. Στην υγειονομική περίθαλψη, για παράδειγμα, τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ιατρικών εικόνων, στην πρόβλεψη διαγνώσεων και στην ανακάλυψη φαρμάκων, ενισχύοντας την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα των ιατρικών διαδικασιών. Στον χρηματοπιστωτικό τομέα, χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση απάτης, την αξιολόγηση κινδύνων και την ανάλυση της αγοράς. Η ικανότητα των νευρωνικών δικτύων να αντλούν πληροφορίες από πολύπλοκα σύνολα δεδομένων συμβάλλει στην πιο

τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων σε διάφορους τομείς, υπογραμμίζοντας τη σημασία τους στη διαμόρφωση του μέλλοντος της τεχνολογίας και των μεθοδολογιών επίλυσης προβλημάτων [69].

4.3 Επίλογος

Εν κατακλείδι, το κεφάλαιο αυτό εξετάζει τον ορισμό, την ιστορική εξέλιξη, τους τύπους και τη σημασία των νευρωνικών δικτύων στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης. Τα νευρωνικά δίκτυα, ως τεχνητά μοντέλα εμπνευσμένα από τον ανθρώπινο εγκέφαλο, χρησιμοποιούν αλγόριθμους μάθησης εμπνευσμένους από τον εγκέφαλο για την αποθήκευση και την επεξεργασία πληροφοριών. Ο ευρύτερος κλάδος της μηχανικής μάθησης, που περιλαμβάνει αλγόριθμους που διευκολύνουν τους υπολογιστές να μαθαίνουν από δεδομένα, είναι στενά συνυφασμένος με τα νευρωνικά δίκτυα. Αν και υπάρχουν διάφορες μέθοδοι μηχανικής μάθησης, τα νευρωνικά δίκτυα, ιδίως το πολυεπίπεδο perceptron, ξεχωρίζουν ως ένα δημοφιλές και επιτυχημένο πλαίσιο.

Η ιστορική διαδρομή των νευρωνικών δικτύων χρονολογείται από το πρωτοποριακό έργο των Warren McCulloch και Walter Pitts το 1943, ακολουθούμενο από το perceptron του Rosenblatt τη δεκαετία του 1950. Τη δεκαετία του 1980 το ενδιαφέρον για τα νευρωνικά δίκτυα αναζωπυρώθηκε, σηματοδοτώντας μια κομβική εποχή στην ανάπτυξή τους. Το κεφάλαιο αυτό διερευνά περαιτέρω τους διάφορους τύπους νευρωνικών δικτύων, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων τροφοδότησης προς τα εμπρός, των αναδρομικών, των συνελκτικών, των αποκωδικοποιημένων και των αρθρωτών δικτύων, καθένα από τα οποία είναι προσαρμοσμένο σε συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως η αναγνώριση προσώπου, η μετατροπή κειμένου σε ομιλία, η ανάλυση εικόνας και ο αρθρωτός υπολογισμός.

Η σημασία των νευρωνικών δικτύων έγκειται στην ικανότητά τους να προσομοιώνουν την αρχιτεκτονική του ανθρώπινου εγκεφάλου, επιτρέποντας στις μηχανές να επεξεργάζονται τεράστιες ποσότητες δεδομένων, να αναγνωρίζουν μοτίβα και να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις. Η προσαρμοστικότητά τους και η ικανότητα αυτοεκμάθησης καθιστούν τα νευρωνικά δίκτυα ανεκτίμητα για εργασίες όπως η αναγνώριση εικόνας και ομιλίας, η επεξεργασία φυσικής γλώσσας και η ανάλυση σύνθετων δεδομένων. Ο μετασχηματιστικός αντίκτυπος των νευρωνικών δικτύων εκτείνεται σε διάφορους κλάδους, με αξιοσημείωτες συνεισφορές στην υγειονομική περίθαλψη, τα χρηματοοικονομικά και την τεχνολογία. Στην υγειονομική περίθαλψη, ενισχύουν την ανάλυση ιατρικών εικόνων, την πρόβλεψη διαγνώσεων και την ανακάλυψη φαρμάκων, ενώ στα χρηματοοικονομικά, βοηθούν στην ανίχνευση απάτης, την αξιολόγηση κινδύνων και την ανάλυση της αγοράς.

Κεφάλαιο 5ο:

5.1 Βασικά χαρακτηριστικά ενός σήματος fNIRS

Ακολουθούν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά ενός σήματος fNIRS και μια σύντομη επισκόπηση της δομής του:

1. Αρχή λειτουργίας:

- Το fNIRS βασίζεται στην αρχή ότι η οξυγονωμένη και η αποξυγονωμένη αιμοσφαιρίνη έχουν διαφορετικό φάσμα απορρόφησης στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου.
- Μετρά τις μεταβολές στη συγκέντρωση αυτών των ειδών αιμοσφαιρίνης για να συμπεράνει τη νευρική δραστηριότητα.

2. Μήκη κύματος:

- Το fNIRS χρησιμοποιεί συνήθως φως στο εγγύς υπέρυθρο στην περιοχή των 650 έως 1000 nm.
- Το εγγύς υπέρυθρο φως μπορεί να διεισδύσει στους βιολογικούς ιστούς, επιτρέποντας μετρήσεις από την επιφάνεια του τριχωτού της κεφαλής.

3. Πηγή φωτός και ανιχνευτές:

- Το σύστημα fNIRS αποτελείται από πηγές φωτός (πομπούς) και ανιχνευτές που τοποθετούνται στο τριχωτό της κεφαλής.
- Το εκπεμπόμενο φως διέρχεται από το τριχωτό της κεφαλής και το κρανίο και οι ανιχνευτές μετρούν την ένταση του εκπεμπόμενου ή ανακλώμενου φωτός.

4. Αιμοδυναμική απόκριση:

- Η νευρική δραστηριότητα οδηγεί σε αλλαγές στην περιφερειακή εγκεφαλική ροή αίματος και στην οξυγόνωση.
- Αυτό, με τη σειρά του, προκαλεί μεταβολές στη συγκέντρωση της οξυγονωμένης (HbO₂) και της αποξυγονωμένης (HHb) αιμοσφαιρίνης, που είναι συλλογικά γνωστές ως αιμοδυναμική απόκριση.

5. Χρονική ανάλυση:

- Το fNIRS έχει σχετικά καλή χρονική ανάλυση, καταγράφοντας αλλαγές στη νευρική δραστηριότητα της τάξης των δευτερολέπτων.
- Ωστόσο, δεν είναι τόσο γρήγορη όσο ορισμένες άλλες τεχνικές νευροαπεικόνισης, όπως το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG).

6. Χωρική ανάλυση:

- Η χωρική ανάλυση της fNIRS είναι περιορισμένη σε σύγκριση με τεχνικές όπως η λειτουργική απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού (fMRI).
- Παρέχει εντοπισμένες πληροφορίες σχετικά με τις αλλαγές στη συγκέντρωση αιμοσφαιρίνης στις συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος.

7. Ευαισθησία σε αντικείμενα:

- Τα σήματα fNIRS μπορούν να επηρεαστούν από τα τεχνουργήματα κίνησης, το φως του περιβάλλοντος και τις συστηματικές φυσιολογικές μεταβολές.
- Για τη βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων χρησιμοποιούνται συχνά κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας σήματος και αφαίρεσης των τεχνουργημάτων.

8. Εφαρμογές:

- Το fNIRS χρησιμοποιείται σε ποικίλες εφαρμογές, όπως η γνωστική νευροεπιστήμη, οι διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή, η παρακολούθηση της λειτουργίας του εγκεφάλου κατά τη διάρκεια εργασιών και η μελέτη αναπτυξιακών διαταραχών.

9. Ανάλυση δεδομένων:

- Τα καταγεγραμμένα δεδομένα fNIRS υποβάλλονται συνήθως σε επεξεργασία για την εξαγωγή αιμοδυναμικών αλλαγών.
- Για την ερμηνεία των δεδομένων εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές ανάλυσης, όπως φιλτράρισμα σήματος, στατιστική ανάλυση και ανάλυση λειτουργικής συνδεσιμότητας [70].

Ο χρόνος απόκρισης της λειτουργικής φασματοσκοπίας στο εγγύς υπέρυθρο (fNIRS) στις μεταβολές των επιπέδων οξυγονωμένης (HbO) και αποξυγονωμένης (HbR) αιμοσφαιρίνης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της συγκεκριμένης περιοχής του εγκεφάλου, της φύσης του ερεθίσματος και της ατομικής μεταβλητότητας. Σε γενικές γραμμές, η αιμοδυναμική απόκριση που μετράται με fNIRS παρουσιάζει ένα χαρακτηριστικό σχήμα με αρχική βύθιση, ακολουθούμενη από αύξηση της HbO και καθυστερημένη μείωση της HbR. Η χρονική πορεία αυτής της απόκρισης αναφέρεται συχνά ως συνάρτηση αιμοδυναμικής απόκρισης (HRF). Η αιχμή της απόκρισης HbO εμφανίζεται συνήθως περίπου 6 έως 10 δευτερόλεπτα μετά την έναρξη ενός ερεθίσματος, ενώ η απόκριση HbR κορυφώνεται λίγο αργότερα. Η πλήρης διάρκεια της απόκρισης, συμπεριλαμβανομένης της επιστροφής στη βασική γραμμή, μπορεί να εκτείνεται για 20 δευτερόλεπτα ή και περισσότερο, ανάλογα με τις συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι ατομικές παραλλαγές, ο πειραματικός σχεδιασμός και η συγκεκριμένη γνωστική διαδικασία που μελετάται μπορούν να επηρεάσουν τα χρονικά χαρακτηριστικά της απόκρισης fNIRS. Οι ερευνητές συχνά αναλύουν τη χρονική πορεία των μεταβολών των HbO και HbR για να αποκτήσουν πληροφορίες σχετικά με τη νευροαγγειακή σύζευξη και την εγκεφαλική δραστηριότητα που σχετίζονται με συγκεκριμένες εργασίες ή ερεθίσματα [71].

Σύμφωνα με Nguyen εγκεφαλική δραστηριότητα μοντελοποιείται σε γραμμική μορφή ως εξής:

$$y(t) = a_1 u(t) + a_2 \Delta u(t) + a_3 \Delta^2 u(t) + a_4 y_{SS}(t) + \sum_{m=1}^q b_m \sin(2\pi f_m t) + b_0 y_b + \varepsilon(t), \quad (1)$$

όπου το t συμβολίζει τον διακριτό χρόνο, το $y(t)$ αντιπροσωπεύει το μετρούμενο σήμα HR που λαμβάνεται από ένα ζεύγος οπτοδίων μακράς απόστασηςτη χρονική στιγμή t - το $u(t)$ συμβολίζει το αναμενόμενο HR που παράγεται από ένα μοντέλο χώρου καταστάσεων - το $\Delta u(t)$ και το $\Delta^2 u(t)$ συμβολίζουν την πρώτη και τη δεύτερη παράγωγο του $u(t)$, αντίστοιχα, (στον οποίο ο δείκτης SS αναφέρεται σε σύντομο διαχωρισμό) υποδηλώνει τον εξωεγκεφαλικό φυσιολογικό θόρυβο στο επιφανειακό στρώμα - f_m υποδηλώνει τις συχνότητες των φυσιολογικών θορύβων- q υποδηλώνει τον συνολικό αριθμό των φυσιολογικών θορύβων (στην παρούσα μελέτη, το q ορίζεται σε 3)- y_b υποδηλώνει τον όρο που εισάγεται για τη διόρθωση της βασικής γραμμής ανά δοκιμή- $\varepsilon(t)$ υποδηλώνει τον λευκό γκαουσιανό θόρυβο και $a_1, a_2, \dots, a_4, b_1, b_2, \dots, b_q$ και b_0 υποδηλώνουν άγνωστους συντελεστές που πρέπει να εκτιμηθούν.

Η εξίσωση (1) αναδιατυπώνεται ως εξής:

$$y(t) = \varphi^T(t)\beta(t) + \varepsilon(t), \quad (2)$$

όπου $\varphi(t) = [u(t) \Delta u(t) \Delta^2 u(t) y_{SS}(t) \sin(2\pi f_1 t) \sin(2\pi f_2 t) \dots \sin(2\pi f_q t) 1]^T$ συμβολίζει το διάνυσμα παλινδρόμησης, $\beta(t) = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_4 \ b_1 \ \dots \ b_q \ b_0]^T$ συμβολίζει το άγνωστο διάνυσμα των συντελεστών και ο δείκτης T συμβολίζει τον τελεστή μεταφοράς. Επιπλέον, το $\beta(t)$ εκτιμάται με την προσέγγιση RLSE. Έτσι, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2), η εκτιμώμενη εγκεφαλική δραστηριότητα αναπαρίσταται ως εξής:

$$\hat{y}(t) = \varphi^T(t)\hat{\beta}(t) + \varepsilon(t), \quad (3)$$

όπου $\hat{\beta}(t)$ συμβολίζει τις εκτιμώμενες τιμές. Συμβολίζουμε

$$\hat{\beta}(t) = [\hat{a}_1 \ \hat{a}_2 \ \dots \ \hat{a}_4 \ \hat{b}_1 \ \dots \ \hat{b}_q \ \hat{b}_0]^T \quad \text{ως το εκτιμώμενο διάνυσμα παραμέτρων, το οποίο προκύπτει από τη βελτιστοποίηση της συνάρτησης κόστους}$$

$$J(\beta, t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^t \lambda^{t-k} (y(k) - \varphi^T(k)\beta)^2 \quad (\text{όπου } \lambda \text{ συμβολίζει τον παράγοντα λήθης}).$$

Ο αναδρομικός νόμος ενημέρωσής του δίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \hat{\beta}(t+1) &= \hat{\beta}(t) + P(t)\varphi(t)(y(t+1) - \varphi^T(t)\hat{\beta}(t)), \\ P(t) &= P(t-1) - P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1) / (1 + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

όπου $P(t)$ συμβολίζει τον πίνακα συνδιακύμανσης. Υποθέτουμε ότι $e(t) = y(t) - \varphi^T(t)\hat{\beta}(t)$ είναι το σφάλμα εκτίμησης.

Πρώτον, για να εξαλειφθεί η πιθανή συμβολή των επιφανειακών θορύβων στη σύγκριση, τα κανάλια SS αγνοούνται. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται τα δύο ακόλουθα μοντέλα.

$$\hat{y}(t) = \hat{a}_1 u(t) + \hat{a}_2 \Delta u(t) + \hat{a}_3 \Delta^2 u(t) + \sum_{m=1}^q \hat{b}_m \sin(2\pi f_m t) + \hat{b}_0 y_b + \varepsilon(t), \quad (5)$$

$$\hat{y}(t) = \hat{a}_1 u(t) + \hat{a}_2 \Delta u(t) + \hat{a}_3 \Delta^2 u(t) + \sum_{m=1}^q \hat{b}_m \sin(2\pi \hat{f}_m t) + \hat{b}_0 y_b + \varepsilon(t). \quad (6)$$

[76].

5.1.1 Cardiac wave

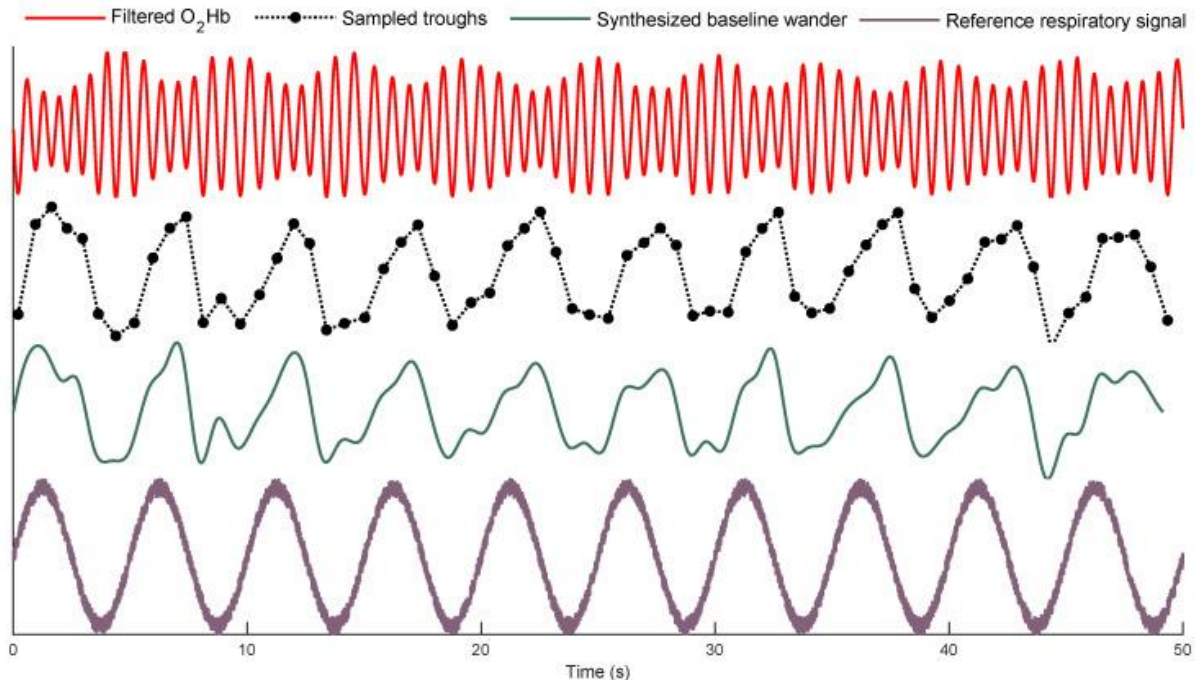
Ενώ το fNIRS χρησιμοποιείται κυρίως για τη μελέτη της εγκεφαλικής λειτουργίας, τα ακατέργαστα σήματά του καταγράφουν επίσης τις συστηματικές ταλαντώσεις που συνδέονται με φυσιολογικές διεργασίες, όπως ο καρδιακός παλμός. Παρά το γεγονός ότι συχνά αφαιρούνται κατά την επεξεργασία των δεδομένων, αυτές οι ταλαντώσεις που σχετίζονται με την καρδιά στα σήματα fNIRS περιέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την καρδιακή δυναμική. Ο καρδιακός κύκλος, που χαρακτηρίζεται από τη ρυθμική συστολή και χαλάρωση της καρδιάς, παράγει μια ξεχωριστή κυματομορφή γνωστή ως καρδιακό κύμα. Το κύμα αυτό αντανακλάται στα ακατέργαστα δεδομένα fNIRS, προσφέροντας πληροφορίες για τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ της καρδιαγγειακής λειτουργίας και της εγκεφαλικής δραστηριότητας. Η νευρική ενεργοποίηση αυξάνει τις μεταβολικές απαιτήσεις του εγκεφάλου, οδηγώντας σε αλλαγές στη ροή του αίματος και στις συγκεντρώσεις αιμοσφαιρίνης. Αυτές οι αλλαγές, με τη σειρά τους, επηρεάζουν το καρδιακό κύμα εντός του σήματος fNIRS.

Η μελέτη των Mirbagheri et al., (2019), αποκάλυψε ότι το σήμα του ηλεκτροκαρδιογραφήματος (ΗΚΓ) που προέρχεται από τον καρδιακό ρυθμό (RHR) και το σήμα του καρδιακού ρυθμού που εξάγεται από τη λειτουργική φασματοσκοπία εγγύς υπερύθρου (fNIRS), που ονομάζεται EHR, περιέχουν τόσο καρδιακές όσο και εγκεφαλικές αποκρίσεις. Χρησιμοποιώντας Ανάλυση ανεξάρτητων συνιστωσών (ICA) και ανακατασκευάζοντας τις λιγότερο συσχετιζόμενες συνιστώσες με το RHR, το προκύπτον σήμα EHR επέδειξε σημαντική συσχέτιση με τα σήματα fNIRS. Το ανακατασκευασμένο σήμα EHR, το οποίο περιέχει αποκρίσεις που σχετίζονται με τον εγκέφαλο, αποδείχθηκε αποτελεσματικό για την αξιολόγηση του ψυχικού στρες με τη χρήση ενός ταξινομητή διανυσματικής μηχανής υποστήριξης (SVM). Ο ταξινομητής SVM πέτυχε ακρίβεια $97,3 \pm 0,9\%$, ξεπερνώντας τις ακρίβειες που επιτεύχθηκαν μόνο με τα σήματα RHR, fNIRS και τα αρχικά σήματα EHR κατά 30,8%, 13% και 1,8%, αντίστοιχα. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το σήμα EHR, που συνδυάζει τις αποκρίσεις της καρδιάς και του εγκεφάλου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του στρες μέσω μιας ενιαίας φορητής συσκευής NIRS [72].

5.1.2 Respiratory wave

Η μελέτη των Hakimi et al., (2022), προτείνει μια νέα μέθοδο για την εκτίμηση του αναπνευστικού ρυθμού (RR) από τα σήματα της λειτουργικής φασματοσκοπίας εγγύς υπερύθρου (fNIRS), με βάση τις αλλαγές στη βασική γραμμή περιπλάνησης της συγκέντρωσης οξυγονωμένης αιμοσφαιρίνης. Η μέθοδος, η οποία δοκιμάστηκε σε δύο σύνολα δεδομένων, επιδεικνύει υποσχόμενα αποτελέσματα με χαμηλά μέσα απόλυτα σφάλματα μεταξύ των RR αναφοράς και των εκτιμώμενων RR (2,6 και 1,3

αναπνοές ανά λεπτό, αντίστοιχα), υποδεικνύοντας τη σκοπιμότητα της χρήσης του fNIRS για την εκτίμηση του RR. Η μελέτη υπογραμμίζει τη δυνατότητα να ληφθεί υπόψη η αναπνευστική παρεμβολή ως πηγή συμπληρωματικών πληροφοριών στην ανάλυση fNIRS, ανοίγοντας νέους δρόμους για την κατανόηση της δυναμικής σχέσης μεταξύ της αναπνευστικής δυναμικής και της εγκεφαλικής δραστηριότητας [73].



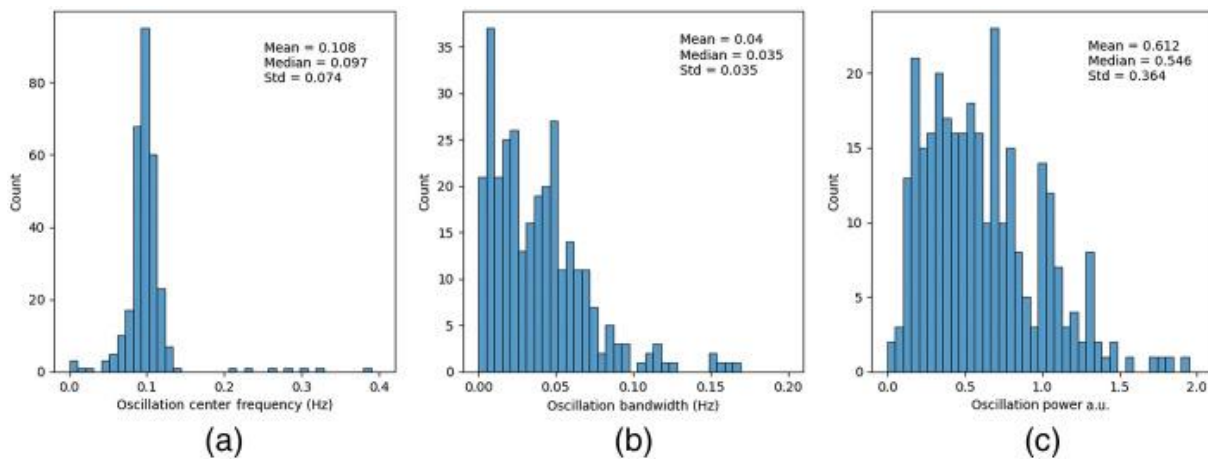
Εικόνα 10 Ένα παράδειγμα του φιλτραρισμένου σήματος O₂Hb, των αντίστοιχων περιπλανήσεων της βασικής γραμμής και του αναπνευστικού σήματος αναφοράς.

5.1.3 Mayer wave

Στόχος της μελέτης των Luke, Shader, & McAlpine, (2021), ήταν να χαρακτηριστούν οι ταλαντώσεις των κυμάτων Mayer στο σήμα της λειτουργικής φασματοσκοπίας στο εγγύς υπέρυθρο (fNIRS), αυθόρμητες ταλαντώσεις της αρτηριακής πίεσης, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τις αιμοδυναμικές αποκρίσεις του φλοιού που σχετίζονται με τη νευρική δραστηριότητα. Οι παράμετροι ταλάντωσης εξήχθησαν από 310 μετρήσεις fNIRS, αποκαλύπτοντας ταλαντώσεις κύματος Mayer με μέση συχνότητα 0,108 Hz, εύρος ζώνης 0,04 Hz και ισχύ 3,5 $\mu\text{M}^2/\text{Hz}$. Η κατανομή της ισχύος των ταλαντώσεων ήταν θετικά λοξή, με ορισμένες μετρήσεις να εμφανίζουν μεγάλα κύματα Mayer.

Ο αντίκτυπος της διόρθωσης βραχέων καναλιών στην ισχύ των ταλαντώσεων των κυμάτων Mayer αξιολογήθηκε σε 222 μετρήσεις, αποδεικνύοντας ότι η διόρθωση αυτή μείωσε σημαντικά το πλάτος των ανεπιθύμητων σημάτων, ιδίως σε καταγραφές με μεγαλύτερες ταλαντώσεις των κυμάτων Mayer. Η μελέτη συνέστησε τη χρήση διόρθωσης μικρού καναλιού για την εξασθένιση των κυμάτων Mayer, ιδίως σε συμμετέχοντες με σημαντικές ταλαντώσεις. Η μέθοδος εφαρμόστηκε επίσης σε ένα υποσύνολο 17 μετρήσεων fNIRS κατά τη διάρκεια ενός πειράματος παθητικής ακουστικής ανίχνευσης ομιλίας, καταδεικνύοντας το πρακτικό όφελος της διόρθωσης μικρού καναλιού για τη μείωση των κυμάτων Mayer και τη βελτίωση της ανίχνευσης της απόκρισης. Η μέθοδος FOOOF συνιστάται για την ποσοτικοποίηση της ταλαντωτικής δραστηριότητας των κυμάτων Mayer σε σήματα fNIRS και την αξιολόγηση αλγορίθμων που έχουν σχεδιαστεί για τον μετριάσμο των συστηματικών συνιστωσών στις αιμοδυναμικές αποκρίσεις. Τα ευρήματα συμβάλλουν στην κατανόηση και την αντιμετώπιση της

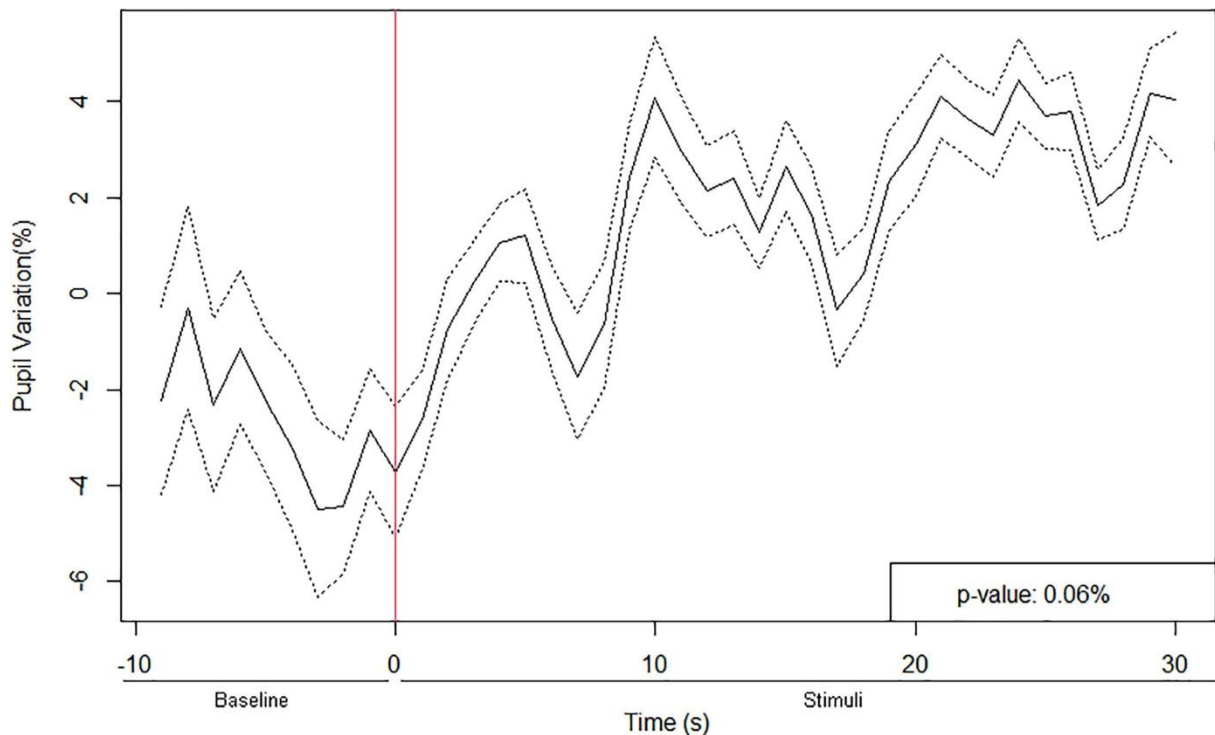
παρεμβολής των κυμάτων Mayer στις μετρήσεις fNIRS, ιδίως στο πλαίσιο της μελέτης της νευρικής δραστηριότητας [74].



Εικόνα 11 Ποσοτικοποίηση των παραμέτρων των κυμάτων Mayer: (α) κεντρική συχνότητα των συνιστωσών ταλάντωσης, (β) εύρος ζώνης ταλάντωσης και (γ) ισχύς της συνιστώσας ταλάντωσης. Σημειώνεται ότι η ισχύς των κυμάτων Mayer δεν είναι κανονικά κατανομημένη, με ορισμένο

5.1.4 Επίδραση των κινήσεων του οφθαλμού

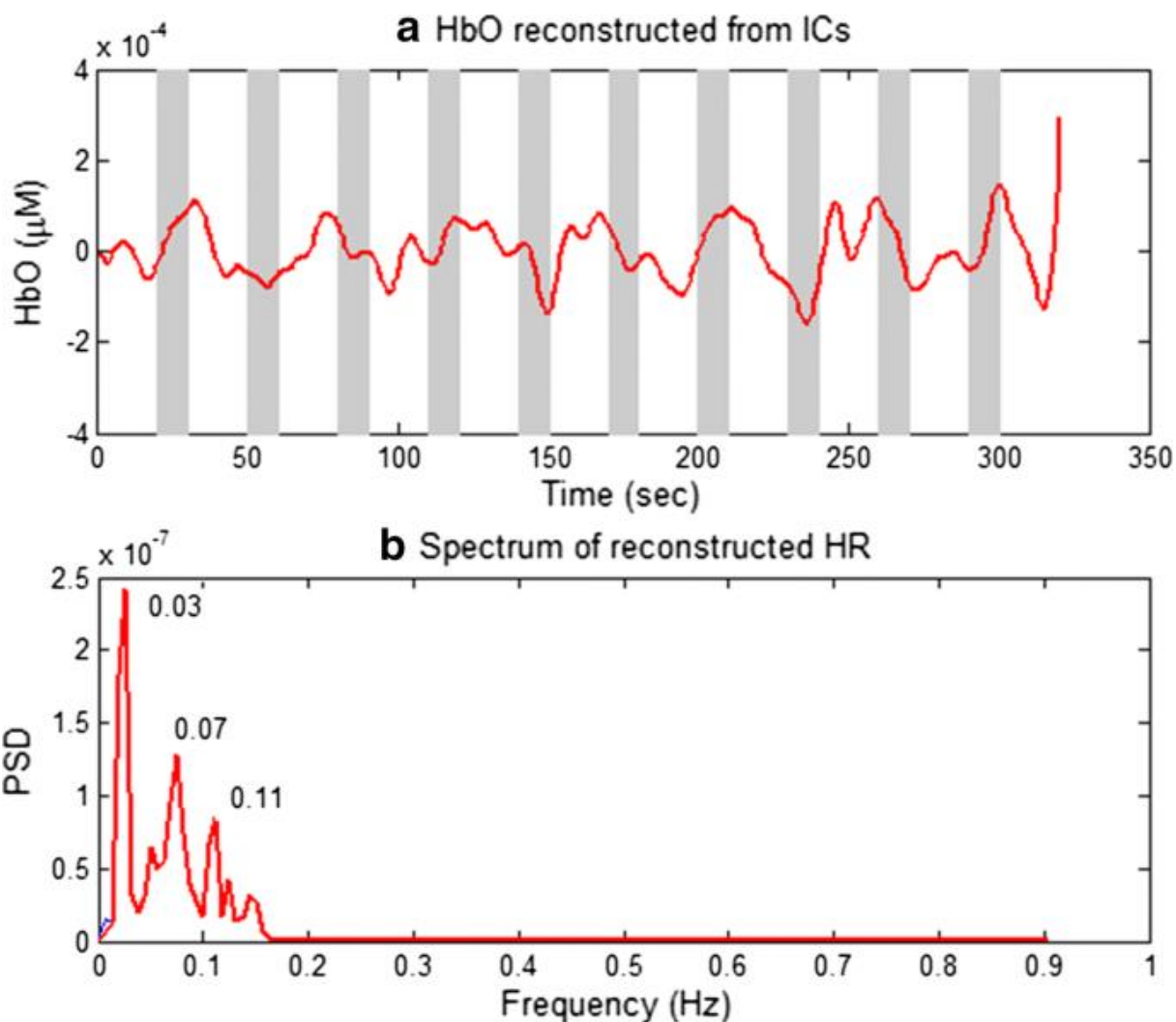
Η μελέτη των Soares et al., (2022), διερεύνησε τη νοητική προσπάθεια των παιδιών που εκτελούν εργασίες νοητικής περιστροφής (MRT) με τη μέτρηση της εγκεφαλικής ενεργοποίησης και της διαστολής της κόρης του ματιού με τη χρήση λειτουργικής φασματοσκοπίας εγγύς υπέρυθρου (fNIRS) και ενός συστήματος παρακολούθησης των ματιών. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική θετική συσχέτιση μεταξύ της MRT και των βαθμολογιών του τεστ επίλυσης προβλημάτων γεωμετρίας, υποδηλώνοντας μια σύνδεση μεταξύ της απόδοσης σε οπτικοχωρικές εργασίες και των ικανοτήτων επίλυσης προβλημάτων γεωμετρίας. Τα αιμοδυναμικά σήματα του ραχιαίου προμετωπιαίου φλοιού (dlPFC) συσχετίστηκαν θετικά με τις επιδόσεις στις οπτικοχωρικές εργασίες. Η διαστολή της κόρης αυξήθηκε κατά τη διάρκεια της MRT, υποδεικνύοντας ότι οι φυσιολογικές αποκρίσεις (διαστολή της κόρης και ενεργοποίηση του dlPFC) σχετίζονται με τις διεργασίες νοητικής προσπάθειας κατά τη διάρκεια οπτικοχωρικών εργασιών. Η μελέτη υποδηλώνει ότι τα παιδιά με μεγαλύτερη νοητική προσπάθεια είχαν καλύτερες επιδόσεις στις εργασίες, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες μιας πολυτροπικής προσέγγισης για την παρακολούθηση της νοητικής προσπάθειας των μαθητών σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια εκπαιδευτικών εργασιών [75].



Εικόνα 12 Χρονοδιάγραμμα μεταβολής της διαμέτρου της κόρης κατά τη διάρκεια της MRT. Η κόκκινη γραμμή υποδεικνύει την έναρξη της εργασίας (ερεθίσματα), η οποία είχε τρεις διαφορετικές φιγούρες προς περιστροφή ανά μπλοκ, αποδίδοντας 30 δευτερόλεπτα ερεθισμάτων ($p = 0,0006$) και 10 δευτερόλεπτα βασικής γραμμής. Η συμπαγής γραμμή υποδεικνύει τον μέσο όρο (μ) και η διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύει ± 1 τυπικό σφάλμα (σ).

5.1.5 Επίδραση του θορύβου

Η μελέτη των Nguyen et al., (2018), εισήγαγε μια αναδρομική μέθοδο εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων με εκθετικό παράγοντα λήθης για την αφαίρεση του θορύβου σε δεδομένα λειτουργικής φασματοσκοπίας εγγύς υπερύθρου (fNIRS) και την εξαγωγή αιμοδυναμικών αποκρίσεων (HR). Η HR μοντελοποιήθηκε ως μια μορφή γραμμικής παλινδρόμησης, ενσωματώνοντας την αναμενόμενη HR, την πρώτη και τη δεύτερη παράγωγο της αναμενόμενης HR, τα δεδομένα μέτρησης μικρού διαχωρισμού, τρεις φυσιολογικούς θορύβους και την ολίσθηση της βασικής γραμμής ως συνιστώσες στο διάλυμα παλινδρόμησης. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε πειράματα που αφορούσαν δραστηριότητες του αριστερού κινητικού φλοιού κατά τη διάρκεια κινήσεων του δεξιού αντίχειρα και του μικρού δακτύλου σε πέντε υγιείς άνδρες συμμετέχοντες. Η συγκριτική αξιολόγηση με το φίλτρο Kalman, το χαμηλοπερατό φιλτράρισμα και τη μέθοδο των ανεξάρτητων συνιστωσών κατέδειξε σημαντική μείωση του αριθμού των καναλιών που παρουσιάζουν υψηλότερο λόγο αντίθεσης προς θόρυβο στην οξυ-αιμοσφαιρίνη (77%) και στη δεοξυ-αιμοσφαιρίνη (99%). Η προτεινόμενη προσέγγιση αποδείχθηκε ισχυρή για τη λήψη συνεπών δεδομένων HR. Οι συμμετέχοντες στη μελέτη, πέντε υγιείς άνδρες με ξυρισμένα μαλλιά, επέδειξαν βελτιωμένη ακρίβεια στην εκτιμώμενη HR και σημαντική μείωση των φυσιολογικών θορύβων, γεγονός που υποδηλώνει τη δυνητική χρησιμότητα του προτεινόμενου μοντέλου για την αφαίρεση του θορύβου και την εξαγωγή HR τόσο σε offline όσο και σε online εφαρμογές [76].



Εικόνα 13: Στην εικόνα παρουσιάζεται μια ανακατασκευασμένη HbO με την προσέγγιση ICA στην οποία χρησιμοποιούνται τα δεδομένα 40 καναλιών μακράς διαίρεσης. Όπως φαίνεται στο β, οι συχνότητες θορύβου 0,07 και 0,11 Hz δεν εξαιρέθηκαν.

Η διαδικασία ανακατασκευής του σήματος της αιμοδυναμικής απόκρισης (HR) στο πεδίο fNIRS περιλαμβάνει τη διάσπαση του σήματος σε επιμέρους συνιστώσες μέσω διαφορετικών μεθόδων, όπως περιγράφεται στη μελέτη.

1. Κανονικές συναρτήσεις HR:

Παραδοσιακά, οι κανονικές συναρτήσεις HR παράγονται συνδυάζοντας τις συναρτήσεις γάμμα στο πεδίο fNIRS. Αυτές οι συναρτήσεις αντιπροσωπεύουν τις αναμενόμενες αποκρίσεις του αιμοδυναμικού συστήματος σε διάφορα ερεθίσματα.

2. Μοντέλο κατάστασης-χώρου:

Το μοντέλο κατάστασης-χώρου, προσφέρει μια πιο βολική εναλλακτική λύση στις κανονικές συναρτήσεις HR. Σε αυτή την προσέγγιση, η παλμική HR για έναν συγκεκριμένο φλοιό, που προκαλείται από μια παλμική διέγερση, ανακατασκευάζεται ως εξίσωση κατάστασης-χώρου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αναγνώρισης υποχώρου. Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψη τα μεμονωμένα

σχήματα των παλμικών HR σε διαφορετικούς φλοιούς. Κατά συνέπεια, επιτρέπει τη δημιουργία ενός αναμενόμενου HR για οποιοδήποτε αυθαίρετο ερέθισμα σε πραγματικό χρόνο.

3. Προσέγγιση με βάση την ICA:

Για την περαιτέρω επικύρωση της ανακατασκευασμένης HR, χρησιμοποιείται μια προσέγγιση ανάλυσης ανεξάρτητων συνιστωσών (ICA). Η ICA αποσκοπεί στην ανάλυση των μετρούμενων δεδομένων fNIRS σε ανεξάρτητα σήματα πηγής, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές φυσιολογικές ή νευρικές διεργασίες.

Τα βήματα που εμπλέκονται στη διαδικασία ICA περιγράφονται ως εξής:

a. Προκαταρκτική λείκανση: Τα μετρούμενα δεδομένα fNIRS υφίστανται λείκανση, μια διαδικασία που προσαρμόζει τον πίνακα συνδιακύμανσης ώστε να πλησιάζει περισσότερο τον πίνακα ταυτότητας.

b. Εκτίμηση ορθογώνιου μετασχηματισμού ICA: Εκτιμάται ένας ορθογώνιος μετασχηματισμός ICA, παρέχοντας ένα διάνυσμα βάρους για κάθε κανάλι στα δεδομένα fNIRS.

c. Εκτίμηση σταθμισμένου σήματος: Οι ανεξάρτητες συνιστώσες (IC) ή τα σήματα πηγής εκτιμώνται στη συνέχεια εφαρμόζοντας το λαμβανόμενο διάνυσμα βάρους στα μετρούμενα δεδομένα.

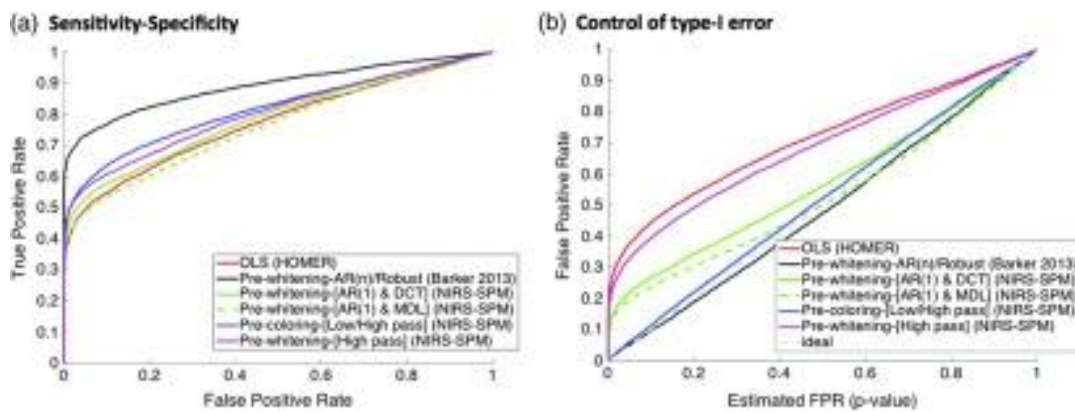
d. Πολλαπλές αποσυνθέσεις: Για την ενίσχυση της ευρωστίας και της αξιοπιστίας, η αποσύνθεση ICA εκτελείται αρκετές φορές, αποδίδοντας παρόμοιες ανεξάρτητες συνιστώσες (IC) σε όλες τις επαναλήψεις.

4. Επικύρωση και αποτελέσματα:

Στη εικόνα 13α παρουσιάζεται ένα ανακατασκευασμένο σήμα οξυ-αιμοσφαιρίνης (HbO) με τη χρήση της προσέγγισης ICA. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιούνται δεδομένα από 40 κανάλια μακράς διαχωρισμού. Ωστόσο, η εικόνα 13β δείχνει ότι ορισμένες συχνότητες θορύβου, όπως αυτές στα 0,07 και 0,11 Hz, δεν εξαλείφθηκαν πλήρως κατά τη διαδικασία ανακατασκευής [76].

Μία άλλη μελέτη του Huppert, (2016), συζήτησε την εφαρμογή των μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης στη λειτουργική φασματοσκοπία εγγύς υπέρυθρου (fNIRS) και ασχολήθηκε με τις τροποποιήσεις που απαιτούνται για τη γενίκευση αυτών των μοντέλων λόγω του θορύβου και των τεχνουργημάτων που είναι μοναδικά στο fNIRS. Η εργασία εξέτασε τις δομές θορύβου στα δεδομένα fNIRS, δίνοντας έμφαση στις παραβιάσεις των υποθέσεων του στατιστικού μοντέλου παλινδρόμησης που προκαλούνται από τον σειριακά συσχετιζόμενο θόρυβο από τη φυσιολογία και την ετεροσκεδαστικότητα του θορύβου από τα τεχνουργήματα κίνησης. Οι δύο κύριες προσεγγίσεις για τον χειρισμό του θορύβου αφορούσαν είτε την αφαίρεση του θορύβου/αντικειμένων από τα δεδομένα με μεθόδους όπως η ανάλυση κύριων συνιστωσών είτε την αλλαγή των υποθέσεων του στατιστικού

μοντέλου ώστε να γίνουν πιο γενικευμένες. Οι συγγραφείς συνέστησαν την προλευκανση του θορύβου για την αντιμετώπιση του δομημένου θορύβου και των σειριακά συσχετιζόμενων σφαλμάτων, συμβούλευσαν κατά του προφιλτραρίσματος ως ξεχωριστό βήμα, προειδοποίησαν κατά του προχρωματισμού λόγω της παρουσίας θορύβου με βαριά ουρά, συνέστησαν ισχυρές μεθόδους παλινδρόμησης για την αντιμετώπιση του ετεροσκεδαστικού θορύβου και τόνισαν τη χρήση ενός κωνικού παραθύρου αντίθεσης για τη μεγιστοποίηση της στατιστικής T. Η μελέτη πρότεινε ότι η χρήση του σωστού στατιστικού μοντέλου είναι ζωτικής σημασίας για τον έλεγχο της ψευδούς ανακάλυψης στα αποτελέσματα του fNIRS, τονίζοντας τη διάκριση μεταξύ θορύβου που επηρεάζει την ανιχνευσιμότητα της εγκεφαλικής δραστηριότητας και θορύβου που παραβιάζει τις στατιστικές υποθέσεις, οδηγώντας σε αναξιόπιστες δοκιμές. Η εργασία πρότεινε ελάχιστες βέλτιστες πρακτικές για την ανάλυση fNIRS, συμπεριλαμβανομένης της προλευκανσης του θορύβου, της αποφυγής του προφιλτραρίσματος, της προσοχής κατά του προχρωματισμού, της χρήσης ισχυρών μεθόδων παλινδρόμησης και της προσοχής στην επιλογή του παραθύρου αντίθεσης. Συνολικά, η εργασία είχε ως στόχο να καθοδηγήσει τους ερευνητές του fNIRS στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με το θόρυβο για πιο αξιόπιστα στατιστικά αποτελέσματα [77].



Εικόνα 14 Σύγκριση μεθόδων διόρθωσης στατιστικών μοντέλων. Η προσομοιωμένη δραστηριότητα προστέθηκε στα πειραματικά δεδομένα fNIRS σε κατάσταση ηρεμίας και αναλύθηκε με τη χρήση διαφόρων μοντέλων. (α) Μια καμπύλη ευαισθησίας-ειδικότητας (καμπύλη χειριστή δέκτη) για τη σύγκριση αυτών των μεθόδων. Τα μοντέλα με καλύτερη απόδοση βρίσκονται πιο κοντά στην άνω αριστερή γωνία του διαγράμματος. (β) Ο έλεγχος των σφαλμάτων τύπου I (ποσοστά ψευδούς ανακάλυψης) για τις διάφορες μεθόδους. Αυτό το διάγραμμα δείχνει το πραγματικό ποσοστό ψευδούς ανακάλυψης (άξονας y) σε σχέση με την αναφερόμενη τιμή p-value που λαμβάνεται από τη μέθοδο (άξονας x). Οι αποκλίσεις από την ευθεία με κλίση της μονάδας δείχνουν την τάση υπερεκτίμησης της σημαντικότητας των αποτελεσμάτων και των μη ελεγχόμενων ψευδών ανακαλύψεων από τη μέθοδο αγοράς.

Κεφάλαιο 6ο: Κατασκευή

6.1 Περιγραφή λειτουργίας

Η παρούσα εφαρμογή αποτελείται από μια φορητή συσκευή fNIRs (Λειτουργικό Μη Επεμβατικό Υπέρυθρο Φασματοσκόπηση), σχεδιασμένη για την καταγραφή και ανάλυση της οξυγονωμένης αιμοσφαιρίνης στον εγκεφαλικό φλοιό, ειδικότερα στο κομμάτι που αφορά τον κινητικό φλοιό. Χρησιμοποιούνται 16 φωτοдиодοι Vishay Semiconductors Gullwing 430-1100nm για την ανίχνευση της αντανακλαστικότητας του ιστού στα 850nm υπέρυθρων ακτινοβολιών από 7 υπέρυθρα LED, προσφέροντας μια ακριβή και ευαίσθητη μέτρηση των μεταβολών της οξυγονωμένης αιμοσφαιρίνης που συνδέονται με νευρωνική δραστηριότητα και κατά συνέπεια τις κινήσεις το ανθρώπινου οργανισμού. Έπειτα, χρησιμοποιήθηκαν 8 OPA2380 transimpedance amplifier για την ρύθμιση του κέρδους των σημάτων και 1 ολοκληρωμένο στοιχείο MAX6966 για την ακριβή αποστολή του ρεύματος στα LED.

Η συσκευή είναι φορητή και οικονομική, χάρη στη χρήση ενός μικροελεγκτή ESP32, ο οποίος επιτρέπει την ασύρματη μετάδοση δεδομένων σε έναν υπολογιστή μέσω Wi-Fi. Αυτό επιτρέπει την εύκολη συλλογή και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, κάνοντας τη συσκευή ιδανική για διάφορες εφαρμογές, από την έρευνα έως και την κλινική χρήση.

Για την ανάλυση των δεδομένων, χρησιμοποιείται ένα νευρωνικό δίκτυο LSTM (Long Short-Term Memory), το οποίο είναι ιδιαίτερα αποδοτικό στην επεξεργασία και πρόβλεψη χρονοσειρών. Το LSTM επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη και ανάλυση των νευρωνικών σημάτων, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για την κατανόηση της εγκεφαλικής δραστηριότητας που σχετίζεται με κινητικές λειτουργίες.

Η συγκεκριμένη συσκευή ανοίγει νέους δρόμους στην έρευνα της νευροεπιστήμης και προσφέρει μια προσιτή λύση για την εκτέλεση περίπλοκων νευροφυσιολογικών μελετών, προσφέροντας ταυτόχρονα την ευκολία της φορητότητας και της απλότητας χρήσης.

6.2 Εξέλιξη της κατασκευής

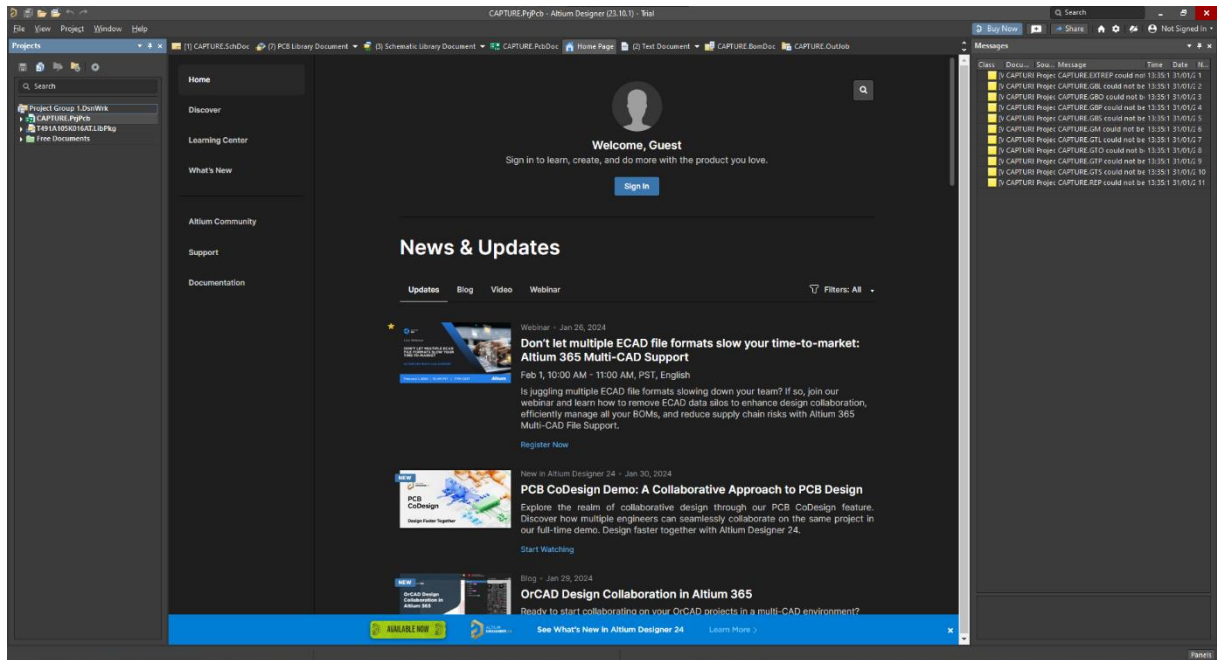
Σε αυτό το σημείο θα αναφέρω τα στάδια υλοποίησης της κατασκευής μου.

6.2.1 Altium Designer

Το Altium Designer είναι ένα ολοκληρωμένο λογισμικό σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και συστημάτων, το οποίο παρέχει μια εκτεταμένη σουίτα εργαλείων για την ανάπτυξη πολύπλοκων ηλεκτρονικών προϊόντων. Αναγνωρισμένο για τις δυνατότητές του στην προσομοίωση, σχεδίαση PCB (Printed Circuit Board), και ηλεκτρονική διαχείριση δεδομένων, το Altium Designer υποστηρίζει τους μηχανικούς και τους σχεδιαστές σε κάθε στάδιο της διαδικασίας ανάπτυξης ηλεκτρονικών προϊόντων.

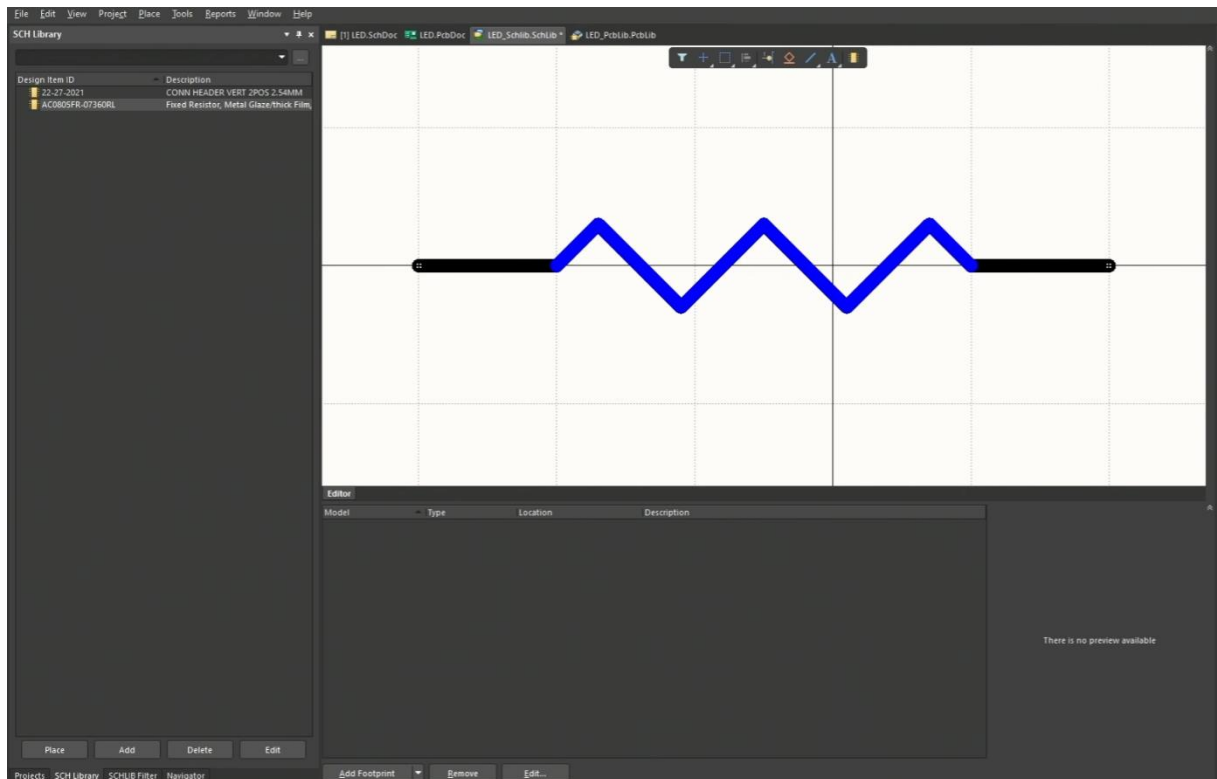
Η διαδικασία εκμάθησης του Altium Designer περιλαμβάνει αρκετά βασικά και προχωρημένα στάδια:

1. **Εισαγωγή στο Περιβάλλον Εργασίας:** Αρχικά, έπρεπε να εξοικειωθώ με το περιβάλλον εργασίας του Altium, καθώς και τα βασικά εργαλεία και λειτουργίες.

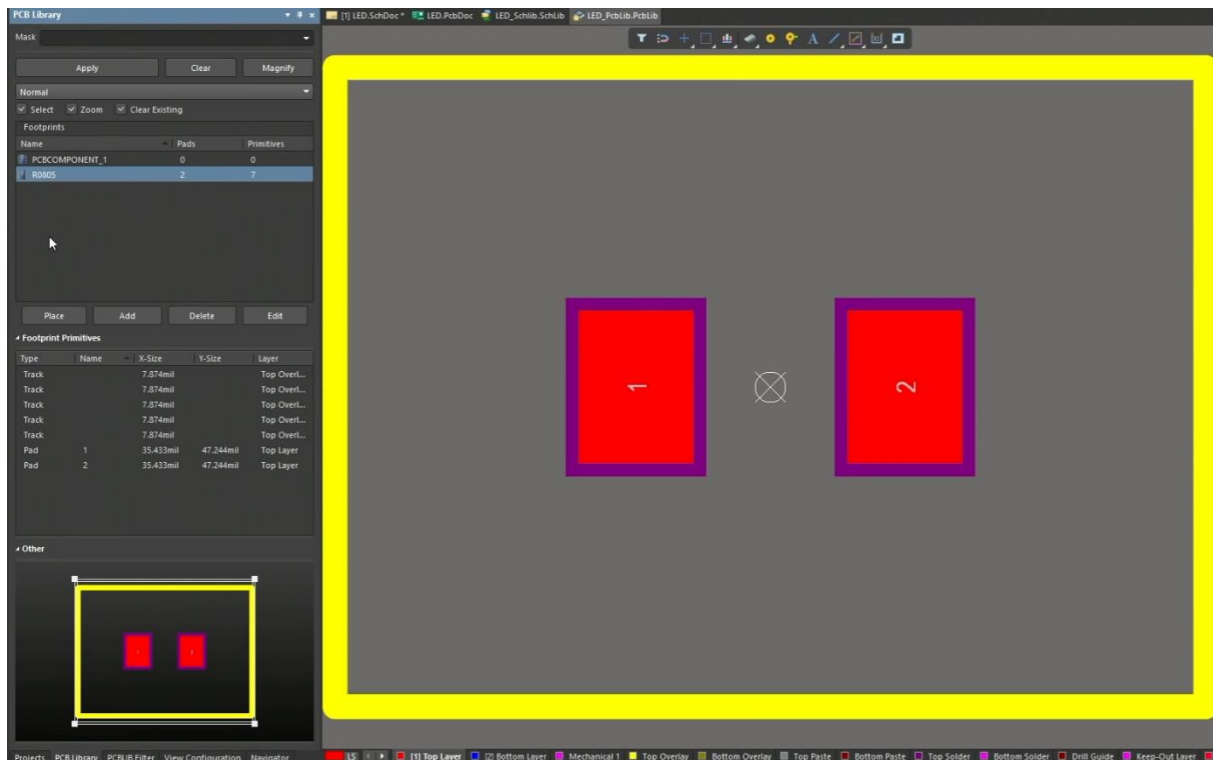


Εικόνα 15 είσοδος στο Altium designer

2. **Σχεδίαση Ηλεκτρονικών Σχηματικών:** Είχα να μάθω πώς να δημιουργώ ηλεκτρονικά στοιχεία και σχηματικά, να τοποθετώ στοιχεία και να εκτελούν ηλεκτρικές συνδέσεις και αντίστοιχα να φτιάχνω το footprint το κάθε στοιχείου για την δημιουργία του pcb.

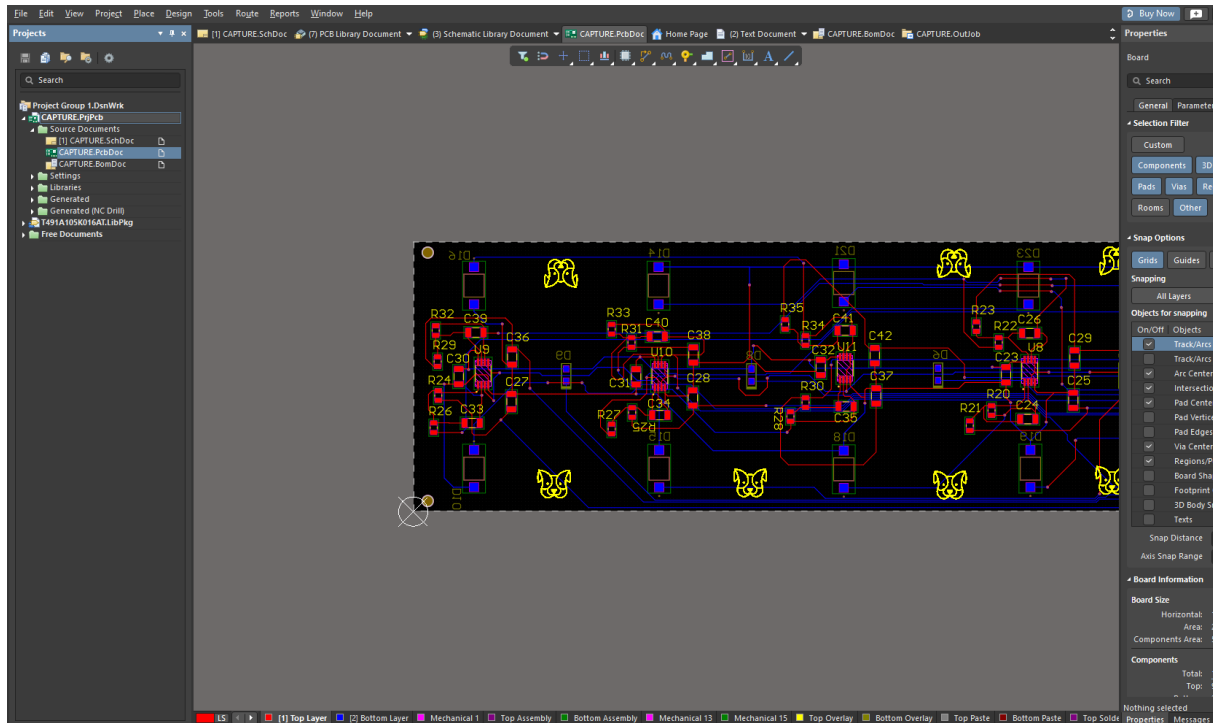


Εικόνα 16 Σχεδίαση ηλεκτρονικού στοιχείου



Εικόνα 17 Η μετατροπή των ηλεκτρονικών σχημάτων σε PCB

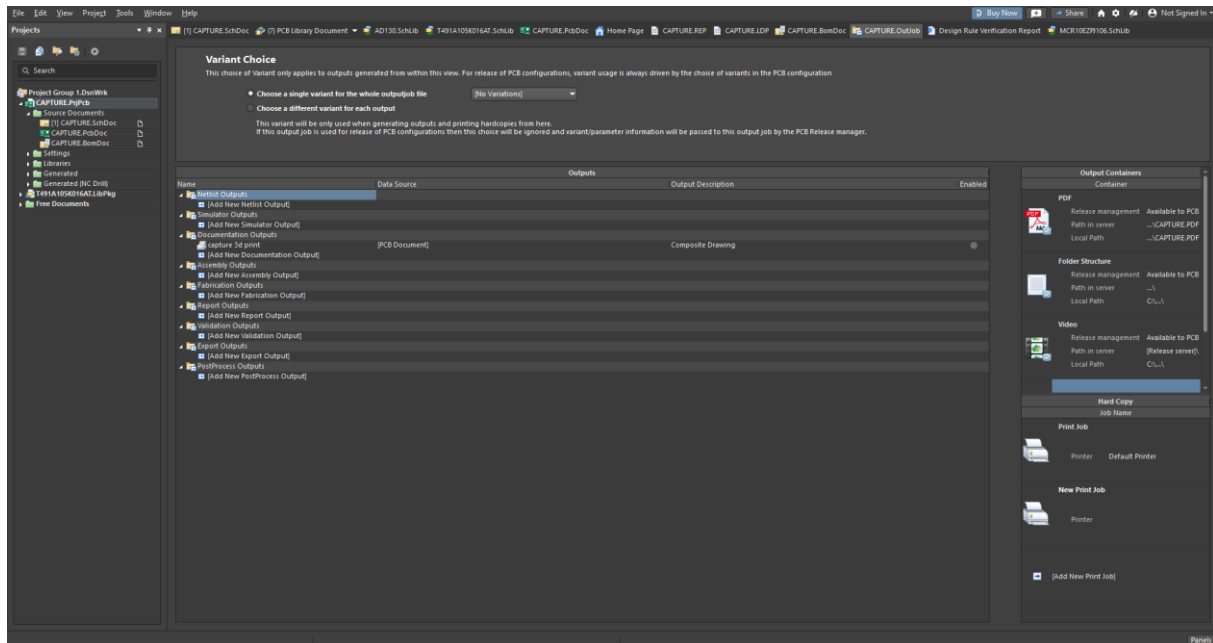
3. **Δημιουργία PCB:** Η μετατροπή των ηλεκτρονικών σχημάτων σε PCB, όπου έμαθα τη διαδικασία σχεδίασης και διάταξης των PCB, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής υλικών και του layer stack-up.



Εικόνα 18 Δημιουργία PCB

4. **Προσομοίωση και Ανάλυση:** Εκμάθηση των εργαλείων προσομοίωσης και ανάλυσης για την επαλήθευση της λειτουργίας και απόδοσης του κυκλώματος.

5. **Διαχείριση Δεδομένων:** Μαθαίνοντας πώς να διαχειρίζομαι τα ηλεκτρονικά δεδομένα και να συνεργάζομαι με άλλους όπως την εταιρεία εκτύπωσης πλακετών PCB.



Εικόνα 19 Διαχείριση Δεδομένων

Η εκμάθηση του Altium Designer απαιτεί προσοχή και επιμονή, καθώς το λογισμικό προσφέρει μια πληθώρα εργαλείων και δυνατοτήτων που μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την αποδοτικότητα και την καινοτομία στον τομέα της ηλεκτρονικής σχεδίασης.

6.2.2 Επιλογή υλικών

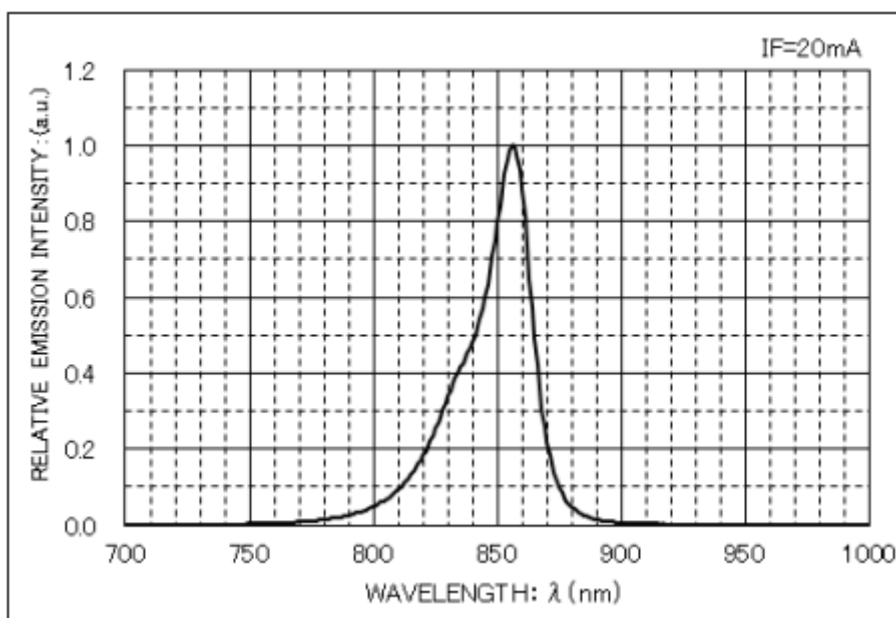
Για την επιλογή υλικών χρειάστηκε να ερευνήσω δημοσιεύσεις, σχετικές με τον fNIRS και να κατανοήσω πως ακριβώς δουλεύει, ώστε να μελετήσω τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν. Τελικά, από όσες υλοποιήσεις βρήκα δεν μου ταίριαξε καμία, οπότε άρχισα την έρευνα υλικών στο διαδίκτυο σε γνωστές ιστοσελίδες όπως Mouser, Farnell κλπ. Ξεκίνησα από τα βασικά υλικά πρώτα, και έπειτα ψάχνοντας το datasheet έβλεπα αν ταιριάζουν στην κατασκευή του φορητού fNIRS μου. Επίσης έπρεπε να μετρήσω τις διαστάσεις που χρειάζεται η κατασκευή ώστε να καλύψω όλη την επιφάνεια που χρειάζεται, για να πάρουμε τις κατάλληλες μετρήσεις, οι οποίες βγήκανε περίπου στα 30εκατοστάς μήκος και 5 εκατοστά πλάτος.

Το πιο βασικό στοιχείο είναι το LED με την υπέρυθη ακτινοβολία. Στην έρευνα αυτή προσπάθησα να βρω έναν emitter όπου θα είναι flat για να έχει όσο το δυνατό, πιο τέλεια επαφή με το τριχωτό της κεφαλής και τα μαλλιά αλλά και να είναι τύπου SMD. Παράλληλα θα πρέπει να εκπέμπει 850nm για τον εντοπισμό της οξυγονωμένης αιμοσφαιρίνης. Κατέληξα στην χρήση ενός νέου στοιχείου στην αγορά, του SML-H15RTT86.



Εικόνα 20 SML-H15RTT86.

Το στοιχείο αυτό χρειάζεται μια τιμή $I_F=20\text{mA}$ για να άγει στα 850nm όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.



Εικόνα 21 datasheet του SML-H15RTT86.

Οπότε, έπρεπε να ψάξω για ένα ολοκληρωμένο στοιχείο για την ακριβή αποστολή του ρεύματος που χρειάζεται το κάθε IR LED. Έτσι, βρήκα το MAX6966AEE+ το οποίο στο default state του στέλνει ακριβώς 20ma σε 10 εισόδους του, εκ των οποίων αξιοποιήθηκαν οι 7.

Το αμέσως επόμενο βασικό στοιχείο που χρειάστηκα για την δημιουργία της συσκευής είναι οι φωτοδιόδοι που θα λαμβάνουν το κατάλληλο IR σήμα για να αναγνωρίζουν το ποσοστό οξυγόνωσης του κάθε σημείου του εγκεφάλου στο motor cortex. Χρησιμοποίησα 16 φωτοδιόδους οι οποίοι μπορούν να μετρήσουν από 430 μέχρι 1100nm και ονομάζονται 782-VBPW34S.

Για την ορθή λήψη των σημάτων των φωτοδίοδων έπρεπε να χρησιμοποιηθούν και οι ανάλογοι ενισχυτές, διότι χρειαζόμαστε μεγάλη λεπτομέρεια στις αλλαγές των τιμών των σημάτων. Οπότε, χρησιμοποιήθηκαν οι ενισχυτές μετατροπής αντίστασης σε τάση, γνωστοί ως transimpedance amplifiers (TIA), που είναι κρίσιμα στοιχεία σε πολλές εφαρμογές ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, ιδιαίτερα όταν απαιτείται η μετατροπή ενός σήματος ρεύματος σε σήμα τάσης. Αυτός ο τύπος ενισχυτή

χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα αισθητήρων, όπου οι αισθητήρες παράγουν ένα σήμα ρεύματος ανάλογο της μετρούμενης παραμέτρου. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε εφαρμογές όπως οι φωτοδιόδοι ή άλλοι αισθητήρες που αποκρίνονται σε φυσικά φαινόμενα με μικροσκοπικά ρεύματα, καθώς μετατρέπουν το ρεύμα σε μια τάση εύκολα ανιχνεύσιμη από τα υπόλοιπα κυκλώματα της συσκευής.

Στην περίπτωση μιας συσκευής fNIRS (Functional Near-Infrared Spectroscopy), οι ενισχυτές μετατροπής αντίστασης σε τάση παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ακριβή μέτρηση των σημάτων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες φωτός. Το fNIRS χρησιμοποιεί φως κοντά στο υπέρυθρο φάσμα για να διεισδύσει στον εγκεφαλικό ιστό και να μετρήσει την αλλαγή στην συγκέντρωση της οξυγονωμένης και αποξυγονωμένης αιμοσφαιρίνης, παρέχοντας ένδειξη για την νευρωνική δραστηριότητα. Τα παραγόμενα σήματα ρεύματος από τους φωτοαισθητήρες είναι συχνά πολύ μικρά και χρειάζονται ακριβή ενίσχυση για να ανιχνευθούν και να αναλυθούν σωστά.

Η χρήση του OPA2380 ως transimpedance amplifier στη συσκευή fNIRS ήταν μια εξαιρετική επιλογή για αρκετούς λόγους. Πρώτον, ο OPA2380 προσφέρει υψηλή ταχύτητα και χαμηλό θόρυβο, κάτι που είναι ιδανικό για την ενίσχυση των αδύναμων σημάτων ρεύματος χωρίς να προσθέτει σημαντικά επίπεδα θορύβου που θα μπορούσαν να παραμορφώσουν το ανιχνευόμενο σήμα. Δεύτερον, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας του OPA2380 είναι κρίσιμη για φορητές συσκευές όπως το fNIRS, όπου η αυτονομία της μπαταρίας είναι σημαντική. Τρίτον, η ευελιξία του σε διαφορετικές ρυθμίσεις ενισχυτικού κέρδους επιτρέπει την προσαρμογή στις ανάγκες του συγκεκριμένου κυκλώματος fNIRS, διευκολύνοντας την βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Επιπλέον, η υψηλή απόδοση του OPA2380 σε εύρος ζώνης και η ικανότητά του να διαχειρίζεται μεγάλες εκροές ρεύματος εξασφαλίζουν την αποτελεσματική ενίσχυση των σημάτων ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες μέτρησης. Συνολικά, η επιλογή του OPA2380 για χρήση στη συσκευή fNIRS αντικατοπτρίζει την ανάγκη για έναν ενισχυτή που συνδυάζει υψηλή ακρίβεια, χαμηλό θόρυβο, και αποδοτική κατανάλωση ενέργειας, παρέχοντας έτσι βέλτιστη απόδοση σε ένα κρίσιμο στοιχείο της συσκευής.



Εικόνα 22 MAX6966AEE+,782-VBPW34S. OPA2380AIDGKR.

Για τον θεωρητικό υπολογισμό της αντίστασης R_f που χρησιμοποιήθηκε στο κύκλωμα του OPA380. Το επιθυμητό εύρος τάσης εξόδου είναι από 0.5V έως 4.5V, που είναι διαφορά 4V. Το μέγιστο ρεύμα από την φωτόδιοδο είναι 55uA.

Η ενίσχυση του OPA380 (A_v) δίνεται από την αναλογία της τάσης εξόδου προς το ρεύμα εισόδου. Έτσι, μπορούμε να γράψουμε:

$$A_v = \frac{I_{in}}{V_{out}} = \frac{55\mu A}{4V}$$

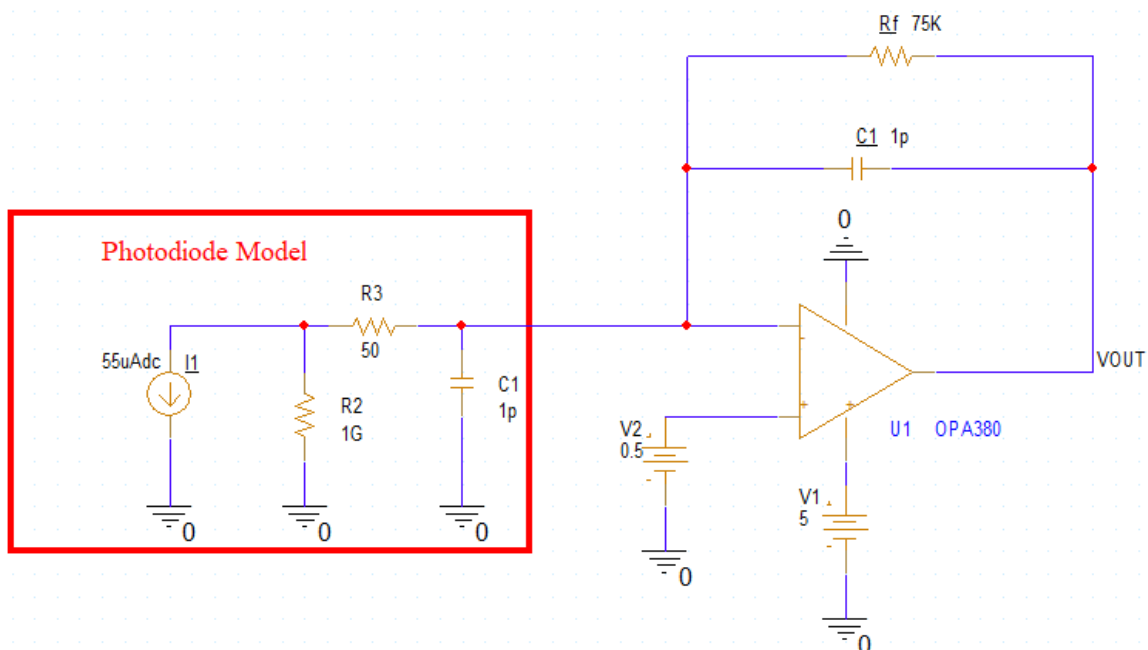
Η ενίσχυση ενός ενισχυτή μετατροπής ρεύματος σε τάση δίνεται επίσης από την αντίσταση ανάδρασης (R_f). Έτσι, μπορούμε να γράψουμε:

$$A_v = R_f$$

Επομένως, η θεωρητική τιμή της R_f που χρειαζόμαστε είναι:

$$R_f = \frac{55\mu A}{4V} = 72.7 \text{ k}\Omega$$

Ωστόσο, στην πράξη, οι αντιστάσεις δεν είναι πάντα διαθέσιμες σε κάθε τιμή. Θα πρέπει να επιλέξω την πλησιέστερη τυποποιημένη τιμή αντίστασης, που είναι 75 kΩ.



Εικόνα 23 κύκλωμα φωτοδιόδου και OPA380 στο OrCAD Capture.

Έπειτα, το αμέσως πιο σημαντικό είναι ο επεξεργαστής δηλαδή η μονάδα που επεξεργάζεται όλα τα σήματα που λαμβάνουμε από το OPA2380AIDGKR. Το ESP32 αποτελεί ένα προηγμένο μικροελεγκτή, ο οποίος έχει κερδίσει μεγάλη δημοτικότητα στον τομέα των ενσωματωμένων συστημάτων και του IoT (Internet of Things), χάρη στις εξαιρετικές του δυνατότητες και την οικονομική του προσιτότητα. Πρόκειται για έναν πανίσχυρο μικροελεγκτή διπλού πυρήνα, ο οποίος χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική Xtensa LX6 της Espressif και προσφέρει μια εντυπωσιακή σειρά από λειτουργίες, όπως Wi-Fi, Bluetooth, πλούσιες δυνατότητες I/O, καθώς και υποστήριξη για διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Επιπλέον, ο ESP32 διακρίνεται για την υψηλή του επεξεργαστική ισχύ και την χαμηλή του κατανάλωση ενέργειας, κάτι που τον καθιστά ιδανικό για εφαρμογές όπου αυτά τα χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα.

Το ESP32 είναι ένας προηγμένος μικροελεγκτής που παρέχει εξαιρετική υπολογιστική ισχύ και ευελιξία, κάνοντάς το ένα ιδανικό εργαλείο για ποικίλες εφαρμογές στον τομέα της ενσωματωμένης υπολογιστικής και του Internet of Things (IoT). Ο μικροελεγκτής βασίζεται στην αρχιτεκτονική

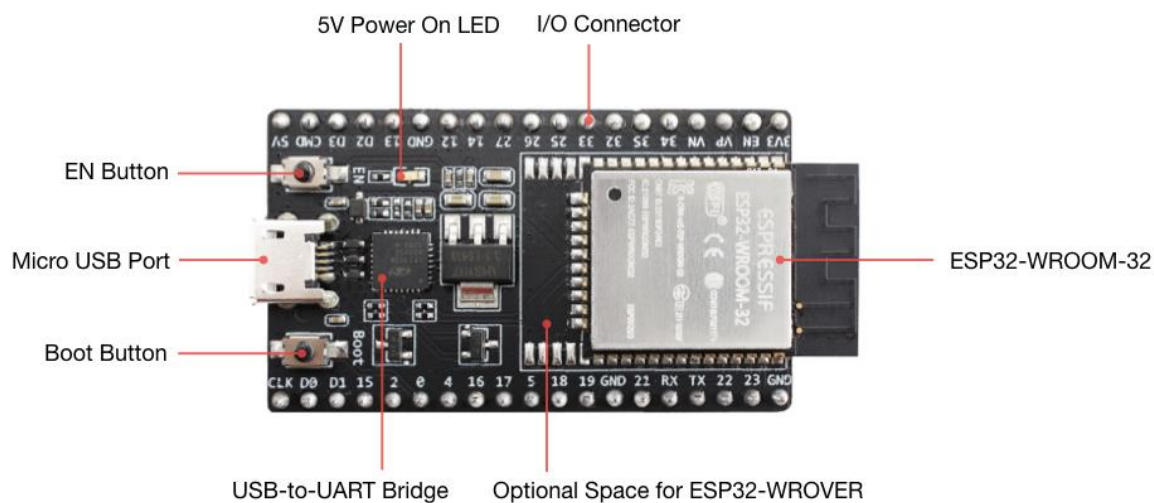
Xtensa® dual-core 32-bit LX6 μικροεπεξεργαστή, προσφέροντας εντυπωσιακή επεξεργαστική δύναμη. Οι δύο πυρήνες μπορούν να λειτουργούν παράλληλα, με μέγιστη συχνότητα ως 240 MHz, επιτρέποντας την εκτέλεση σύνθετων εφαρμογών και αλγορίθμων με μεγάλη αποδοτικότητα.

Όσον αφορά την δυνατότητα λήψης σημάτων, το ESP32 διαθέτει πλούσιο σύνολο αναλογικών και ψηφιακών διεπαφών. Για την αναλογική είσοδο, περιλαμβάνει ένα σύστημα ADC (Analog-to-Digital Converter) με δυνατότητα μέτρησης σε πολλαπλά κανάλια, προσφέροντας την ικανότητα να λαμβάνει σήματα από αισθητήρες και άλλες αναλογικές πηγές. Επιπλέον, διαθέτει σύστημα DAC (Digital-to-Analog Converter) για την εξαγωγή αναλογικών σημάτων, επιτρέποντας έτσι την αλληλεπίδραση με αναλογικά κυκλώματα.

Πέρα από τις αναλογικές δυνατότητες, το ESP32 υποστηρίζει μια πληθώρα ψηφιακών διεπαφών για επικοινωνία και ελεγχόμενες λειτουργίες, όπως I2C, SPI, και UART για σειριακή επικοινωνία, PWM (Pulse Width Modulation) για τον έλεγχο της ισχύος σε μοτέρ και LED, καθώς και ειδικές λειτουργίες όπως η διεπαφή Ethernet MAC για ενσύρματες συνδέσεις και διάφορα συστήματα χρονισμού και μέτρησης. Ο συνεπεξεργαστής χαμηλής κατανάλωσης (ULP) επιτρέπει την εκτέλεση εφαρμογών με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, ιδανικό για εφαρμογές IoT που απαιτούν μακρά διάρκεια μπαταρίας.

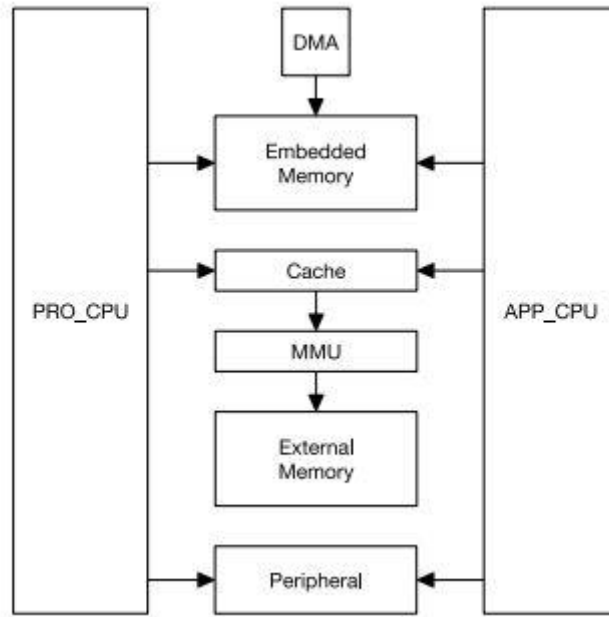
Συνοψίζοντας, το ESP32 διαθέτει έναν ευρύ φάσμα τεχνικών χαρακτηριστικών που το καθιστούν εξαιρετικά ικανό για μια πληθώρα εφαρμογών, από απλές ψηφιακές ελεγκτικές λειτουργίες μέχρι πολύπλοκες ασύρματες επικοινωνίες και αναλογική σήμα επεξεργασία, παρέχοντας έτσι έναν πολύτιμο πόρο για τους σχεδιαστές και μηχανικούς στον χώρο της ενσωματωμένης υπολογιστικής και IoT.

Στην περίπτωση της δημιουργίας μιας φορητής συσκευής fNIRs (Λειτουργικό Μη Επεμβατικό Υπέρυθρο Φασματοσκόπηση), ο ESP32 αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμος για πολλούς λόγους. Πρώτον, η ενσωματωμένη υποστήριξη για Wi-Fi του επέτρεψε την ασύρματη μετάδοση δεδομένων από τη συσκευή σε έναν υπολογιστή ή άλλη συσκευή για ανάλυση, κάτι που είναι ζωτικής σημασίας για μια φορητή συσκευή που χρησιμοποιείται σε δυναμικές συνθήκες. Δεύτερον, η επεξεργαστική του ισχύς είναι αρκετή για την επεξεργασία και τον προκαταρκτικό έλεγχο των σημάτων πριν τη μετάδοση, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία της συσκευής. Τρίτον, το μικρό μέγεθος και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας του ESP32 συμβάλλουν στη φορητότητα και τη μακροχρόνια αυτονομία της συσκευής fNIRs, καθιστώντας την ιδανική για χρήση σε ποικίλα περιβάλλοντα και συνθήκες. Τέλος, ο ESP32 προσφέρει μια ευέλικτη και προσιτή λύση για την ανάπτυξη προηγμένων ηλεκτρονικών συσκευών, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση καινοτόμων ερευνητικών εφαρμογών όπως η φορητή συσκευή fNIRs.



Εικόνα 24 ESP32-DevKitC V4. Πηγή:<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>

Η espressif είναι η εταιρεία που παράγει το ESP32, το οποίο εξοπλίζεται με έναν διπύρηνο επεξεργαστή 32bit, ο οποίος λειτουργεί σε συχνότητες από 160 έως 240 MHz. Αυτοί οι πυρήνες, γνωστοί ως APP_CPU (Application CPU) και PRO_CPU (Protocol CPU), διαθέτουν τόσο εσωτερική όσο και εξωτερική μνήμη, με κάθε μία να χρησιμοποιείται για διαφορετικούς σκοπούς. Όπως φαίνεται στην αρχιτεκτονική του ESP32, το DMA (Direct Memory Access) είναι σχεδιασμένο για την ταχύτερη μεταφορά δεδομένων, επιτρέποντας την απευθείας μετακίνηση δεδομένων προς και από την μνήμη χωρίς την ανάγκη εμπλοκής του επεξεργαστή. Η ενσωματωμένη μνήμη αναφέρεται στην εσωτερική μνήμη της συσκευής. Η MMU (Memory Management Unit) και η cache σχετίζονται με τη χρήση και πρόσβαση στην εξωτερική μνήμη του ESP32, ενώ τα περιφερειακά συστήματα (PERIPHERALS) περιλαμβάνουν τις διεπαφές εισόδου/εξόδου, Wi-Fi κ.ά.



Εικόνα 25 Η αρχιτεκτονική του ESP32. Πηγή:

http://www.exploreembedded.com/wiki/Overview_of_ESP32_features._What_do_they_practically_mean%3F

Τέλος είναι η ρύθμιση με τα κατάλληλα φίλτρα(δηλαδή αντιστάσεις, πυκνωτές) που απαιτούσε το κάθε στοιχείο ώστε να δουλεύει χωρίς θορύβους αλλά και με σταθερότητα, διότι κοιτάμε την λεπτομέρεια σε τέτοιου είδους συσκευές και η τροφοδοσία του κυκλώματος φυσικά με ένα απλό Header για την χρήση μιας 9V μπαταρίας. Οι πυκνωτές και οι αντιστάσεις είναι δύο θεμελιώδη συστατικά στην ηλεκτρονική, παίζοντας κρίσιμους ρόλους σε πολλαπλές εφαρμογές κυκλωμάτων, και ιδιαίτερα στην υλοποίηση διαφόρων τύπων φίλτρων. Τα φίλτρα, σε γενικές γραμμές, χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή, ενίσχυση, ή αποκοπή συγκεκριμένων συχνοτήτων από ένα σήμα, και η επιλογή των συνιστωσών τους, όπως οι πυκνωτές και οι αντιστάσεις, εξαρτάται από την επιθυμητή λειτουργία του φίλτρου.

Η συνδυαστική χρήση πυκνωτών και αντιστάσεων σε φίλτρα προσφέρει μεγάλη ευελιξία στον σχεδιασμό κυκλωμάτων, επιτρέποντας την ακριβή επιλογή των συχνοτήτων που πρέπει να επεξεργαστεί ένα σήμα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου απαιτείται η εξαγωγή ή η εξουδετέρωση συγκεκριμένων συχνοτήτων από ένα σήμα, όπως στην ηλεκτρονική ηχοσύστημα, στην επεξεργασία σημάτων και στα συστήματα επικοινωνίας. Οπότε επέλεξα μερικούς πυκνωτές tantalum των 1uF, 10uF και 22uF, και αντιστάσεις 1 και 10 ΜΩ.

Για να καταφέρει να λειτουργήσει το κυκλώμα μου είναι απαραίτητες οι τροφοδοσίες του κυκλώματος. Για τον σκοπό αυτό, έβαλα δυο ρυθμιστές τάσεις (voltage regulators) στα 3.3V και 5V και μία τάση αναφοράς (voltage reference) στα 0.5V. Η επιλογή των AMS1117 5.0, AMS1117 3.3 και ADR130 0.5V ως τροφοδοτικά και αναφορικά στάθμης τάσης (voltage reference) για τη συσκευή fNIRS (Functional Near-Infrared Spectroscopy) είναι μια άριστη επιλογή για διάφορους λόγους:

1. Σταθεροποιημένη Τροφοδοσία: Οι AMS1117 5.0 και AMS1117 3.3 είναι γραμμικοί ρυθμιστές τάσης που προσφέρουν σταθεροποιημένη τροφοδοσία στα 5V και 3.3V αντίστοιχα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε ένα ευαίσθητο σύστημα όπως το fNIRS, όπου η ακρίβεια των μετρήσεων μπορεί να επηρεαστεί από διακυμάνσεις στην τροφοδοσία.

- 2.Υψηλή Απόδοση και Χαμηλός Θόρυβος: Οι ρυθμιστές AMS1117 είναι γνωστοί για την υψηλή τους απόδοση και τον χαμηλό θόρυβο, κάτι που είναι κρίσιμο για την διατήρηση της ακρίβειας

και της αξιοπιστίας σε συστήματα όπως το fNIRS, τα οποία ανιχνεύουν και επεξεργάζονται αδύναμα σήματα.

3. Ακρίβεια με το ADR130: Ο ADR130 προσφέρει μια ακριβή αναφορική τάση 0.5V, η οποία είναι κρίσιμη για την ακριβή ανίχνευση και επεξεργασία των σημάτων στο fNIRS. Μια ακριβής αναφορά τάσης είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση σταθερής και αξιόπιστης λειτουργίας των αισθητήρων και των κυκλωμάτων επεξεργασίας.

4. Προστασία από Ακατάλληλες Τάσεις: Οι ρυθμιστές τάσης προστατεύουν το κύκλωμα και τα ευαίσθητα στοιχεία από δυνητικά επιβλαβείς διακυμάνσεις ή ακατάλληλες τάσεις που μπορεί να εισέλθουν στο σύστημα.

5. Προσαρμογή στις Ανάγκες του Συστήματος: Η χρήση διαφορετικών τάσεων τροφοδοσίας (5V, 3.3V και 0.5V) επιτρέπει την ευελιξία στο σχεδιασμό, καθιστώντας δυνατή την τροφοδοσία διαφορετικών στοιχείων της συσκευής με την κατάλληλη τάση που απαιτείται για την βέλτιστη λειτουργία τους.

Συνολικά, η χρήση των AMS1117 5.0, AMS1117 3.3 και ADR130 0.5V στο κύκλωμα της συσκευής fNIRS συμβάλλει στην διασφάλιση υψηλής απόδοσης, ακρίβειας και σταθερότητας του συστήματος, κάτι που είναι ουσιώδες για την ακριβή ανίχνευση και επεξεργασία των φωτονικών σημάτων στην fNIRS τεχνολογία.

6.2.3 Σχεδιασμός σχηματικού

Στο Altium Designer, αφού περάστηκαν όσες έτοιμες βιβλιοθήκες βρέθηκαν για κάθε υλικό, έπειτα έπρεπε να κατασκευάσω από την αρχή το κάθε footprint(ίχνος) και το αντίστοιχο σχήμα του κάθε υλικού για την σχεδίαση του σχηματικού.

Πρώτο μου βήμα ήταν να σχεδιάσω το κατάλληλο κύκλωμα για την τροφοδοσία όλων των στοιχείων. Έτσι, επέλεξα να τοποθετηθεί ένας πυκνωτής 10μF μεταξύ της τροφοδοσίας (+) στα 9V και της γείωσης (-) σε ένα κύκλωμα, όπου συχνά αναφέρεται ως τοποθέτηση ενός πυκνωτή "decoupling" ή "bypass". Αυτή η πρακτική είναι σημαντική για τη βελτίωση της σταθερότητας και της απόδοσης του κυκλώματος για πολλούς λόγους.

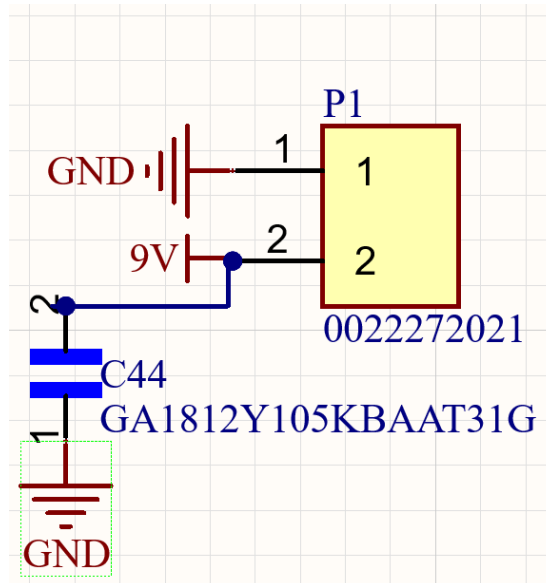
Εξομάλυνση Τάσης: Ο πυκνωτής μπορεί να λειτουργήσει ως μια μικρή "αποθήκη" ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας επιπλέον ηλεκτρικό ρεύμα στο κύκλωμα όταν υπάρχει αύξηση της ζήτησης (για παράδειγμα, κατά την ενεργοποίηση ενός φορτίου). Αυτό βοηθά στην εξομάλυνση τυχόν διακυμάνσεων ή "σπικών" στην τροφοδοτική τάση, διασφαλίζοντας μια πιο σταθερή λειτουργία.

Φιλτράρισμα Θορύβου: Ο πυκνωτής συμβάλλει στην απορρόφηση και το φιλτράρισμα ηλεκτρικού θορύβου που μπορεί να παραχθεί από άλλα τμήματα του κυκλώματος ή από εξωτερικές πηγές. Η απομάκρυνση του θορύβου είναι κρίσιμη για την αποφυγή ανεπιθύμητων διαταραχών στα σήματα και την αύξηση της ακρίβειας και αξιοπιστίας του κυκλώματος.

Υποστήριξη Δυναμικών Φορτίων: Σε κυκλώματα που έχουν δυναμικά φορτία, δηλαδή συσκευές που αλλάζουν ταχέως την κατανάλωση ισχύος τους (όπως μικροελεγκτές, ψηφιακά ICs, κ.λπ). Ο πυκνωτής βοηθά στην παροχή ενός άμεσου αποθέματος ενέργειας για την ομαλή λειτουργία τους, αποτρέποντας τις πτώσεις τάσης που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την απόδοση ή την αξιοπιστία.

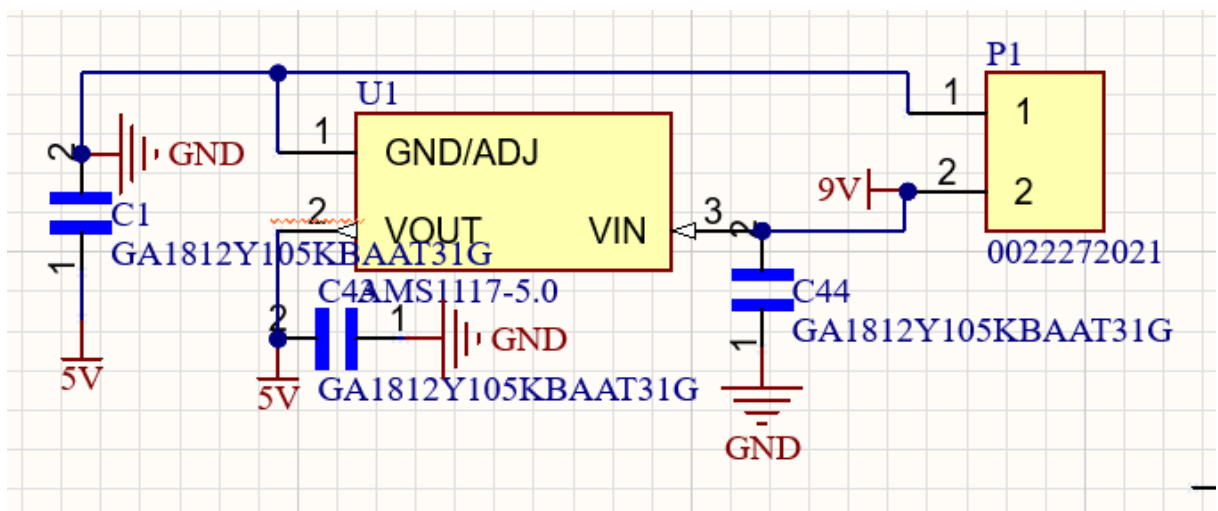
Βελτίωση της Απόκρισης στις Αλλαγές Φορτίου: Καθώς ο πυκνωτής μπορεί να αποδίδει και να απορροφά ενέργεια γρήγορα, βοηθά στην αντιμετώπιση των απότομων αλλαγών στις απαιτήσεις ισχύος του κυκλώματος, διασφαλίζοντας μια πιο σταθερή λειτουργία ακόμη και κάτω από δύσκολες συνθήκες.

Συνοψίζοντας, η τοποθέτηση ενός πυκνωτή 10 μ F μεταξύ της θετικής τροφοδοσίας και της γείωσης είναι μια απλή αλλά ιδιαίτερα αποτελεσματική στρατηγική για την βελτίωση της ποιότητας και της σταθερότητας της τροφοδοσίας σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, προσφέροντας σημαντικά οφέλη σε όρους απόδοσης και αξιοπιστίας.

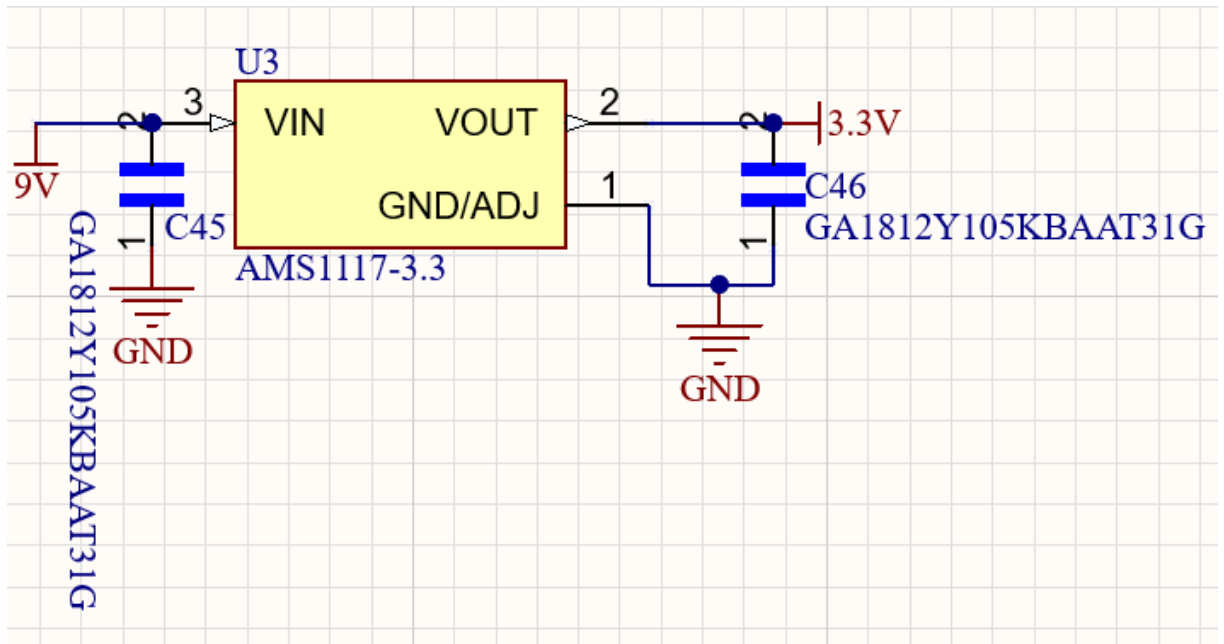


Εικόνα 26 Σχηματικό της τροφοδοσίας του κυκλώματος

Η επόμενη τροφοδοσία που αποφάσισα να φτιάξω στο Altium ήταν για την τροφοδοσία των υπόλοιπων στοιχείων δηλαδή για τα 3.3V που χρειάζεται το MAX6966 και τα 5V που αξιοποιούνται από το ESP32, OPA2380 και τα IR LED. Για αυτό, πρόσθεσα δυο πολύ γνωστούς ρυθμιστές τάσης (voltage regulator) τους AMS1117-3.3 και AMS1117-5.0 αντίστοιχα με 10 μ F στις εισόδους και εξόδους τους για βέλτιστη λειτουργία.

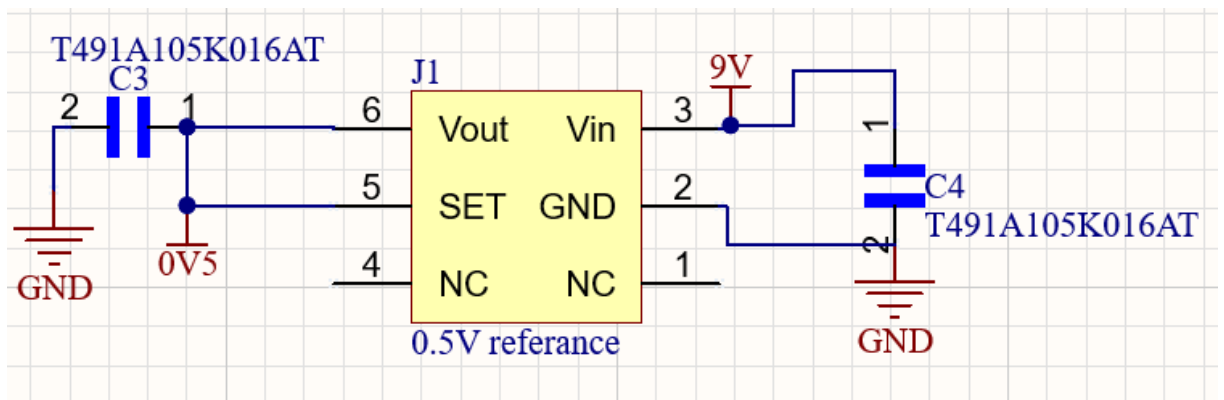


Εικόνα 27 (α) Σχηματικό ams1117-5.0



Εικόνα 27 (β) Σχηματικό ams1117-3.3

Η αμέσως επόμενη τροφοδοσία που ήταν απαραίτητη στο κύκλωμά μου ήταν μια τροφοδοσία αναφοράς που χρειάζονται οι ενισχυτές μετατροπής αντίστασης σε τάση, στα 0.5V. Οπότε, ένας ADR130 με δύο πυκνωτές από ταντάλιο των 10μF στις εισόδους και εξόδους ήταν η κρίθηκε ορθός για το κύκλωμά μου. Οι δύο πυκνωτές από ταντάλιο 10μF στις εισόδους και εξόδους βοηθούν στη σταθεροποίηση της τροφοδοσίας, διατηρώντας την αξιόπιστη και απρόσκοπτη λειτουργία του ενισχυτή. Αυτή η συνδυασμένη διάταξη εξασφαλίζει την καλύτερη απόδοση και σταθερότητα για τις απαιτήσεις του κυκλώματός μου.



Εικόνα 28 Σχηματικό υλοποίησης του ADR130.

Έπειτα έπρεπε να σχεδιάσω το κύκλωμα του OPA2380 συνδεδεμένο με τις φωτοδιόδους για την λήψη των σημάτων αλλά και τα κατάλληλα φίλτρα για την ενίσχυση του σήματος ή μη. Στην περίπτωση μας, με βάση την τιμή της αντίστασης και του πυκνωτή που χρησιμοποιώ, έχω δημιουργήσει ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης (Low-Pass Filter). Επίσης έχω προσθέσει χώρο για έξτρα φίλτρα σε περίπτωση που χρειαστούν στο πειραματικό κομμάτι που δεν χρησιμοποιήθηκαν. Η συχνότητα αποκοπής (f_c) για ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

όπου R είναι η αντίσταση και C είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή. Στην περίπτωση σας, $R = 75K\Omega$ και $C = 1pF$.

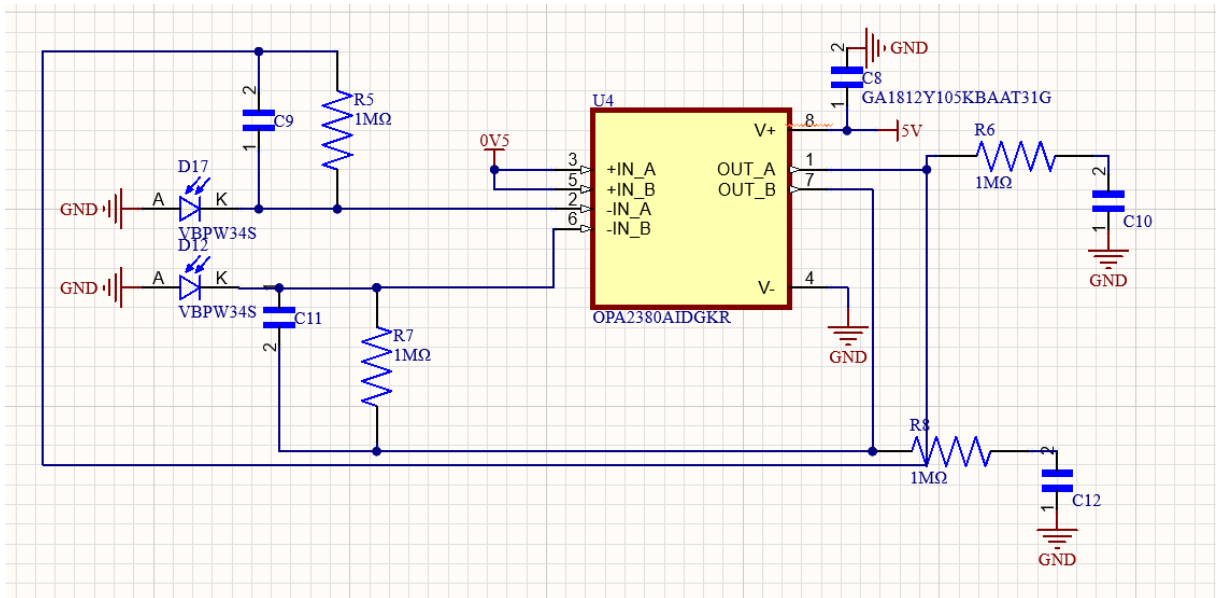
Ας υπολογίσουμε την συχνότητα αποκοπής:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 75 \times 10^3 \Omega \cdot 1 \times 10^{-12} F}$$

Αυτό μας δίνει:

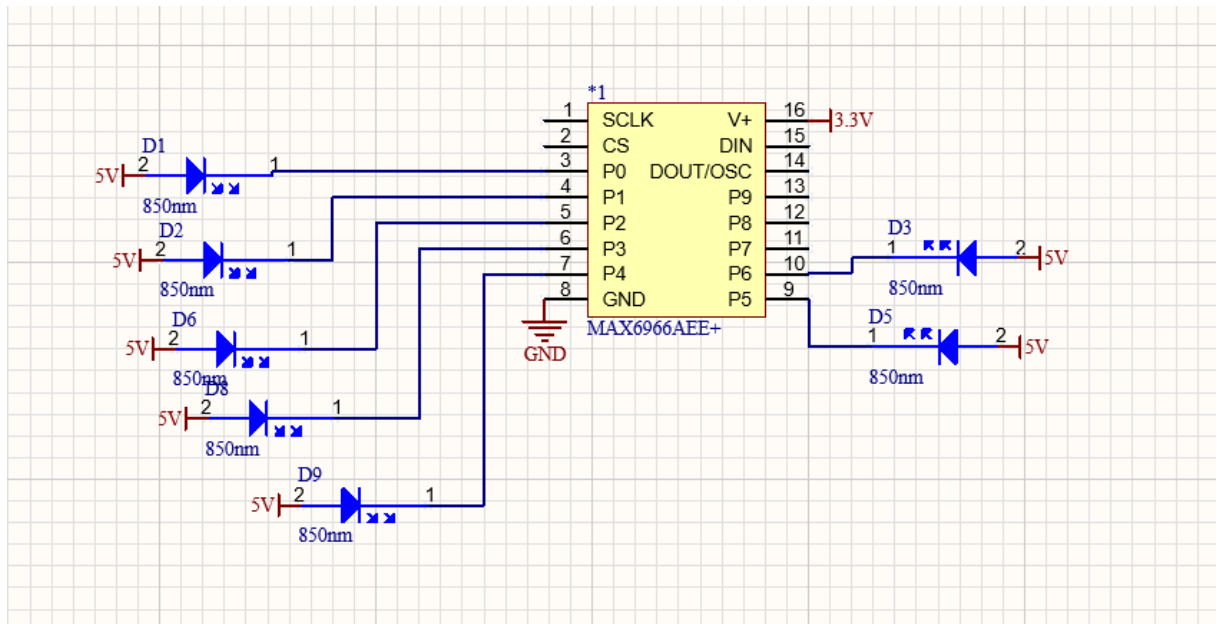
$$f_c \approx 2.12 \text{GHz}$$

Συνεπώς, το φίλτρο θα αποκόψει συχνότητες πάνω από περίπου 2.12 GHz. Αυτός είναι ένας θεωρητικός υπολογισμός και η πραγματική συχνότητα αποκοπής μπορεί να διαφέρει λόγω πρακτικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία, κλπ.



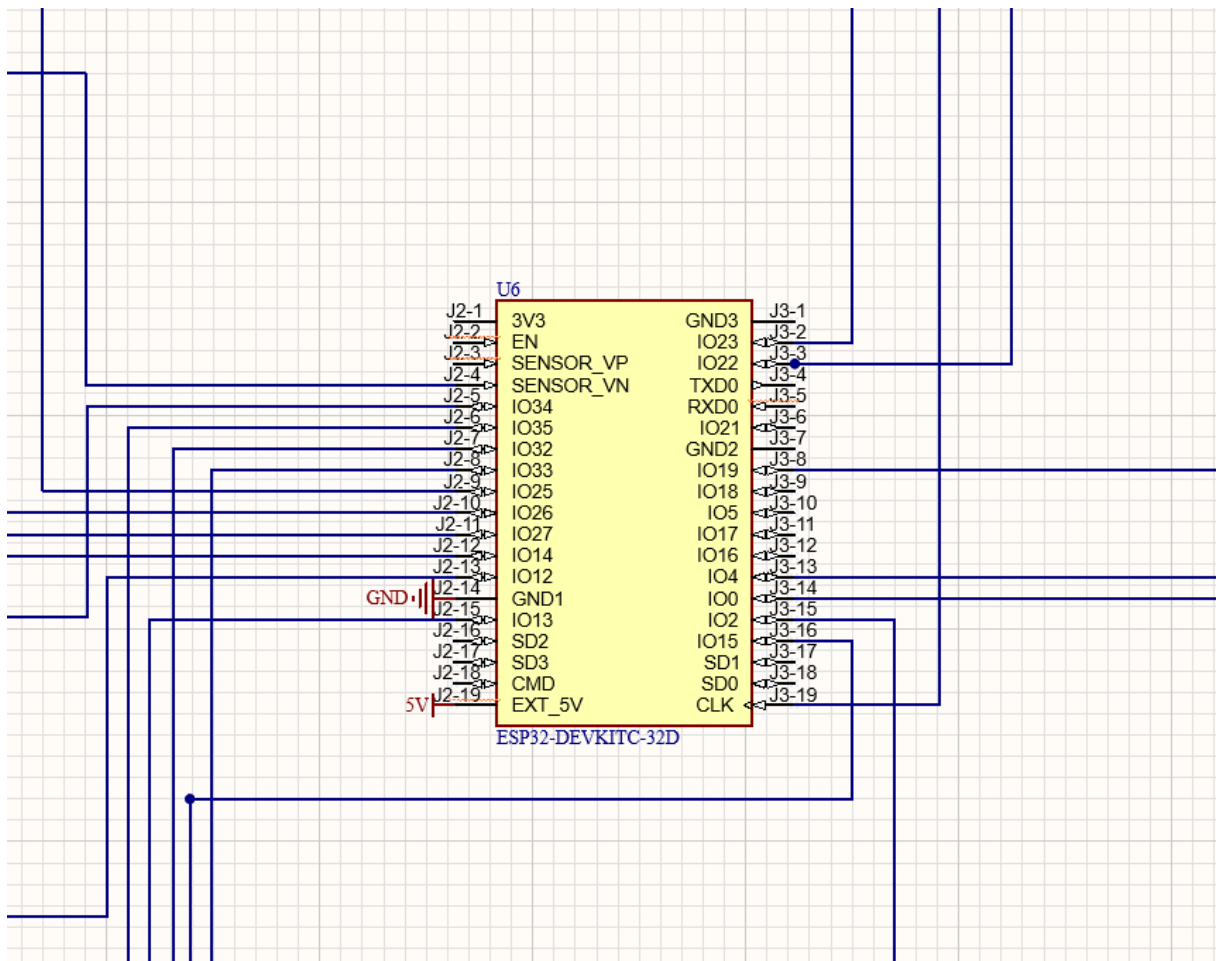
Εικόνα 29 Σχηματικό υλοποίησης του TIA OPA2380, με φωτοδιόδους VBPW34S.

Αργότερα, προχώρησα συνδέοντας το MAX6966AEE+ με τα αντίστοιχα 7 IR LED στα 850nm.

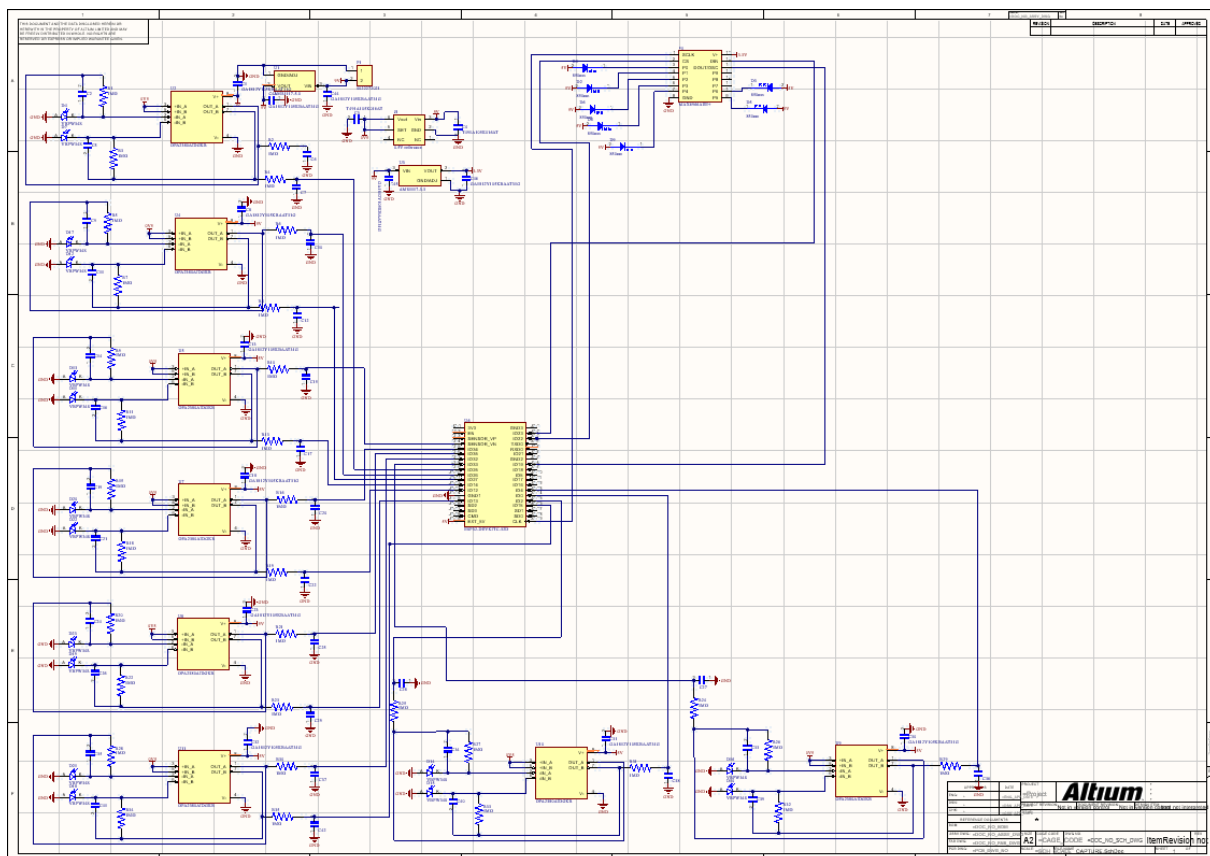


Εικόνα 30 Σχηματικό υλοποίησης MAX6966AEE+ με τα IR LED 850nm.

Τέλος, έπρεπε να συνδέσω το ESP32 με τις κατάλληλες τροφοδοσίες και αντίστοιχα στο MAX6966AEE+ ώστε να μπορεί να προγραμματιστεί για να δουλεύει στην default κατάσταση του που είναι τα 20ma ανά κάθε input.



Εικόνα 31 Σχηματικό σύνδεσης ESP32 με το υπόλοιπο κύκλωμα.



Εικόνα 32 Ολοκληρωμένο κύκλωμα στο σχηματικό.

6.2.4 Επιλογή και σχεδιασμός πλακέτας PCB

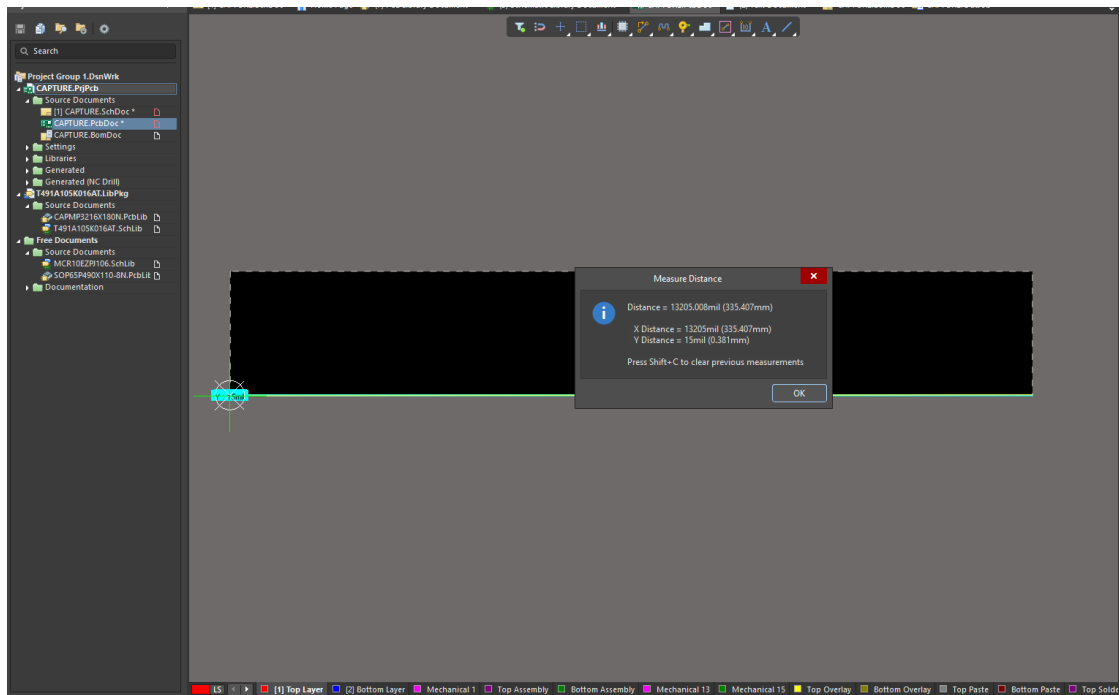
Στην προσπάθειά μου να αναπτύξω μια φορητή συσκευή fNIRS (Functional Near-Infrared Spectroscopy), αντιμετώπισα τη σημαντική πρόκληση της επιλογής της κατάλληλης πλακέτας για το κύκλωμά μου. Η συγκεκριμένη συσκευή, σχεδιασμένη για τη μέτρηση της αλλαγής στη συγκέντρωση της οξυγονωμένης αιμοσφαιρίνης στον εγκεφαλικό ιστό, απαιτούσε την εύρεση ενός στοιχείου που θα συνδύαζε ευελιξία, ανθεκτικότητα και ακρίβεια.

Αρχικά, εξέτασα την πιθανότητα χρήσης σκληρών πλακετών (rigid PCBs), αλλά σύντομα κατέληξα στο συμπέρασμα ότι αυτές δεν θα ήταν επαρκώς ευέλικτες για τις ανάγκες της φορητής συσκευής που είχα σχεδιάσει. Έτσι, στράφηκα στις εύκαμπτες πλακέτες (flex PCBs), οι οποίες μου φάνηκαν ιδανικές για το εγχείρημά μου.

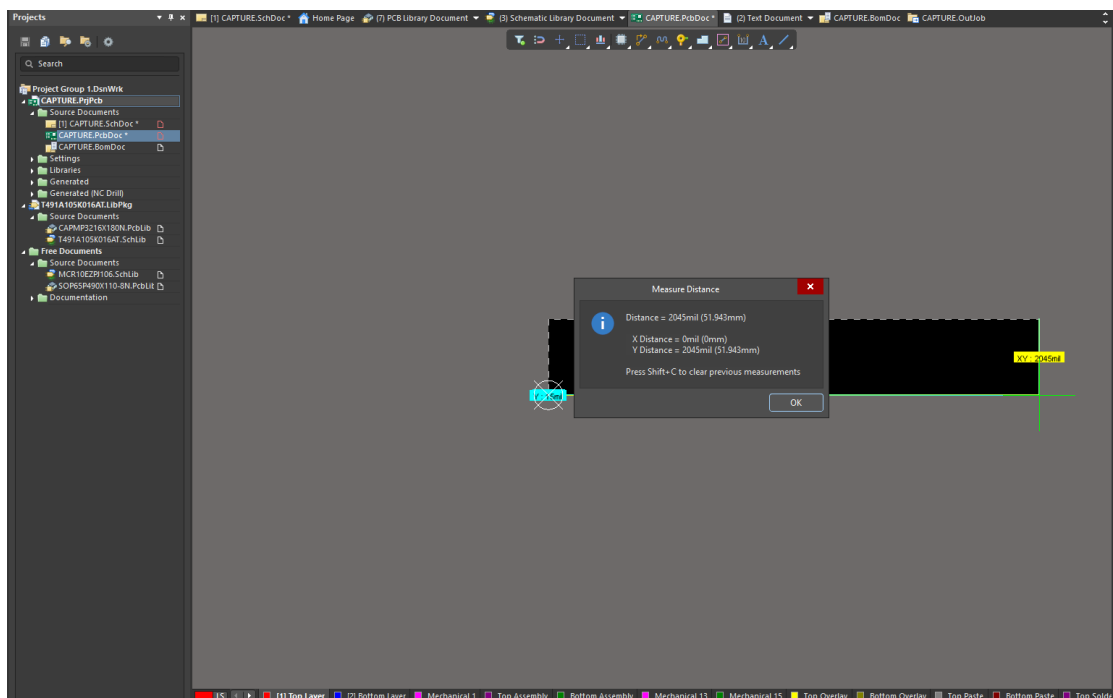
Μετά από ενδελεχή έρευνα, διαπίστωσα ότι οι εύκαμπτες πλακέτες της JLCPCB προσφέρουν μια σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Πρώτον, παρέχουν την απαραίτητη ευελιξία για να μπορέσει η συσκευή να προσαρμοστεί στις ανατομικές διαφορές των χρηστών. Δεύτερον, η ανθεκτικότητά τους στις μηχανικές καταπονήσεις καθιστά τις πλακέτες ιδανικές για φορητές εφαρμογές. Τρίτον, οι εύκαμπτες πλακέτες της JLCPCB διαθέτουν την δυνατότητα ενσωμάτωσης πολύπλοκων κυκλωμάτων και υψηλής ποιότητας υλικών, αυξάνοντας την απόδοση και την αξιοπιστία της συσκευής.

Η χρήση των εύκαμπτων πλακετών μου επέτρεψε να εξοπλίσω την συσκευή fNIRS με την απαραίτητη ακρίβεια και ευελιξία, παρέχοντας έναν ουσιαστικό πόρο για την νευροεπιστήμη και την ιατρική τεχνολογία. Η τελική επιλογή της εύκαμπτης πλακέτας από την JLCPCB αποδείχθηκε ιδανική, καθώς συνδύασε την απαραίτητη ανθεκτικότητα, ευελιξία και ακρίβεια που απαιτούνταν για την επιτυχή υλοποίηση του σχεδίου μου.

Στην σχεδίαση της πλακέτας στο περιβάλλον Altium έπρεπε να ξεκινήσω χρησιμοποιώντας το κατάλληλο μέγεθος της πλακέτας που θα χρειαστούμε για να είναι αρκετή για όλη την επιφάνεια του τριχωτού της κεφαλής στο σημείο του κινητικού φλοιού (motor cortex).

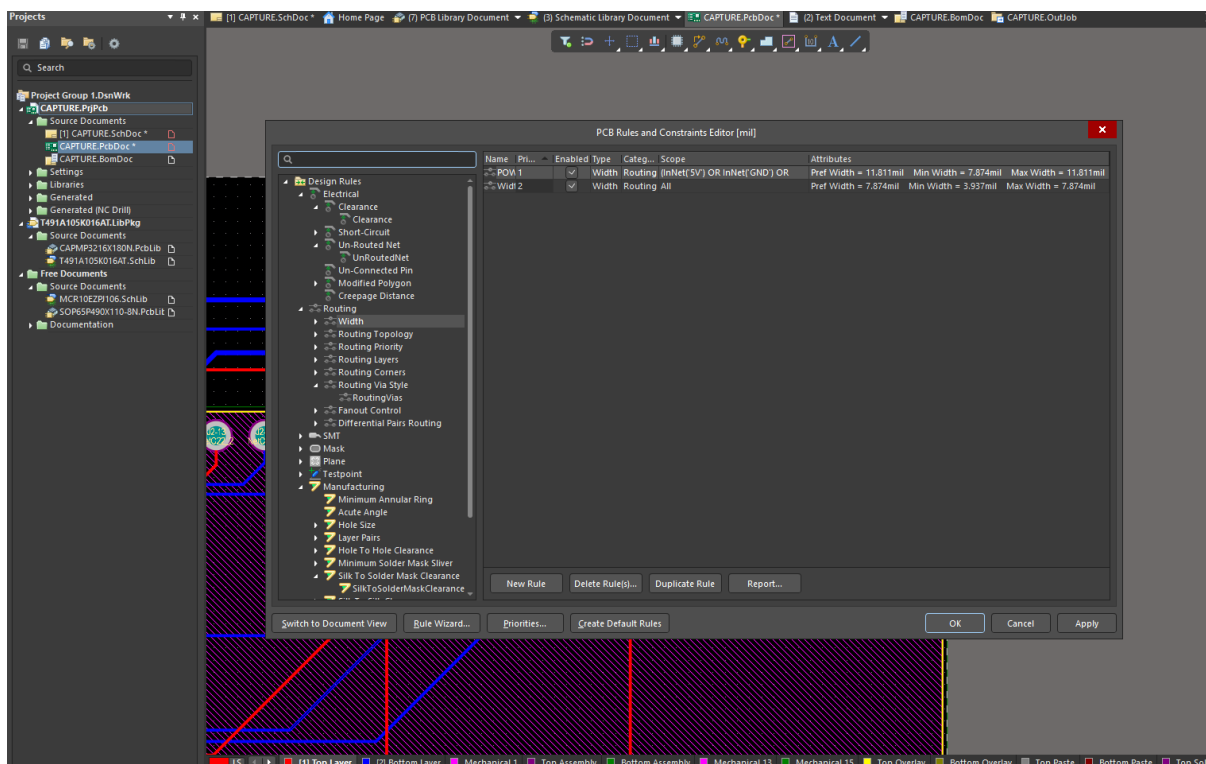


Εικόνα 33(α) Μέγεθος μήκους της πλακέτας PCB.



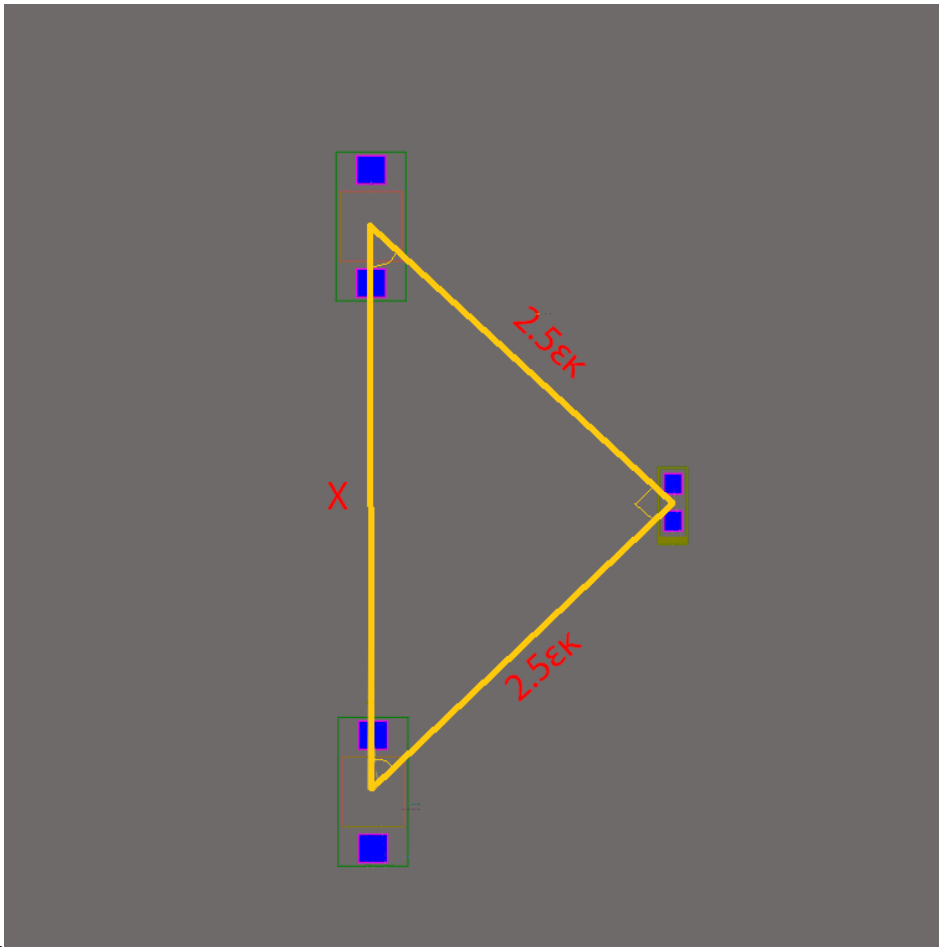
Εικόνα 34 (β) Μέγεθος ύψους της πλακέτας PCB

Τώρα, έπρεπε να φτιαχτούν τα κατάλληλα rules για την σχεδίαση της πλακέτας με τα στοιχεία ενσωματωμένα, όπως το πάχος των routes σε κάθε περίπτωση, το μέγεθος του κάθε vias, η απόσταση των pads, του ενός από του άλλου κλπ.



Εικόνα 35 Design Rules πλακέτας PCB.

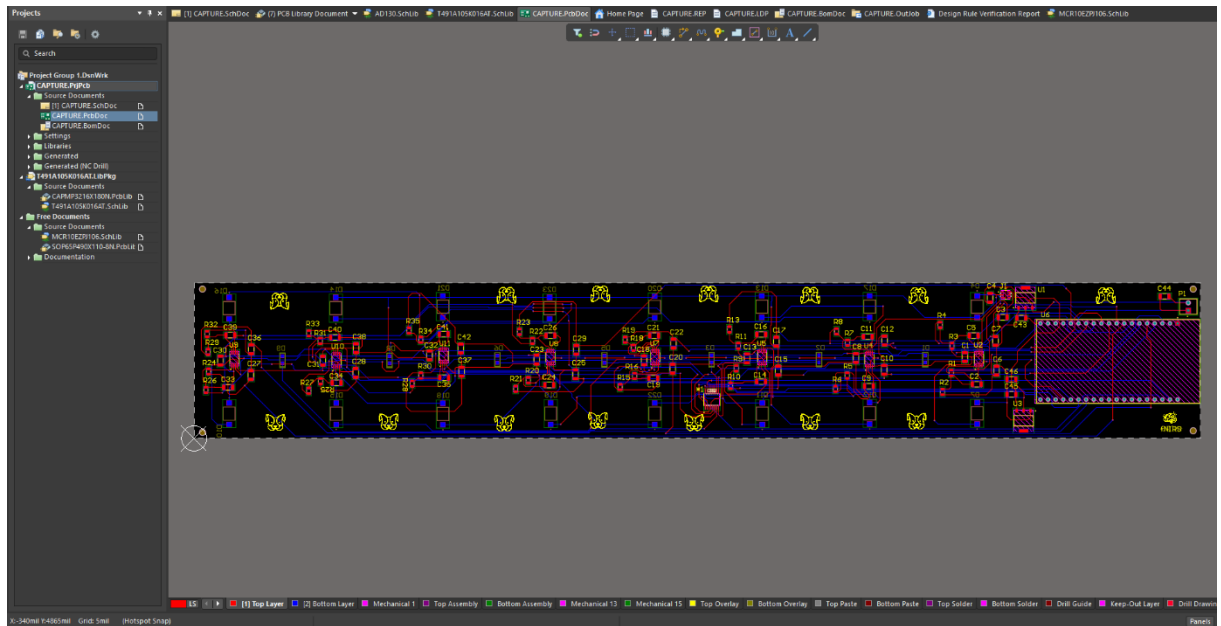
Μετά τα design rules, τοποθέτησα στα σημεία στο bottom layer τις φωτοδιόδους και τα LED υπέρυθρων στις κατάλληλες αποστάσεις οι οποίες είναι 25χιλιοστά απόσταση φωτοδιόδου και LED, που είναι μεταξύ των 2 με 3 εκατοστά όπως προτείνουν οι βιβλιογραφίες. Για να τα θέσω στην κατάλληλη απόσταση χρησιμοποίησα ένα εργαλείο που προσφέρει το λογισμικό Altium Designer και χρησιμοποίησα το πυθαγόρειο θεώρημα για να βρώ την απόσταση μεταξύ των φωτοδιόδων με τον εξής τρόπο.



Εικόνα 36 πυθαγόρειο θεώρημα με φωτοδιόδους και LED.

Χρησιμοποίησα το πυθαγόρειο θεώρημα, οπότε στην περίπτωση μου είχα.
 $(2.5)^2 + (2.5)^2 = x^2 \Rightarrow x = 3.53$

Αφού έβαλα στην επιθυμητή απόσταση τους αισθητήρες και τους πομπούς μου, ξεκίνησα βάζοντας τα πιο σημαντικά στοιχεία, στα οποία συνδέονται οι περισσότερες διαδρομές όπως το MAX6966, μετά κάθε OPA2380 και έπειτα στην άκρη το ESP32. Μετά, γύρω από κάθε βαθμίδα έβαλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα που χρειάζεται, με πανομοιότυπο τρόπο ώστε να βολέψουν στην κόλληση τους και για την αποφυγή λάθους. Τέλος, τοποθέτησα ό,τι ήταν σχετικό με την τροφοδοσία του κυκλώματος όπως τα AMS1117 και το ADR130, και πρόσθεσα μια έξτρα εξατομίκευση για να προσδιορίσω την μοναδικότητα της πλακέτας με κάποια γραφικά που σχεδίασα.



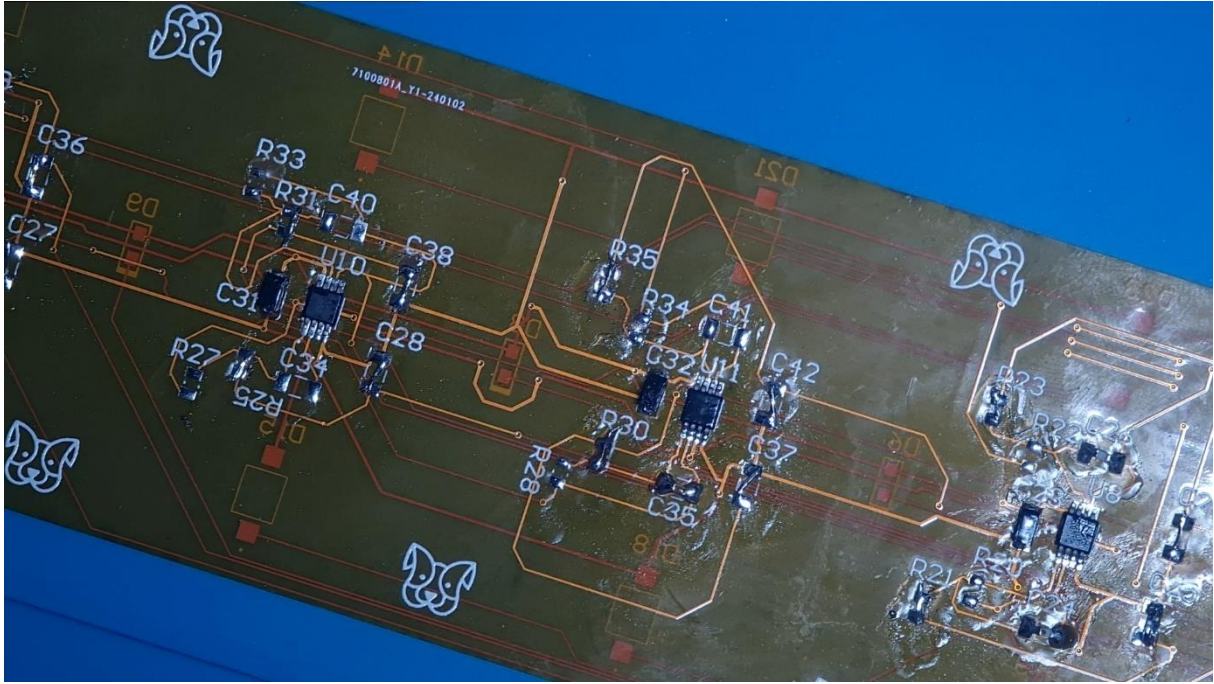
Εικόνα 37 Ολοκληρωμένη πλακέτα fNIRS

6.3 Κόστος παραγωγής

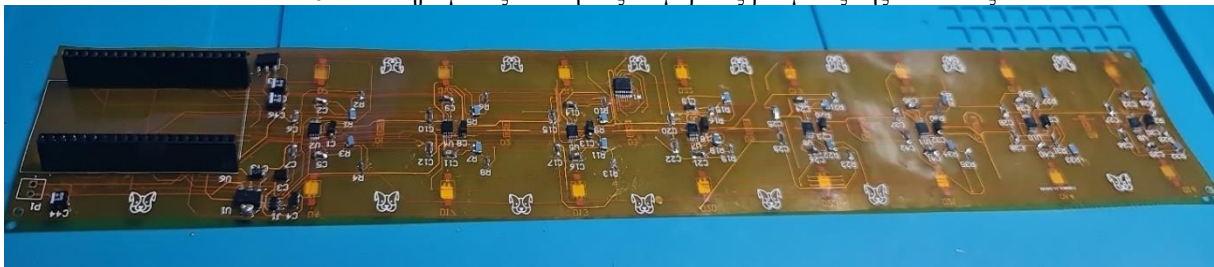
Στο παρόν κεφάλαιο, θα αναλυθεί λεπτομερώς η διάρθρωση κόστους κάθε συστατικού που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή της συσκευής fNIRS. Η ανάλυση αυτή είναι κρίσιμη για την κατανόηση της οικονομικής διάστασης του έργου και της επίδρασής της στην τελική τιμή της συσκευής. Θα παρουσιαστούν τα κόστη απόκτησης των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, όπως οι μικροελεγκτές, οι αισθητήρες, οι ενισχυτές σήματος, καθώς και τα υλικά για την κατασκευή της πλακέτας. Επιπρόσθετα, θα αναφερθούν τα κόστη σχεδίασης, παραγωγής, και αποστολής, προκειμένου να παρέχεται μια ολοκληρωμένη εικόνα των οικονομικών παραγόντων που επηρεάζουν την ανάπτυξη της συσκευής fNIRS. Η συγκεκριμένη ανάλυση θα συμβάλλει στην κατανόηση των οικονομικών προκλήσεων και θα διευκολύνει την αξιολόγηση της βιωσιμότητας και της εφικτότητας του έργου.

Πίνακας 1 Κόστος υλικών

A/A	Αντικείμενο	Αριθμός	Αξία
1	SML-H15RTT86 IR EMITTER, 850NM, 2.2MW/SR, 1.4V,	7	3.58€
2	MAX6966AEE+ LED DRIVER	1	5.15€
3	T520A226M006ATE090 CAP, 22μF, 6.3V, 20%	1	0.48€
4	ADR130AUJZ-REEL7 VOLT REF, 0.5V, TSOT,	1	2.84€
5	OPA2380AIDGKT AMP, TRANSIMPEDANCE, 2380	8	76.77€
6	593D106X9020B2TE3 CAP, 10UF, 20V, TANT	3	1.18€
7	T499A105K016ATE10K CAP, 1μF, 16V, 10%	8	2.30€
8	885012006045 CAP, 1PF, 50V	16	0.43€
9	362006000190 RES, 10K, 5%, 0.25W	16	0.20€
10	VBPW34S	17	11.19€
11	AMS1117-3.3V	1	0.19€
12	AMS1117-5.0 5V	1	0.19€
13	FLEX PCB	1	6.38€



Εικόνα 40 Ολοκληρωμένες κολλήσεις σε μερικές βαθμίδες της πλακέτας.



Εικόνα 41 (α) Ολοκληρωμένη συσκευή εμπρός/στη όψη



Εικόνα 42 (β) Ολοκληρωμένη συσκευή πίσω/στη όψη.

6.4 Περιγραφή κώδικα

Στην ενότητα αυτή, θα προχωρήσουμε στην ανάλυση του κώδικα προγραμματισμού του ESP32, ο οποίος αποτελεί τον εγκέφαλο της συσκευής fNIRS που αναπτύχθηκε. Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιεί τη βιβλιοθήκη SPI για την επικοινωνία μεταξύ του ESP32 και του MAX6966, το οποίο είναι ένας ελεγκτής LED. Ορίζονται επίσης τα απαραίτητα pins για την Chip Select, το Clock, το Master Out Slave In και το Data Out, καθώς και οι αντίστοιχες ακίδες για τους φωτοдиодους.

Ο κώδικας ξεκινά με την αρχικοποίηση του MAX6966, ρυθμίζοντας τον σε κατάσταση λειτουργίας και ορίζοντας όλες τις πόρτες σε υψηλή αντίσταση, η οποία στη συνέχεια υπερκαλύπτεται από την ένταση

του φωτός. Κάθε πόρτα ρυθμίζεται να ενεργοποιεί έναν LED με τη μέγιστη ένταση. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των ακίδων των φωτοдиодων ως εισόδους, ώστε να μπορούν να ανιχνεύσουν το φως.

Στο κύριο μέρος του κώδικα (loop), πραγματοποιείται η συλλογή δεδομένων από τους φωτοдиодους με ένα δεδομένο χρονικό διάστημα δειγματοληψίας. Για κάθε διάστημα, αναγνώστες πραγματοποιούνται από όλους τους φωτοдиодους και τα δεδομένα αποθηκεύονται σε μια δομή. Τέλος, τα δεδομένα αυτά εκτυπώνονται στη σειριακή θύρα, παρέχοντας έναν πλήρη κατάλογο των αναγνώσεων από κάθε φωτοдиодο για περαιτέρω ανάλυση.

Η συγκεκριμένη ανάλυση του κώδικα προγραμματισμού του ESP32 αποσκοπεί στην κατανόηση της λειτουργικότητας και της διαδικασίας συλλογής δεδομένων της συσκευής fNIRS, καθώς και στην αξιοποίηση των τεχνολογικών δυνατοτήτων που προσφέρει το ESP32 για την ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων μέτρησης στον τομέα της νευροεπιστήμης.

6.4.1 Κώδικας για το esp32

Εδώ θα αναλύσουμε τον κώδικα του esp32 με περισσότερες λεπτομέρειες:

Συμπερίληψη Βιβλιοθηκών:

```
#include <WiFi.h>
#include <SPI.h>
```

1. Συμπεριλαμβάνονται οι βιβλιοθήκες για το Wi-Fi και το SPI.

Διαμόρφωση Wi-Fi:

```
const char *ssid = "το-SSID-σας";
const char *password = "ο-κωδικός-σας";
```

2. Δηλώνονται το όνομα (SSID) και ο κωδικός του Wi-Fi δικτύου.

Δημιουργία WiFi Server:

```
WiFiServer server(80);
```

3. Δημιουργείται ένας server που ακούει στη θύρα 80.

Καθορισμός Αρχιτεκτονικής Συσκευής:

```
#define PIN_CS 22
#define PIN_CLK 20
#define PIN_MOSI 23
#define PIN_DOUT 19
```

4. Καθορίζονται οι ακροδέκτες για τον έλεγχο του MAX6966 μέσω SPI.

Αρχικοποίηση Μεταβλητών:

```
const int photodiodePins[] = {36, 25, 26, 27, 39, 14, 34, 12, 35, 13, 32, 15, 2, 0, 33, 4};
const int numPhotodiodes = sizeof(photodiodePins) / sizeof(photodiodePins[0]);
```

```
const unsigned long samplingInterval = 1700; // Διάστημα δειγματοληψίας σε
μικροδευτερόλεπτα
```

```
struct Reading {
```

```
int value;
unsigned long timestamp;
};
```

```
Reading readings[16][100];
```

5. Ορίζονται μεταβλητές για τους ακροδέκτες, τον αριθμό των φωτοδιόδων, το διάστημα δειγματοληψίας και δομές δεδομένων για τις μετρήσεις.

Συνεχίζω με την συνάρτηση:

```
void sendbyte(byte address, byte value) {
    digitalWrite(PIN_CS, LOW); // Ενεργοποίηση επιλογής τσιπ
    SPI.transfer(address); // Αποστολή διεύθυνσης
    SPI.transfer(value); // Αποστολή τιμής
    digitalWrite(PIN_CS, HIGH); // Απενεργοποίηση επιλογής τσιπ
}
```

Συναρτήσεις για MAX6966:

Η sendbyte, χρησιμοποιείται για να μεταδώσει ένα byte (ένα byte διεύθυνσης και ένα byte τιμής) μέσω της διεπαφής SPI προς ένα συσκευή. Ας εξηγήσουμε κάθε βήμα:

6. digitalWrite(PIN_CS, LOW);: Αυτή η εντολή ρυθμίζει τον ακροδέκτη που χρησιμοποιείται για την επιλογή του τσιπ (Chip Select - CS) σε χαμηλό επίπεδο, ενεργοποιώντας έτσι την επικοινωνία με το συγκεκριμένο τσιπ.
7. SPI.transfer(address);: Αυτή η εντολή μεταδίδει τη διεύθυνση του μηνύματος που θέλουμε να στείλουμε στον συγκεκριμένο τσιπ μέσω του διαύλου SPI.
8. SPI.transfer(value);: Αυτή η εντολή μεταδίδει την τιμή που θέλουμε να στείλουμε στον τσιπ, συνήθως ένα δεδομένο ή μια ρύθμιση, μέσω του διαύλου SPI.
9. digitalWrite(PIN_CS, HIGH);: Τέλος, αυτή η εντολή θέτει τον ακροδέκτη της επιλογής του τσιπ (CS) σε υψηλό επίπεδο, απενεργοποιώντας την επιλογή του τσιπ μετά την ολοκλήρωση της μετάδοσης των δεδομένων.
10. Κατά συνέπεια, αυτό το τμήμα κώδικα εκτελεί τη μετάδοση ενός byte διεύθυνσης και ενός byte τιμής μέσω του διαύλου SPI προς τον συγκεκριμένο τσιπ, ενεργοποιώντας και απενεργοποιώντας την επιλογή του τσιπ ανάλογα.

```
struct Reading {
    int value;
    unsigned long timestamp;
};
```

```
Reading readings[16][100];
```

11. Ορίζεται η δομή Reading που περιέχει μια τιμή και ένα timestamp.
12. Ο πίνακας readings διατηρεί μια ιστορία μετρήσεων για κάθε φωτοδίοδο.

Συνεχίζω με τη συνάρτηση για την αποστολή δεδομένων μέσω Wi-Fi:

```
void sendDataOverWiFi(String data) {
```

```
WiFiClient client = server.available();

if (client) {
  client.print(data);
  client.stop();
}
}
```

Συνάρτηση για Αποστολή Δεδομένων μέσω Wi-Fi:

13. sendDataOverWiFi: Ανοίγει έναν client για σύνδεση στον server και στέλνει τα δεδομένα μέσω Wi-Fi.

Συνεχίζω με την setup():

```
void setup() {
  pinMode(PIN_CS, OUTPUT); // Ορισμός ως έξοδος του pin CS
  SPI.begin(); // Έναρξη του SPI

  WiFi.begin(ssid, password);

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(1000);
    Serial.println("Σύνδεση στο Wi-Fi...");
  }

  Serial.println("Συνδέθηκε στο Wi-Fi");
  server.begin();

  // Ρύθμιση του κάθε καναλιού σε 20mA
  sendbyte(0x10, 0x00); //set unit to shutdown.
  delay(100);
  sendbyte(0x15, 0x07); // ορίσε την τρέχουσα global στα 20mA
  sendbyte(0x0A, 0N); //Κάνει τα κανάλια ON

  for (int i = 0; i < numPhotodiodes; i++) {
    pinMode(photodiodePins[i], INPUT);
  }
}
```

Εκκίνηση:

- Αρχικοποίηση Serial, σύνδεση στο Wi-Fi και αναμονή για σύνδεση.
- Δημιουργία server στη θύρα 80 και εκκίνηση του SPI.
- Ρύθμιση του CS pin και αρχικοποίηση του MAX6966.
- Ορισμός των pins των φωτοδιόδων ως είσοδοι.

Συνεχίζω με την loop():

```
void loop() {
  unsigned long previousMicros = micros();
  for (int n = 0; n < 100; n++) {
    while (micros() - previousMicros < samplingInterval) {
    }

    previousMicros = micros();
  }
}
```

```

for (int i = 0; i < numPhotodiodes; i++) {
    readings[i][n].value = analogRead(photodiodePins[i]);
}
}

for (int n = 0; n < 100; n++) {
    String dataToSend = "";
    for (int i = 0; i < numPhotodiodes; i++) {
        dataToSend += String(readings[i][n].value) + "\t";
    }
    sendDataOverWiFi(dataToSend);
}
}

```

Κύριος Βρόχος:

- Χρησιμοποιείται η συνάρτηση `micros()` για την μέτρηση του χρόνου σε μικροδευτερόλεπτα.
- Ένα `for loop` για τις μετρήσεις 100 φορές μετά από κάθε `samplingInterval`.
- Επανάληψη για τη δημιουργία `String` δεδομένων και αποστολή μέσω `Wi-Fi`.

Τέλος, ας εξηγήσουμε τα `micros()`, `previousMicros`, `samplingInterval` και τις `for`:

Χρονική Μέτρηση με `micros()`:

```
unsigned long previousMicros = micros();
```

Η μεταβλητή `previousMicros` αρχικοποιείται με την τρέχουσα χρονική στιγμή σε μικροδευτερόλεπτα.

Ελέγχος Διαστήματος Χρόνου:

```
while (micros() - previousMicros < samplingInterval) {
}
```

Αυτή η επανάληψη περιμένει μέχρι να περάσει το χρονικό διάστημα `samplingInterval` από την τελευταία μέτρηση.

Μέτρηση Φωτοδιόδων:

```
for (int i = 0; i < numPhotodiodes; i++) {
    readings[i][n].value = analogRead(photodiodePins[i]);
}

```

14. Κάθε φορά που περνάει το χρονικό διάστημα, μετράει τις τιμές από τις φωτοδιόδους.

Αποστολή Δεδομένων μέσω `Wi-Fi`:

```
for (int n = 0; n < 100; n++) {
```

```
String dataToSend = "";
for (int i = 0; i < numPhotodiodes; i++) {
    dataToSend += String(readings[i][n].value) + "\t";
}
sendDataOverWiFi(dataToSend);
}
```

15. Μετά τη συλλογή 100 μετρήσεων, δημιουργείται ένα String με τις τιμές και αποστέλλεται μέσω Wi-Fi.

Η παραπάνω ανάλυση έχει ως στόχο να παρέχει μια σαφή και ολοκληρωμένη εικόνα του κώδικα.

6.4.2 Κώδικας και παραμετροποίηση του νευρωνικού δικτύου

Στην ενότητα αυτή, εξετάζεται ο κώδικας και η παραμετροποίηση του νευρωνικού δικτύου. Παρέχεται βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας του μοντέλου μέσω της ανάλυσης του κώδικα, ενώ ταυτόχρονα εξετάζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοσή του. Η ενότητα επικεντρώνεται στις διάφορες παραμετροποιήσεις που μπορούν να προσαρμοστούν για τη βελτιστοποίηση του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο, αναδεικνύεται η σημασία της διαμόρφωσης του νευρωνικού δικτύου, αποτελώντας κρίσιμο τμήμα της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της εργασίας.

Ας εξετάσουμε βήμα-βήμα τον κώδικα του νευρωνικού δικτύου:

Εισαγωγή των Βιβλιοθηκών:

```
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import LSTM, Dense, Dropout
from sklearn.metrics import r2_score
from sklearn.metrics import mean_squared_error
from sklearn.metrics import mean_absolute_error
from sklearn.metrics import accuracy_score
from sklearn.model_selection import train_test_split
```

Αρχίζουμε με τις εισαγωγές. Η βιβλιοθήκη NumPy χρησιμοποιείται για εργασίες με πίνακες και πίνακες πολλαπλών διαστάσεων. Η TensorFlow είναι η βάση του Keras, το οποίο χρησιμοποιούμε για τη δημιουργία του νευρωνικού δικτύου. Επιπλέον, φορτώνουμε τις βιβλιοθήκες Pandas και Scikit-Learn για εργασίες όπως η ανάγνωση αρχείων CSV και ο διαχωρισμός των δεδομένων.

Φόρτωση των Δεδομένων από το Αρχείο CSV:

```
data = pd.read_csv('/Users/xodym/Downloads/final.csv', skiprows=1)
data = data.values
```

Διαβάζουμε τα δεδομένα μας από ένα αρχείο CSV χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη Pandas. Οι παράμετροι skiprows=1 αγνοούν την πρώτη γραμμή του αρχείου, που πιθανότατα περιέχει κεφαλίδες. Τέλος, μετατρέπουμε τα δεδομένα σε έναν πίνακα NumPy για ευκολότερη επεξεργασία.

Προετοιμασία των Δεδομένων:

```
X_train = np.asarray(data[:, 0:16])
Y_train = np.asarray(data[:, 16])
X_train = np.reshape(X_train, (-1, 1, 16))
Y_train = np.reshape(Y_train, (-1, 1, 1))
```

Εδώ, διαχωρίζουμε τα δεδομένα μας σε χαρακτηριστικά (features) και ετικέτες (labels). Τα πρώτα 16 χαρακτηριστικά αποτελούν τα χαρακτηριστικά εισόδου (X_train), ενώ η 17η στήλη αποτελεί τις ετικέτες εξόδου (Y_train). Στη συνέχεια, αλλάζουμε το σχήμα των δεδομένων εισόδου (X_train) για να είναι συμβατό με τις απαιτήσεις του μοντέλου LSTM, το οποίο περιμένει είσοδο με σχήμα (πλήθος δειγμάτων, μήκος ακολουθίας, αριθμός χαρακτηριστικών).

Αναδιαμόρφωση των Δεδομένων για το LSTM:

```
model = Sequential()
model.add(LSTM(100, input_shape=(1, 16), return_sequences=True))
model.add(LSTM(100, return_sequences=True, recurrent_dropout=0.2))
model.add(LSTM(100, return_sequences=True, recurrent_dropout=0.2))
model.add(LSTM(100, return_sequences=False, recurrent_dropout=0.2))
model.add(Dense(1, activation='linear'))
```

Εδώ, ορίζουμε το μοντέλο μας χρησιμοποιώντας την κλάση Sequential του Keras. Προσθέτουμε τέσσερα επίπεδα LSTM, με κάθε ένα να έχει 100 μονάδες μνήμης. Το πρώτο επίπεδο έχει παράμετρο input_shape=(1, 16) που υποδηλώνει ότι το μήκος της ακολουθίας είναι 1 και το πλήθος των χαρακτηριστικών είναι 16. Τα επόμενα τρία επίπεδα LSTM έχουν παράμετρο return_sequences=True, ενώ το τελευταίο έχει return_sequences=False, προκειμένου να παράγει έναν μόνο πρόβλεψη ανά δείγμα εισόδου. Τέλος, προσθέτουμε ένα επίπεδο Dense με έναν νευρώνα και ενεργοποίηση συνάρτησης γραμμικής.

Διαχωρισμός των Δεδομένων σε Σύνολα Εκπαίδευσης και Ελέγχου:

```
model.compile(optimizer='adam', loss='mean_squared_error')
X_train = X_train.astype(np.int32)
Y_train = Y_train.astype(np.int32)
model.fit(X_train, Y_train, batch_size=32, epochs=100)
```

Εδώ, συντονίζουμε το μοντέλο χρησιμοποιώντας τον βελτιστοποιητή "adam" και τη συνάρτηση απώλειας "mean_squared_error". Στη συνέχεια, εκπαιδεύουμε το μοντέλο για 100 εποχές, με ένα μέγεθος παρτίδας (batch size) 32. Οι εποχές αναφέρονται στον αριθμό των φορών που το μοντέλο βλέπει τα πλήρη δεδομένα εκπαίδευσης. Στην πρώτη γραμμή, μετατρέπουμε τα δεδομένα εκπαίδευσης σε ακέραιους αριθμούς 32-bit για συμβατότητα με το μοντέλο.

Αποθηκεύουμε και φορτώνουμε το εκπαιδευμένο μοντέλο:

```
model.save('my_model.h5')
```

```
model = tf.keras.models.load_model('my_model.h5')
```

Εδώ, αποθηκεύουμε το εκπαιδευμένο μοντέλο σε ένα αρχείο με το όνομα 'my_model.h5' χρησιμοποιώντας τη μέθοδο save(). Στη συνέχεια, φορτώνουμε το αποθηκευμένο μοντέλο από το αρχείο που δημιουργήσαμε προηγουμένως, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο load_model() από το Keras.

Φόρτωση αρχείου τύπου .csv:

```
data = pd.read_csv('/Users/xodym/Downloads/finaltest.csv', skiprows=1)
data = data.values
```

```
X_test = np.asarray(data[:, :16])
Y_test = np.asarray(data[:, -1])
num_samples = X_test.shape[0]
X_test = np.reshape(X_test, (num_samples, 1, 16))
```

```
y_pred = model.predict(X_test)
```

```
threshold = 0.6
y_pred = (y_pred > threshold).astype(np.int32)
Y_test = (Y_test > threshold).astype(np.int32)
```

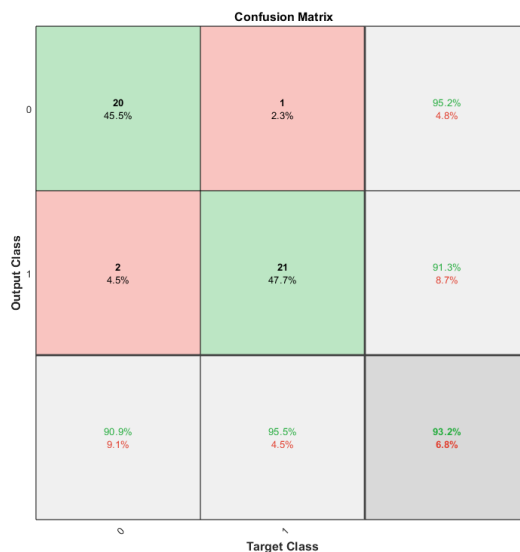
Εδώ, φορτώνουμε τα δεδομένα ελέγχου από ένα αρχείο CSV και τα προετοιμάζουμε ώστε να είναι συμβατά με το μοντέλο. Στη συνέχεια, κάνουμε προβλέψεις χρησιμοποιώντας το μοντέλο που εκπαιδεύσαμε προηγουμένως στα δεδομένα εκπαίδευσης. Ακόμα, εφαρμόζουμε το κατώφλι που ορίσαμε κατά την εκπαίδευση για την αξιολόγηση των προβλέψεων.

Υπολογισμός της ακρίβειας:

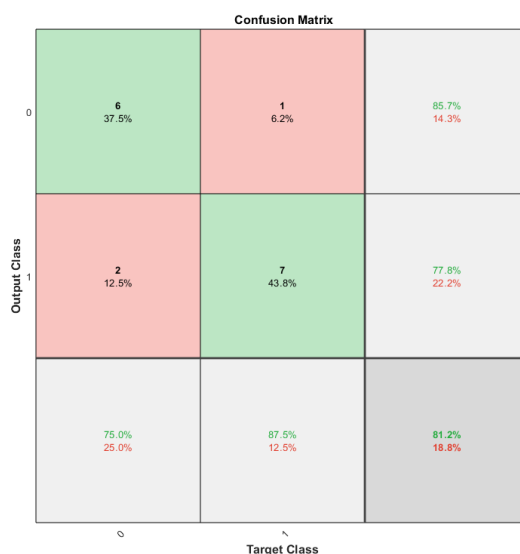
```
accuracy = accuracy_score(Y_test, y_pred)
print("Ακρίβεια:", accuracy*100, "%")
```

Εδώ, χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση accuracy_score από τη βιβλιοθήκη scikit-learn για να υπολογίσουμε την ακρίβεια των προβλέψεων σε σχέση με τις πραγματικές ετικέτες του συνόλου ελέγχου. Η ακρίβεια εκφράζεται σε ποσοστό και εκτυπώνεται για αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου.

Η συνέχεια της ανάλυσης περιλαμβάνει τη σύνταξη του πίνακα σύγκρισης για τα δεδομένα εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου και τα δεδομένα ελέγχου. Ο πίνακας σύγκρισης αντιπροσωπεύει τη σύγκριση μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων ετικετών των δεδομένων, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης του μοντέλου. Συγκεκριμένα, ο πίνακας αυτός παρουσιάζει τον αριθμό των πραγματικών και προβλεπόμενων δειγμάτων ανά κλάση, επιτρέποντας την εκτίμηση των τυχόν προβλημάτων στην ταξινόμηση. Με την ανάλυση αυτή, αξιολογείται η ικανότητα του μοντέλου να κατηγοριοποιεί σωστά τα δεδομένα, παρέχοντας ένα σημαντικό εργαλείο για την προσαρμογή και βελτίωση της απόδοσής του. Επιπλέον, ο πίνακας σύγκρισης των δεδομένων ελέγχου παρέχει μια ανεξάρτητη επιβεβαίωση της γενίκευσης του μοντέλου, καθώς αξιολογείται η απόδοσή του σε νέα, μη εκπαιδευτικά δεδομένα.



Εικόνα 43 πίνακας σύγχυσης για τα δεδομένα εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου



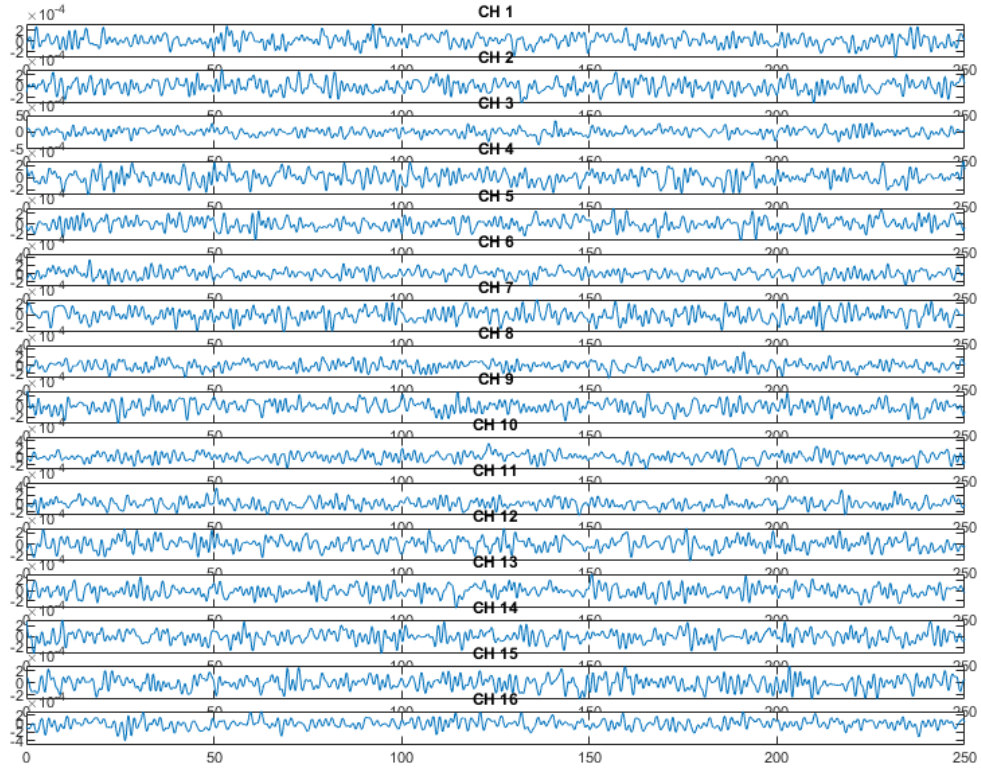
Εικόνα 44 πίνακας σύγχυσης για τα δεδομένα ελέγχου του νευρωνικού δικτύου

6.5 Λήψη δεδομένων

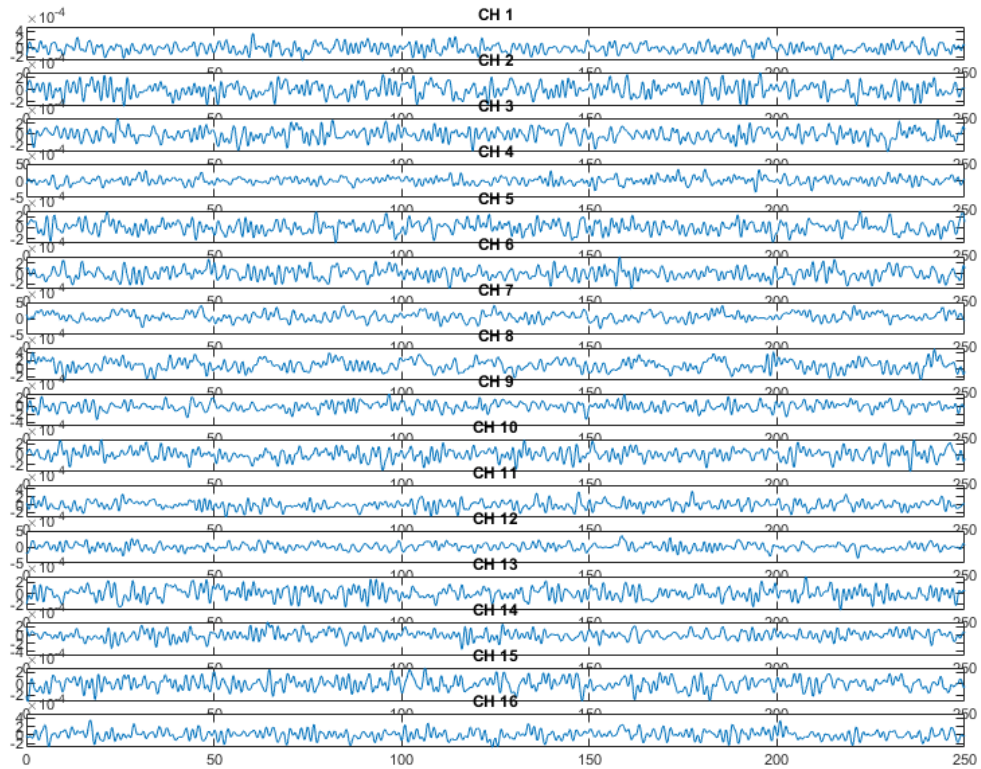
Στην ενότητα λήψης δεδομένων, πραγματοποιήσα τη συλλογή αντιπροσωπευτικών δεδομένων από 10 διακριτικές μετρήσεις. Κατά τη διάρκεια αυτών των μετρήσεων, βρισκόμουν σε απόλυτη ηρεμία, σήκωνα και χαμήλωνα περιοδικά το δεξί χέρι και ήμουν καθισμένος με τα μάτια να κοιτούν σταθερά προς ένα συγκεκριμένο σημείο. Επαναλαμβάνοντας αυτήν τη διαδικασία δειγματοληψίας άλλες 10 φορές, καταγράψαμε αυτή τη φορά τα δεδομένα κατά τη στιγμή πλήρους αδράνειας. Έτσι, κατέγραφα συνεχώς δεδομένα (ανά block των 100), τα οποία στάλθηκαν μέσω Wi-Fi στον αντίστοιχο ηλεκτρονικό υπολογιστή. Παρακάτω φαίνεται η διαφορά στα σήματα κατά την ηρεμία και κατά την κίνηση του δεξιού χεριού.

D4	D7	D17	D12	D13	D11	D20	D21	D23	D19	D21	D18	D14	D15	D19	D16
CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16

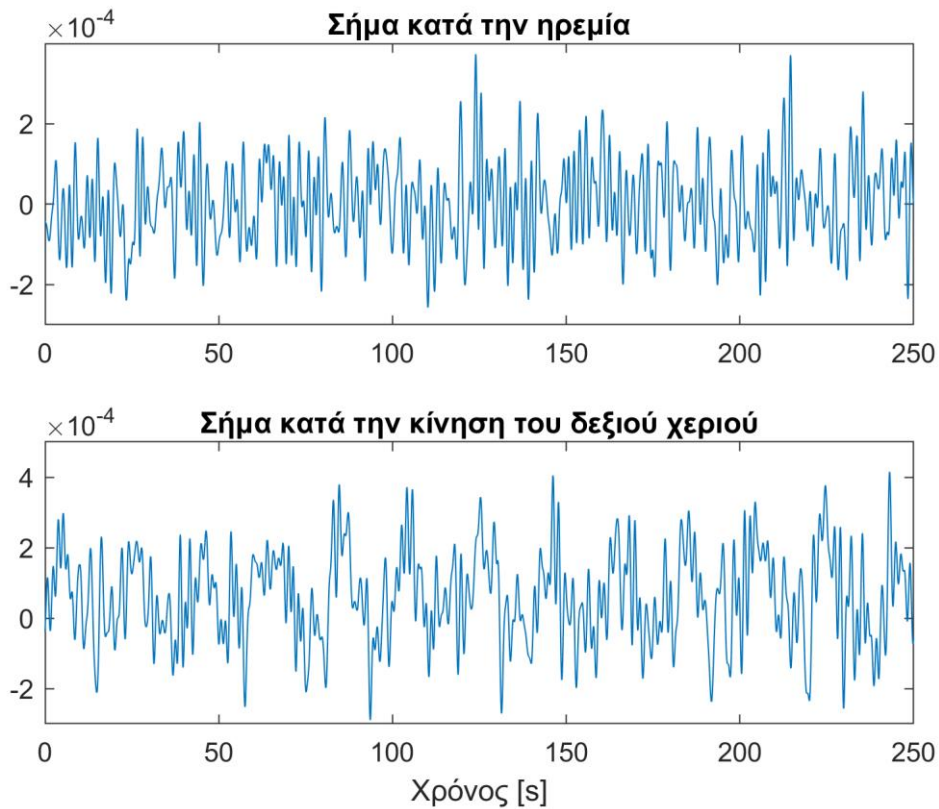
Πίνακας 2 Αντιστοίχιση καναλιών σε αισθητήρα από δεξιάς προ τα αριστερά κατά την χρήση της συσκευής



Εικόνα 45 Σήματα κατά την ηρεμία.



Εικόνα 46 Σήματα κατά την κίνηση του δεξιού χεριού.



Εικόνα 47 Σύνθεση σημάτων από τα σήματα που απαρτίζεται ο fNIRS.

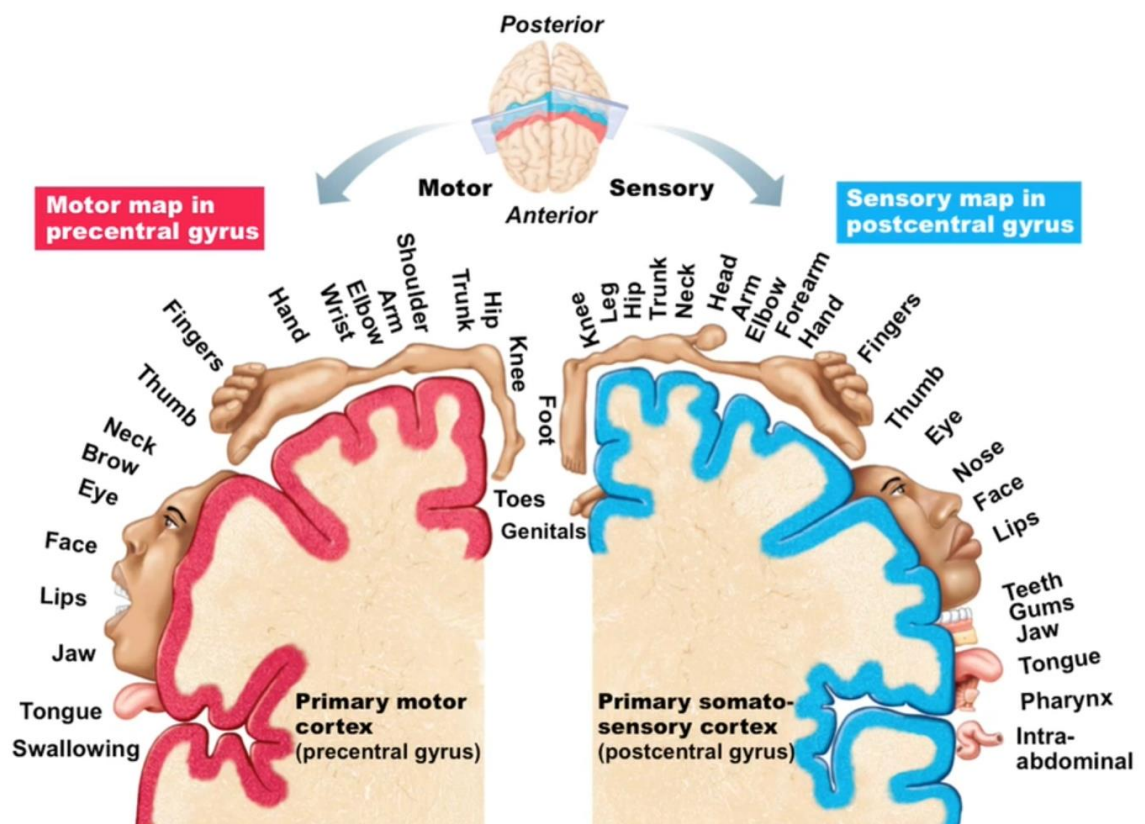
Στην περαιτέρω ανάλυση των συλλεγμένων δεδομένων, προσθέσαμε επιπλέον πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Ειδικότερα, παρατηρήσαμε ότι το περιβάλλον ήταν σκοτεινό και ήσυχο, ενώ φορούσα μια μαύρη μπαντάνα για απόλυτη απομόνωση των αισθητήρων από εξωτερικά φώτα. Αυτό διασφάλισε ότι οι μετρήσεις δεν επηρεάζονταν από άλλες πηγές φωτός και επικεντρωνόνταν αποκλειστικά στην υπερύθρων ακτινοβολία που εξέπεμπε στον πρωτογενή κινητικό φλοιό για την κίνηση του χεριού. Συνολικά, πήρα δεδομένα για κατάσταση ηρεμίας, για 10' (600 s) και για ανεβοκατέβασμα του χεριού για άλλα 10'. Τα 600" από τα δεδομένα για την περίπτωση ηρεμίας και για το ανεβοκατέβασμα του χεριού, χωρίστηκαν σε 30 set των 20". Οπότε συνολικά είχαμε 60 set (των 20"), Όπου τα 44 set χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου και τα άλλα 16 ως δεδομένα επαλήθευσης/επικύρωσης (validation set).

Στη συνέχεια, προχωρήσαμε σε ανάλυση των δεδομένων, παρατηρώντας μια σημαντική παρατήρηση. Συγκεκριμένα, διαπιστώσαμε ότι το αριστερό κομμάτι του πρωτογενή κινητικού φλοιού του εγκεφάλου εμφάνιζε υψηλότερη απορρόφηση υπερύθρων ακτινοβολιών σε σύγκριση με το δεξί. Αυτή η παρατήρηση καθιστά πιθανή τη σύνδεση της αυξημένης απορρόφησης υπερύθρων ακτινοβολιών με μια ενδεχόμενη αυξημένη οξυγόνωση της αιμοσφαιρίνης σε αυτήν την περιοχή του εγκεφάλου.

Αυτή η πολύπλευρη ανάλυση παρέχει σημαντική κατανόηση για την αντίδραση του εγκεφάλου σε διαφορετικές συνθήκες και αποτελεί βάση για ενδεδειγμένο μελλοντικό έργο σε αυτόν τον τομέα.

Τέλος, πρόσθεσα στο αρχείο με τα δεδομένα εκπαίδευσης, μια έξτρα στήλη με τον αριθμό 1, χαρακτηρίζοντας την ως ετικέτα για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, ώστε να το εκπαιδεύσω στην κίνηση του δεξιού χεριού να στέκεται προς τα επάνω.

Figure 12.8 Body maps in the primary motor cortex and somatosensory cortex of the cerebrum.



Εικόνα 48 Σωματικοί χάρτες στον πρωτογενή κινητικό φλοιό και στον σωματοαισθητικό φλοιό του εγκεφάλου
Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης. Πηγή: Pearson Education Inc. Biology Manual, "Pearson, Anatomy
and Physiology"

Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

Η σημασία της φορητής συσκευής fNIRS στη μέτρηση της εγκεφαλικής δραστηριότητας είναι προφανής. Προτείνω ορισμένες βελτιώσεις για ενίσχυση της ακρίβειας και της ευαισθησίας των μετρήσεων. Πρώτον, προτείνεται η χρήση Flex PCB ή μιας δεύτερης πλακέτας χωρίς through hole components για επίτευξη σταθερότητας και φορητότητας. Δεύτερον, η αύξηση των αποστάσεων μεταξύ αισθητήρων και LED σε 20 χιλιοστά, μαζί με την προσθήκη ενός επιπλέον IR LED στα 750nm, θα παρέχει λεπτομερέστερες μεταβολές και ακριβέστερη ανίχνευση της μη οξυγονομένης αιμοσφαιρίνης. Τρίτον, η χρήση περισσότερων αισθητήρων σε κυκλική διάταξη γύρω από κάθε εκπομπό υπερύθρων θα επιτρέψει τη λήψη σημάτων από διάφορα σημεία του πρωτογενούς κινητικού φλοιού, ενισχύοντας την πληροφορία που παράγεται. Συνολικά, αυτές οι βελτιώσεις θα προσφέρουν ακόμη πιο αξιόπιστα και εκτεταμένα δεδομένα για τις μετρήσεις εγκεφαλικής δραστηριότητας.

Μια φορητή συσκευή fNIRS εκπροσωπεί ένα πολύτιμο εργαλείο σε διάφορους τομείς λόγω της ικανότητάς της να παρακολουθεί την εγκεφαλική δραστηριότητα με φορητό και ευέλικτο τρόπο. Αυτό επιτρέπει την εφαρμογή της σε ευρύ φάσμα πεδίων, συμπεριλαμβανομένων των ερευνητικών μελετών στη νευροεπιστήμη, της κλινικής διάγνωσης και θεραπείας, των ψυχολογικών και ψυχοφυσιολογικών εφαρμογών, καθώς και της εκπαίδευσης και των εφαρμογών αλληλεπίδρασης ανθρώπου-υπολογιστή.

Στον τομέα της νευροεπιστήμης, η φορητή συσκευή fNIRS χρησιμοποιείται για ελεύθερη παρακολούθηση της εγκεφαλικής δραστηριότητας, ενώ οι συμμετέχοντες εκτελούν δραστηριότητες κατά την κίνηση. Στον τομέα της κλινικής, παρέχει συνεχή παρακολούθηση για αξιολόγηση της νευρολογικής λειτουργίας κατά τη διάρκεια θεραπείας.

Επίσης, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ψυχολογίας και ψυχοφυσιολογίας για την αντιληπτική καταγραφή της αντίδρασης του εγκεφάλου σε διάφορες ψυχολογικές καταστάσεις. Στην εκπαίδευση και τις απαιτητικές επιδόσεις, η φορητή συσκευή είναι χρήσιμη για την αξιολόγηση της πνευματικής κατάστασης και της απόδοσης. Τέλος, στις εφαρμογές αλληλεπίδρασης ανθρώπου-υπολογιστή, ενσωματώνεται σε περιβάλλοντα AR/VR και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο βασικό σε κινητικές δραστηριότητες, όπως εκφράσεις στο πρόσωπο του χρήστη και χειρονομίες για την ακριβής διαχείριση του περιβάλλοντος.

Επιπλέον, η φορητή συσκευή fNIRS θα μπορούσε να στηρίξει άτομα με κομμένα άκρα ή αναπηρίες, σε συνδυασμό με ρομποτικά μέλη, επιτρέποντας τον έλεγχο με βάση τις νευρολογικές εντολές που παράγονται στον εγκέφαλο. Η εκπαίδευση ατόμων που δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα άνω άκρα τους για να εκπέμπουν νευρολογικές εντολές αποτελεί εφικτή λύση, προσφέροντας κινητική ανεξαρτησία σε αυτά τα άτομα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Swanson, L. W. (2000). What is the brain?. *Trends in neurosciences*, 23(11), 519-527.
- [2] Toescu, E. C. (2005). Normal brain ageing: models and mechanisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1464), 2347-2354.
- [3] Cleveland clinic. (2022). Brain. Available at: <https://my.clevelandclinic.org/health/body/22638-brain>
- [4] Jefferys, J., & Cooper, A. (2007). Brain basics. *The Human Brain and Its Disorders*.
- Jobsis, F. (1977). Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science* 198, 1264–1267. <https://doi.org/10.1126/science.929199>.
- [5] Siegenthaler, J. A., & Pleasure, S. J. (2011). We have got you ‘covered’: how the meninges control brain development. *Current opinion in genetics & development*, 21(3), 249-255.
- [6] Kandel, E. R., Markram, H., Matthews, P. M., Yuste, R., & Koch, C. (2013). Neuroscience thinks big (and collaboratively). *Nature Reviews Neuroscience*, 14(9), 659–664.
- [7] Arshavsky, Y. I. (2017). Neurons versus networks: The interplay between individual neurons and neural networks in cognitive functions. *The Neuroscientist*, 23(4), 341-355.
- [8] Rieke, F., Warland, D., de Ruyter van Steveninck, R., et al. (1997). *Spikes: Exploring the Neural Code*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [9] Castro, A. J., Merchut, M. P., Neafsey, E. J., and Wurster, R. D. (2002). *Neuroscience, an Outline Approach*. St. Louis, MO: Mosby.
- [10] Adelman, G. and Smith, B. H. (2004). *Encyclopedia of Neuroscience* (3rd edition). New York: Elsevier B. V.
- [11] Gill, K. M. and Mizumori, S. J. Y. (2006). Context-dependent modulation by D1 receptors: Differential effects in hippocampus and striatum. *Behavioral Neuroscience*, 120(2), 377–392.
- [12] Uvnäs Moberg, K. (2003). *The Oxytocin Factor, Tapping the Hormone of Calm, Love and Healing*, Cambridge, MA: Da Capo Press.
- [13] Kaplan, H. I. and Sadock, B. J. (1995). *Comprehensive Textbook of Psychiatry* (6th ed., Vol. 1&2). Baltimore, MD: Williams & Wilkins.

- [14] Panksepp, J. (1998). *Affective Neuroscience: The Foundations of Human and Animal Emotions*. New York: Oxford University Press.
- [15] Aizawa, H., Hu, S.-C., Bobb, K., Balakrishnan, K., Ince, G., Gurevich, I., Cowan, M., & Ghosh, A. (2004). Dendrite development regulated by CREST, a Calcium-Regulated Transcriptional Activator. *Science*, *303*, 197–202.
- [16] Huttenlocher, P. R., & Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *The Journal of Comparative Neurology*, *387*, 167–178.
- [17] Nelson, C. A., & Jeste, S. (2008). Neurobiological perspectives on developmental psychopathology. In M. Rutter, D. Bishop, D. Pine, S. Scott, J. Stevenson, E. Taylor, et al. (Eds.), *Textbook on Child and Adolescent Psychiatry* (5th ed., pp. x–y). Blackwell Publishing.
- [18] Kuhl, P. K. (2004). Early language acquisition: Cracking the speech code. *Nature Reviews Neuroscience*, *5*, 831–843.
- [19] Kuhl, P. K., Tsao, F. M., & Liu, H. M. (2003). Foreign-language experience in infancy: Effects of short-term exposure and social interaction on phonetic learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *100*, 9096–9101.
- [20] Zeanah, C. H., Nelson, C. A., Fox, N. A., Smyke, A. T., Marshall, P., Parker, S. W., & Koga, S. (2003). Designing research to study the effects of institutionalization on brain and behavioral development: The Bucharest Early Intervention Project. *Development and Psychopathology*, *15*, 885–907.
- [21] Ionescu, T. (2012). Exploring the nature of cognitive flexibility. *New ideas in psychology*, *30*(2), 190-200.
- [22] Dajani, D. R., & Uddin, L. Q. (2015). Demystifying cognitive flexibility: Implications for clinical and developmental neuroscience. *Trends in neurosciences*, *38*(9), 571-578.
- [23] Noble, K. G., Wolmetz, M. E., Ochs, L. G., Farah, M. J., & McCandliss, B. D. (2006). Brain–behavior relationships in reading acquisition are modulated by socioeconomic factors. *Developmental science*, *9*(6), 642-654.
- [24] Westlin, C., Theriault, J. E., Katsumi, Y., Nieto-Castanon, A., Kucyi, A., Ruf, S. F., ... & Barrett, L. F. (2023). Improving the study of brain-behavior relationships by revisiting basic assumptions. *Trends in cognitive sciences*.

- [25] Bauman, M., & Kemper, T. L. (1985). Histoanatomic observations of the brain in early infantile autism. *Neurology*, 35(6), 866–874.
- [26] Courchesne, E., & Plante, E. (1996). In R. W. Thatcher, G. R. Lyon, J. Rumsey, & N. Krasneger (Eds.), *Developmental neuroimagine: Mapping the development of brain and behavior* (pp. 43–65). San Diego, CA: Academic Press.
- [27] Pfefferbaum, A., & Rosenbloom, M. (2001). Sex differences in the effects of alcohol on brain structure. *American Journal of Psychiatry*, 158(2), 188–198.
- [28] Andersen, S. L. (2003). Trajectories of brain development: Point of vulnerability or window of opportunity? *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 27, 3–18.
- [29] Riccio, C. A., & Pizzitola-Jarratt, K. (2003). Abnormalities of neurological development. In R. C. D’Amato, E. Fletcher-Janzen, & C. R. Reynolds (Eds.), *Handbook of school neuropsychology* (pp. 61–87). Hoboken, NJ: Wiley
- [30] Dubreuil-Vall, L., Laabs, T. L., Eyre, H. A., Smith, E., & Catuara-Solarz, S. (2022). Sex differences in invasive and noninvasive neurotechnologies. In *Sex and Gender Bias in Technology and Artificial Intelligence* (pp. 133-160). *Biomedicine and Healthcare Applications*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821392-6.00008-X>
- [31] Jöbsis, F. F. (1977). Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science*, 198(4323), 1264-1267.
- [32] Byun, K., Hyodo, K., Suwabe, K., Ochi, G., Sakairi, Y., Kato, M., ...Soya, H. (2014). Positive effect of acute mild exercise on executive function via arousal-related prefrontal activations: an fNIRS study. *NeuroImage* 98, 336–345. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.04.067>.
- [33] Bigliassi, M., Leo’n-Domí’nguez, U., Altimari, L.R. (2015b). How does the prefrontal cortex “listen” to classical and techno music? a functional near-infrared spectroscopy (f NIRS) study. *Psychol. Neurosci.* 8, 246–256. <https://doi.org/10.1037/h0101064>.
- [34] Ekkekakis, P. (2009). Illuminating the black box: investigating prefrontal cortical hemodynamics during exercise with near-infrared spectroscopy. *J. Sport Exerc. Psychol.* 31, 505–553.
- [35] Karen, T., Morren, G., Haensse, D., Bauschatz, A.S., Bucher, H.U., Wolf, M. (2008). Hemodynamic response to visual stimulation in newborn infants using functional near-infrared spectroscopy. *Hum. Brain Mapp.* 29, 453–460. <https://doi.org/10.1002/hbm.20411>.

- [36] Kotilahti, K., Nissila, I., Nasi, T., Lipiainen, L., Noponen, T., Merilainen, P., ... Fellman, V. (2010). Hemodynamic responses to speech and music in newborn infants. *Hum. Brain Mapp.* 31, 595–603. <https://doi.org/10.1002/hbm.20890>.
- [37] Homae, F., Watanabe, H., Nakano, T., & Taga, G. (2012). Functional development in the infant brain for auditory pitch processing. *Human Brain Mapping*, 33, 596–608. <https://doi.org/10.1002/hbm.21236>
- [38] Sato, T., Ito, M., Suto, T., Kameyama, M., Suda, M., Yamagishi, Y., ... Mikuni, M. (2007). Time courses of brain activation and their implications for function: a multichannel near-infrared spectroscopy study during finger tapping. *Neuroscience Research*, 58, 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.neures.2007.03.014>
- [39] Kuboyama, N., Nabetani, T., Shibuya, K., Machida, K., & Ogaki, T. (2005). Relationship between cerebral activity and movement frequency of maximal finger tapping. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 24, 201–208. <https://doi.org/10.2114/jpa.24.201>
- [40] Holper, L., Biallas, M., & Wolf, M. (2009). Task complexity relates to activation of cortical motor areas during uni- and bimanual performance: a functional NIRS study. *NeuroImage*, 46, 1105–1113. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.03.027>
- [41] Huppert, T. J., Hoge, R. D., Diamond, S. G., Franceschini, M. A., & Boas, D. A. (2006). A temporal comparison of BOLD, ASL, and NIRS hemodynamic responses to motor stimuli in adult humans. *NeuroImage*, 29, 368–382. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.08.065>
- [42] Tempest, G. D., Eston, R. G., & Parfitt, G. (2014). Prefrontal cortex haemodynamics and affective responses during exercise: a multi-channel near infrared spectroscopy study. *PLoS One*, 9, e95924. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095924>
- [43] Chang, H., Kim, K., Jung, Y., Ahn, N., So, W., & Kato, M. (2013). Effects of blood flow to the prefrontal cortex on high-intensity exercise combined with high-decibel music. *Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry*, 17, 115–122. <https://doi.org/10.5717/jenb.2013.17.4.115>
- [44] Lindgren, F., & Axelsson, A. (1988). The influence of physical exercise on susceptibility to noise-induced temporary threshold shift. *Scandinavian Audiology*, 17, 11–17.
- [45] Miyai, I., Tanabe, H. C., Sase, I., Eda, H., Oda, I., Konishi, I., ... Kubota, K. (2001). Cortical mapping of gait in humans: a near-infrared spectroscopic topography study. *NeuroImage*, 14, 1186–1192. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0905>

- [46] Karageorghis, C., Ekkekakis, P., Bird, J. M. (2017). Music in the exercise and sport domain: conceptual approaches and underlying mechanisms. In M. Lesaffre, P.-J. Maes, & M. Leman (Eds.), *Routledge Companion to Embodied Music Interaction* (pp. 284–293). Routledge.
- [47] Bigliassi, M., León-Domínguez, U., Buzzachera, C.F., Barreto-Silva, V., Altimari, L.R. (2015a). How does music aid 5 km of running? *J. Strength Cond. Res.* 29, 305–314. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000627>.
- [48] Bigliassi, M., Karageorghis, C. I., Nowicky, A. V., Orgs, G., & Wright, M. J. (2016). Cerebral mechanisms underlying the effects of music during a fatiguing isometric ankle dorsiflexion task. *Psychophysiology*, 53, 1472–1483. <https://doi.org/10.1111/psyp.12693>
- [49] Karageorghis, C., Mouzourides, D., Priest, D., Sasso, T., Morrish, D., & Walley, C. (2009). Psychophysical and ergogenic effects of synchronous music during treadmill walking. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 31, 18–36.
- [50] Oussaidene, K., Prieur, F., Bougault, V., Borel, B., Matran, R., & Mucci, P. (2013). Cerebral oxygenation during hyperoxia-induced increase in exercise tolerance for untrained men. *European Journal of Applied Physiology*, 113, 2047–2056. <https://doi.org/10.1007/s00421-013-2637-4>
- [51] Hashemi, R. H., Bradley, W. G., & Lisanti, C. J. (2012). *MRI: the basics: The Basics*. Lippincott Williams & Wilkins.
- [52] Brown, M. A., & Semelka, R. C. (2011). *MRI: basic principles and applications*. John Wiley & Sons.
- [53] Bandettini, P. A. (2020). *Fmri*. MIT Press.
- [54] Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2009). *Functional Magnetic Resonance Imaging* (2nd ed.). Massachusetts: Sinauer.
- [55] Thomas, R. K. (1993, January 1). INTRODUCTION: A Biopsychology Festschrift in Honor of Lelon J. Peacock. *Journal of General Psychology*, 120(1), 5.
- [56] Detre, J. A., Rao, H., Wang, D. J. J., Chen, Y. F., & Wang, Z. (2012, May). Applications of arterial spin labeled MRI in the brain. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 35(5), 1026–1037. <https://doi.org/10.1002/jmri.23581>

- [57] Langleben, D. D., & Moriarty, J. C. (2013). Using Brain Imaging for Lie Detection: Where Science, Law and Research Policy Collide. *Psychology, Public Policy, and Law*, 19(2), 222–234. <https://doi.org/10.1037/a0028841>
- [58] Zhou, X., Sobczak, G., McKay, C. M., & Litovsky, R. Y. (2020). Comparing fNIRS signal qualities between approaches with and without short channels. *PloS one*, 15(12), e0244186.
- [59] De Roever, I., Bale, G., Mitra, S., Meek, J., Robertson, N. J., & Tachtsidis, I. (2018). Investigation of the pattern of the hemodynamic response as measured by functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) studies in newborns, less than a month old: a systematic review. *Frontiers in human neuroscience*, 12, 371.
- [60] Sanchez-Alonso, S., Canale, R. R., Nichoson, I. F., & Aslin, R. N. (2023). Simultaneous Data Collection of fMRI and fNIRS Measurements Using a Whole-Head Optode Array and Short-Distance Channels. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (200), e65088.
- [61] Müller, B., Reinhardt, J., & Strickland, M. T. (2012). *Neural networks: an introduction*. Springer Science & Business Media.
- [62] Park, W. J., & Park, J. B. (2018). History and application of artificial neural networks in dentistry. *European journal of dentistry*, 12(04), 594-601.
- [63] Investopedia (2020). What Is a Neural Network? <https://www.investopedia.com/terms/n/neuralnetwork.asp>
- [64] Ehlers, R. (2017). Formal verification of piece-wise linear feed-forward neural networks. In *Automated Technology for Verification and Analysis: 15th International Symposium, ATVA 2017, Pune, India, October 3–6, 2017, Proceedings 15* (pp. 269-286). Springer International Publishing.
- [65] Salehinejad, H., Sankar, S., Barfett, J., Colak, E., & Valaee, S. (2017). Recent advances in recurrent neural networks. *arXiv preprint arXiv:1801.01078*.
- [66] Li, Z., Liu, F., Yang, W., Peng, S., & Zhou, J. (2021). A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*.
- [67] Cao, F., Yao, K., & Liang, J. (2020). Deconvolutional neural network for image super-resolution. *Neural Networks*, 132, 394-404.

- [68] Devin, C., Gupta, A., Darrell, T., Abbeel, P., & Levine, S. (2017, May). Learning modular neural network policies for multi-task and multi-robot transfer. In *2017 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)* (pp. 2169-2176). IEEE.
- [69] Gurney, K. (2018). *An introduction to neural networks*. CRC press.
- [70] Bonilauri, A., Sanguiliano Intra, F., Baselli, G., & Baglio, F. (2021). Assessment of fNIRS signal processing pipelines: towards clinical applications. *Applied Sciences*, *12*(1), 316.
- [71] Jalalvandi, M., Alam, N. R., Sharini, H., Hashemi, H., & Nadimi, M. (2021). Brain cortical activation during imagining of the wrist movement using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). *Journal of biomedical physics & engineering*, *11*(5), 583.
- [72] Mirbagheri, M., Hakimi, N., Ebrahimzadeh, E., & Setarehdan, S. K. (2019). Quality analysis of heart rate derived from functional near-infrared spectroscopy in stress assessment. **Biomedical Signal Processing and Control**, *52*, Article 100286. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2019.100286>
- [73] Hakimi, N., Shahbakhti, M., Sappia, S., Horschig, J. M., Bronkhorst, M., Floor-Westerdijk, M., Valenza, G., Dudink, J., & Colier, W. N. J. M. (2022). Estimation of Respiratory Rate from Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS): A New Perspective on Respiratory Interference. *Biosensors (Basel)*, *12*(12), 1170. <https://doi.org/10.3390/bios12121170>
- [74] Luke, R., Shader, M. J., & McAlpine, D. (2021). Characterization of Mayer-wave oscillations in functional near-infrared spectroscopy using a physiologically informed model of the neural power spectra. *Neurophotonics*, *8*(4), 041001. <https://doi.org/10.1117/1.NPh.8.4.041001>
- [75] Soares Jr., R. d. S., Oku, A. Y. A., Barreto, C. S. F., & Sato, J. R. (2022). Applying functional near-infrared spectroscopy and eye-tracking in a naturalistic educational environment to investigate physiological aspects that underlie the cognitive effort of children during mental rotation tests. *Frontiers in Human Neuroscience*, *16*, 889806. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.889806>
- [76] Nguyen, H.-D., Yoo, S.-H., Bhutta, M. R., & Hong, K.-S. (2018). Adaptive filtering of physiological noises in fNIRS data. *BioMedical Engineering OnLine*, *17*, 180. <https://doi.org/10.1186/s12938-018-0610-6>

[77] Huppert, T. J. (2016). Commentary on the statistical properties of noise and its implication on general linear models in functional near-infrared spectroscopy. *Neurophotonics*, 3(1), 010401. <https://doi.org/10.1117/1.NPh.3.1.010401>