



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΑΓΩΓΗΣ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Διδακτική και Τεχνολογίες Μάθησης Φυσικών Επιστημών»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Χρονικές και φασματικές σφραγίδες της έκπληξης και της προσοχής σε
εκπαιδευτικά περιβάλλοντα επαυξημένης πραγματικότητας: Μια
εγκεφαλογραφική μελέτη »**

**“Temporal and Spectral Signatures of Surprise and Distraction in
Educational Augmented Reality: An EEG study”**

ΖΑΒΕΡΛΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ (Α.Μ. 65)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΜΙΚΡΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ
ΙΩΑΝΝΙΝΑ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2025

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του/της συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Αφιέρωση

**Στα αγαπημένα μου παιδιά,
Γιώργο – Σπυρίδωνα, Φωτεινή και Δημοσθένη**

**«Μην ξεχνάτε πως ποτέ δεν είναι αργά να δημιουργήσετε κάτι όμορφο,
να κυνηγήσετε ένα όνειρο,
ή να γίνετε οι άνθρωποι που πάντα προοριζόσασταν να είστε.
Κάθε στιγμή είναι μια νέα αρχή!»**

**Με βαθιά αγάπη και πίστη σε σας,
Ζαβέρδας Βασίλης**

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Αναστάσιο Μικρόπουλο, για την αμέριστη υποστήριξή του, την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνάς μου. Η γνώση, η εμπειρία και η αφοσίωσή του με βοήθησαν να εξελιχθώ και να ξεπεράσω τις προκλήσεις της επιστημονικής διαδικασίας στο απαιτητικό αυτό εγχείρημα που αναλάβαμε. Είμαι ευγνώμον για την εμπιστοσύνη και την καθοδήγηση που μου προσέφερε, και για τον ρόλο που έπαιξε στην ολοκλήρωση αυτής της μελέτης.

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη ευθυγραμμίζεται με το ευρύτερο όραμα της εκπαιδευτικής νευροεπιστήμης. Εξετάζει τη συμβολή της επαυξημένης πραγματικότητας στην εκπαιδευτική διαδικασία, με έμφαση στη γνωστική επεξεργασία, μέσα από τη χρήση νευροφυσιολογικών μεθόδων. Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα με μαθητές, στα οποία καταγράφηκαν ηλεκτροεγκεφαλογραφήματα κατά την αλληλεπίδραση τους με εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας, προκειμένου να μελετηθούν οι γνωστικοί μηχανισμοί που ενεργοποιούνται. Στο πρώτο πείραμα, ένα φυσικό φαινόμενο παραβίαζε τους αναμενόμενους νόμους της φυσικής, προκαλώντας γνωστική σύγκρουση. Αναλύθηκαν προκλητά δυναμικά όπως τα C1, P200 και P300 για την αποτύπωση της πορείας της επεξεργασίας του ερεθίσματος. Τα ευρήματα επιβεβαίωσαν την ενεργό συμμετοχή των μαθητών και την ύπαρξη συγκεκριμένων χρονικών και χωρικών χαρακτηριστικών στα εγκεφαλογραφήματα που σχετίζονται με προσοχή και λήψη απόφασης. Στο δεύτερο πείραμα, οι μαθητές εκτελούσαν νοητικά μαθηματικά καθήκοντα με και χωρίς την παρουσία περισπασμών σε περιβάλλον επαυξημένης πραγματικότητας. Μέσω φασματικής ανάλυσης του εγκεφαλογραφήματος, καταγράφηκαν μεταβολές στις ζώνες συχνοτήτων (άλφα, βήτα, θήτα, δέλτα, γάμα), οι οποίες ανέδειξαν τη δυναμική προσαρμογή του εγκεφάλου απέναντι στους περισπασμούς, επιβεβαιώνοντας αυξημένη γνωστική προσπάθεια και συγκέντρωση μέσω της μεταβολής της ισχύος στις αντίστοιχες ζώνες συχνοτήτων, αναδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα του εγκεφάλου στη διαχείριση μεταβαλλόμενων συνθηκών. Η μελέτη προσφέρει μια εναλλακτική προσέγγιση αξιολόγησης μαθησιακών εμπειριών, αποφεύγοντας την αποκλειστική χρήση ερωτηματολογίων και συνεντεύξεων εστιάζοντας σε άμεσες, αντικειμενικές μετρήσεις της εγκεφαλικής δραστηριότητας. Η έννοια της παρουσίας — η αίσθηση ότι ο μαθητής "βρίσκεται" μέσα στο επαυξημένο περιβάλλον — ενσωματώνεται στη μελέτη τόσο θεωρητικά όσο και εμπειρικά, αναδεικνύοντας ότι η επαυξημένη πραγματικότητα μπορεί να ενισχύσει τη μαθησιακή απόδοση όχι μόνο μέσω αισθητηριακής εμπύθισης, αλλά και μέσα από μετρήσιμες νευρωνικές διεργασίες. Επιπλέον έγινε κατασκευή ειδικής συσκευής συγχρονισμού που επιτρέπει την ακριβή χρονική αντιστοίχιση των ερεθισμάτων με τα EEG σήματα, ενισχύοντας τη μεθοδολογική εγκυρότητα της έρευνας.

Λέξεις κλειδιά: παρουσία, επαυξημένη πραγματικότητα, προκλητά δυναμικά, εγκεφαλογραφία, προσοχή, φασματική ανάλυση, εκπαιδευτική νευροεπιστήμη

Abstract

This study aligns with the broader vision of educational neuroscience by contributing empirical insights that can inform the design of adaptive, evidence-based educational technologies. Explores the contribution of augmented reality to the educational process, with emphasis on cognitive engagement and the sense of presence, using neurophysiological methods. Two experiments were conducted with students, during which electroencephalograms were recorded while they interacted with augmented reality applications, aiming to investigate the cognitive mechanisms involved. In the first experiment, a physical phenomenon violated expected laws of physics, causing cognitive conflict, and event-related potentials such as C1, N100, P200, and P300 were analysed to capture the processing timeline of the stimulus. The findings confirmed active engagement of the students and the presence of specific temporal and spatial characteristics in the electroencephalogram's signals related to attention and decision-making.

In the second experiment, students performed mental math tasks with and without the presence of distractors in an augmented reality environment. Through spectral analysis of the electroencephalograms, changes were detected in frequency bands (alpha, beta, theta, delta, gamma), highlighting the brain's dynamic adaptation to distractions and confirming increased cognitive effort and concentration through power modulation in the respective frequency bands, demonstrating the brain's effectiveness in handling changing conditions.

The study offers an alternative approach to evaluating learning experiences by avoiding the exclusive use of questionnaires and interviews, focusing instead on direct, objective measurements of brain activity. The concept of presence — the sense that the student "is" inside the environment — is integrated both theoretically and empirically, showing that augmented reality can enhance learning performance not only through sensory immersion but also through measurable neural processes. A longitudinal review of presence-related literature using electroencephalograms is included. Moreover, as part of the research, the construction of a dedicated synchronization device enables precise temporal alignment of stimuli with EEG signals, enhancing the methodological validity of the research.

Keywords: presence, augmented reality, event-related potentials, electroencephalography, attention, spectral analysis, alpha, beta, theta, C1, P200, P300, trigger, neuroeducation

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
Α΄ ΜΕΡΟΣ - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΤΟ ΝΕΥΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΩΝ.....	5
ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ ΕΓΚΕΦΑΛΟΥ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΕΣ ΜΕ ΑΥΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑ	10
ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΕΓΚΕΦΑΛΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ	10
ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑ (EEG).....	11
ΝΕΥΡΟΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ (EEG)	12
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ EEG.....	13
ΤΕΧΝΟΥΡΓΗΜΑΤΑ (ARTIFACTS)	15
ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ EEG.....	17
ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΥ-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (TIME-FREQUENCY ANALYSIS) ΤΟΥ EEG	22
ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (SPECTRAL ANALYSIS) ΤΟΥ EEG	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΟΙ ΕΓΚΕΦΑΛΙΚΟΙ ΡΥΘΜΟΙ	27
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	27
ΔΕΛΤΑ (DELTA, 0.5 - 4 Hz)	27
ΘΗΤΑ (THETA, 4 - 8 Hz)	27
ΆΛΦΑ (ALPHA, 8 - 12 Hz).....	27
ΒΗΤΑ (BETA, 13 - 30 Hz)	28
ΓΑΜΑ (GAMMA, 30 - 100 Hz ΚΑΙ ΑΝΩ).....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΠΡΟΚΛΗΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ (ERPS)	30
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	30
ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΠΡΟΚΛΗΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ (ERPs).....	30
ΤΥΠΙΚΑ ΠΡΟΚΛΗΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ	31
ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ ΕΓΚΕΦΑΛΟΥ - ΠΡΟΚΛΗΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ	34
ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ – ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΤΙΣ ΕΓΚΕΦΑΛΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	35
Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΕΙΔΟΥΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	36
Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΜΙΑΣ	36
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΠΡΟΚΛΗΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΕΜΒΥΘΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ	39
ΕΙΚΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ.....	39

Η ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΧΡΗΣΗ VR ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΕΕΓ	40
ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ	41
ΠΡΟΣΟΧΗ	42
ΕΜΒΥΘΙΣΗ (IMMERSION)	49
ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ (INVOLVEMENT)	49
ΠΑΡΟΥΣΙΑ (PRESENCE)	50
ΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ	52
<i>Χωρική Παρουσία (Spatial Presence)</i>	53
<i>Ρεαλισμός</i>	55
<i>Αυτοπαρουσία (Self-Presence)</i>	55
<i>Κοινωνική Παρουσία (Social Presence)</i>	55
<i>Συμπαρουσία (Copresence)</i>	56
Η ΨΥΧΟΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ	56
ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΜΒΥΘΙΣΗ, ΠΑΡΟΥΣΙΑ, ΑΠΟΔΟΣΗ.....	59
ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ.....	60
<i>Υποκειμενικά Μέτρα (subjective measures)</i>	60
<i>Συμπεριφορικές Μετρήσεις της Παρουσίας σε Εικονικά Περιβάλλοντα</i>	62
<i>Νευροφυσιολογικές μετρήσεις της παρουσίας σε εικονικά περιβάλλοντα</i>	63
ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΕΜΒΥΘΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ.....	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΕΕΓ ΣΤΗΝ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΣΕ ΕΜΒΥΘΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ	68
ΜΕΡΟΣ Β' – ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	79
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	79
ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο	83
7.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	83
7.1.1 Ερευνητικοί άξονες και ερωτήματα	83
7.1.2 Δείγμα	92
7.1.3 Πειραματική διάταξη	93
7.1.4 Διαδικασία	96
7.1.5 Συλλογή δεδομένων και ανάλυση	101
Γ' ΜΕΡΟΣ	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	106
ΠΡΩΤΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΩΤΗΜΑ	106
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΒΙΑΣΗΣ ΝΟΜΩΝ ΦΥΣΙΚΗΣ	106

<i>Πλάτη και λανθάνοντες χρόνοι των προκλητών δυναμικών</i>	107
<i>Η τοπογραφία των προκλητών δυναμικών</i>	115
<i>Χρόνος αντίδρασης</i>	116
<i>Σύγκριση καταστάσεων με/χωρίς περισπασμούς κατά την εκτέλεση της εργασίας</i>	118
<i>Μέγεθος και Επίδραση ανά Ζώνη Συχνοτήτων</i>	119
1. περιοχή Δέλτα (0,5–4 Hz).....	119
2. περιοχή Θήτα (4–8 Hz).....	120
3. περιοχή Άλφα (8–12 Hz)	121
4. περιοχή Βήτα (12–30 Hz)	122
<i>Απόδοση στην εργασία (ακρίβεια, ταχύτητα)</i>	123
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10	128
ΣΥΖΗΤΗΣΗ	128
ΠΕΙΡΑΜΑ 1 ^ο ΠΡΩΤΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΩΤΗΜΑ	128
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	136
ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	137
ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ.....	137
<i>Προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο</i>	137
<i>Εξατομικευμένη μάθηση</i>	137
<i>Νευροπροσαρμοστικά συστήματα επαυξημένης πραγματικότητας</i>	138
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	1
 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	
ΣΧΗΜΑ 1 : ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	97
ΣΧΗΜΑ 2: ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	98
ΣΧΗΜΑ 3 : ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	99
ΣΧΗΜΑ 4: ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	100
ΣΧΗΜΑ 5: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	101
 ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ	
ΓΡΑΦΗΜΑ 1: ΘΗΚΟΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΤΩΝ ΠΡΟΚΛΗΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ (ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΑΘΗΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΩΜΑΛΗ ΠΤΩΣΗ)	109
ΓΡΑΦΗΜΑ 2: ΘΗΚΟΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΛΑΝΘΑΝΟΝΤΑ ΧΡΟΝΟΥ ΤΩΝ ΠΡΟΚΛΗΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ (ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΑΘΗΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΩΜΑΛΗ ΠΤΩΣΗ)	110
ΓΡΑΦΗΜΑ 3: ΤΟ ΜΕΣΟ (ΣΥΝΟΛΙΚΟ) ΠΡΟΚΛΗΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΠΑΡΑΒΙΑΣΗΣ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ	111
ΓΡΑΦΗΜΑ 4: Η ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΚΛΗΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ Fz,Cz,Pz	112
ΓΡΑΦΗΜΑ 5: ΠΛΑΤΟΣ ΤΩΝ ΠΡΟΚΛΗΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΝΑ ΜΑΘΗΤΗ.....	113

ΓΡΑΦΗΜΑ 6: ΛΑΘΑΝΩΝ ΧΡΟΝΟΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΚΛΗΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΝΑ ΜΑΘΗΤΗ	114
ΓΡΑΦΗΜΑ 7: Η ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ C1 (Oz-PO8)	114
ΓΡΑΦΗΜΑ 8: ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ	116
ΓΡΑΦΗΜΑ 9: ΜΕΣΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΑΝΑ ΜΑΘΗΤΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΠΙΣΤΩΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΒΙΑΣΗΣ - ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΣΦΑΛΜΕΝΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ ΑΝΑ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΑ	117
ΓΡΑΦΗΜΑ 10: ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΜΕ/ΧΩΡΙΣ ΠΕΡΙΣΠΑΣΜΟΥΣ	119
ΓΡΑΦΗΜΑ 11:ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΔΕΛΤΑ	119
ΓΡΑΦΗΜΑ 12:ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΔΕΛΤΑ	120
ΓΡΑΦΗΜΑ 13:ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΘΗΤΑ	120
ΓΡΑΦΗΜΑ 14:ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΘΗΤΑ	121
ΓΡΑΦΗΜΑ 15:ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΛΦΑ	121
ΓΡΑΦΗΜΑ 16:ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΛΦΑ.....	122
ΓΡΑΦΗΜΑ 17:ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΒΗΤΑ.....	122
ΓΡΑΦΗΜΑ 18:ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΒΗΤΑ.....	123
ΓΡΑΦΗΜΑ 19: ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΑΝΤΗΣΗΣ ΑΝΑ ΣΥΜΜΕΤΕΧΟΝΤΑ	124
ΓΡΑΦΗΜΑ 20: ΘΗΚΟΓΡΑΜΜΑ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΜΕ/ΧΩΡΙΣ ΠΕΡΙΣΠΑΣΜΟΥΣ	125
ΓΡΑΦΗΜΑ 21:ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΧΩΡΙΣ ΠΕΡΙΣΠΑΣΜΟΥΣ	125
ΓΡΑΦΗΜΑ 22:ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΜΕ ΠΕΡΙΣΠΑΣΜΟΥΣ.....	126
ΓΡΑΦΗΜΑ 23:ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΩΣΤΩΝ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΥΝΘΗΚΩΝ (ΜΕ/ΧΩΡΙΣ ΠΕΡΙΣΠΑΣΜΟΥΣ).....	127

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΝΕΥΡΩΝΑΣ HTTPS://COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:BLAUSEN_0657_MULTIPOLARNEURON.PNG	6
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΥ ΕΓΚΕΦΑΛΟΥ HTTPS://ASKABIOLOGIST.ASU.EDU/SITES/DEFAULT/FILES/RESOURCES/ARTICLES/NERVOUS_JOURNEY/BRAIN-REGIONS-AREAS.GIF	9
ΕΙΚΟΝΑ 3 : ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΓΚΕΦΑΛΟΥ	11
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΤΥΠΙΚΟ ΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑ	12
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ.....	13
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ 10-20 HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/FIGURE/EEG-10-20-ELECTRODE-PLACEMENT_fig1_286371237	15
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΕΧΝΟΥΡΓΗΜΑΤΑ ΣΕ ΕΝΑ ΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑ HTTPS://CDNINTECH.COM/MEDIA/CHAPTER/54606/1512345123/MEDIA/F2.PNG	16
ΕΙΚΟΝΑ 8: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΝΟΣ ΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/FIGURE/EEG-DATA-PREPROCESSING-PIPELINE-THE-FIRST-TWO-STEPS-ARE-DONE-USING-BRAINVISION-ANALYZER_fig3_352108447	17
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΦΙΛΤΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΝΟΣ ΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ	19

ΕΙΚΟΝΑ 10: INDEPENDENT COMPONENT ANALYSIS

HTTPS://SCCN.UCSD.EDU/~JUNG/SITE/EEG_ARTIFACT_REMOVAL_FILES/EEGDECOMPOSITION.PNG.....	21
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ	25
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΕΓΚΕΦΑΛΙΚΟΙ ΡΥΘΜΟΙ.....	29
ΕΙΚΟΝΑ 13: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΝΟΣ ΠΡΟΚΛΗΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ HTTPS://EEGGET-IT.NL/IMAGES/ERP/AVERAGING.JPG.....	31
ΕΙΚΟΝΑ 14: ΤΥΠΙΚΑ ΠΡΟΚΛΗΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ	33
ΕΙΚΟΝΑ 15: ΤΜΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ (ΕPOCHING) ΤΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΣΗΜΑΤΟΣ	37
ΕΙΚΟΝΑ 16: ΤΑ ΤΕΣΣΕΡΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΤΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ	42
ΕΙΚΟΝΑ 17: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΧΗΣ. CHUN ET AL., 2011	43
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΤΟΥ WIRTH ET AL., 2007	54
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΤΟΥ SCARBEZ	58
ΕΙΚΟΝΑ 20: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΗΣ ΕΜΒΥΘΙΣΗΣ, ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ BYSTROM ET AL., 1999	60
ΕΙΚΟΝΑ 21: ΞΗΡΑ (DRY) ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ	93
ΕΙΚΟΝΑ 22: ΣΗΜΕΙΑ ΚΑΛΥΨΗΣ	94
ΕΙΚΟΝΑ 23: G.TEC NAUTILUS RESEARCH	94
ΕΙΚΟΝΑ 24: ΣΥΣΚΕΥΗ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ	95
ΕΙΚΟΝΑ 25: ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΗΜΑΝΣΗ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ	96
ΕΙΚΟΝΑ 26 : ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	100
ΕΙΚΟΝΑ 27: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ICA	102
ΕΙΚΟΝΑ 28: ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΟ ΣΗΜΑ	103
ΕΙΚΟΝΑ 29: ΕΓΚΕΦΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑ ΜΑΘΗΤΗ.....	104
ΕΙΚΟΝΑ 30: ΜΕΣΟ ΠΡΟΚΛΗΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (Fz,Cz, Pz) ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΟΜΑΛΗΣ ΚΑΙ ΑΝΩΜΑΛΗΣ ΠΤΩΣΗΣ	107

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality, VR) περιγράφεται ως το σύνολο τεχνολογιών που υποστηρίζουν τη δημιουργία συνθετικών, διαισθητικά πολυαισθητηριακών αλληλεπιδραστικών τρισδιάστατων χωρικών περιβαλλόντων και κόσμων, που ο χρήστης, ο οποίος αναφέρεται ως συμμετέχων, βιώνει ως πραγματικά (Mikropoulos & Natsis, 2011).

Η επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality, AR) είναι μια τεχνολογία που συνδυάζει τον πραγματικό κόσμο με ψηφιακά δημιουργημένα στοιχεία, τα οποία προβάλλονται σε πραγματικό χρόνο μέσω συσκευών, όπως έξυπνα τηλέφωνα, tablet, γυαλιά AR ή άλλα εξειδικευμένα συστήματα. Η AR δεν αντικαθιστά πλήρως τον πραγματικό κόσμο (όπως συμβαίνει με την Εικονική Πραγματικότητα - VR), αλλά προσθέτει σε αυτόν ψηφιακές πληροφορίες που ενισχύουν την εμπειρία του χρήστη Azuma, R. T. (1997).

Η έννοια της παρουσίας, που ορίζεται ως η αίσθηση του "είμαι εκεί" σε ένα μεσολαβημένο περιβάλλον, είναι κεντρική τόσο στην Εικονική Πραγματικότητα (VR) όσο και στην Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR). Στην VR, η παρουσία αφορά την αίσθηση του χρήστη ότι βρίσκεται πλήρως βυθισμένος σε έναν υπολογιστικά δημιουργημένο κόσμο, συχνά σε σημείο που ο πραγματικός κόσμος να εξαφανίζεται στο παρασκήνιο. Αυτή η εμπειρία επιτυγχάνεται μέσω υψηλής ποιότητας οπτικής, ακουστικής και απτικής ανατροφοδότησης, δημιουργώντας ένα πειστικό εικονικό περιβάλλον. Αντίθετα, στην AR, η παρουσία περιλαμβάνει την απρόσκοπτη ενσωμάτωση εικονικών αντικειμένων στον πραγματικό κόσμο, ενισχύοντας την αντίληψη του χρήστη για το άμεσο περιβάλλον του. Η AR δεν αντικαθιστά τον πραγματικό κόσμο αλλά τον επαυξάνει, απαιτώντας διαφορετική προσέγγιση για την επίτευξη παρουσίας. Έρευνες δείχνουν ότι η παρουσία στην AR επηρεάζεται από παράγοντες όπως ο ρεαλισμός των εικονικών αντικειμένων, η ευθυγράμμισή τους με τα πραγματικά στοιχεία και η ανταπόκριση του συστήματος στις αλληλεπιδράσεις του χρήστη. Επιπλέον, η αντίληψη του χρήστη για το σώμα του μέσα στον επαυξημένο χώρο μπορεί να ενισχύσει την αίσθηση παρουσίας, ειδικά όταν ενσωματώνεται μια ρεαλιστική εικονική αναπαράσταση του σώματος.

Αυτές οι διαφορές στην παρουσία μεταξύ VR και AR υπογραμμίζουν τη μοναδικότητα της κάθε τεχνολογίας και τη σημασία του σχεδιασμού εμπειριών που ενσωματώνουν αυτά τα χαρακτηριστικά.

Ο ρόλος της παρουσίας στα εμβυθιστικά περιβάλλοντα

Η μελέτη της παρουσίας είναι σημαντική για τη βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών σε περιβάλλοντα εικονικής (VR) και επαυξημένης πραγματικότητας (AR). Η αίσθηση της παρουσίας, δηλαδή του "είμαι εκεί," αυξάνει τον ρεαλισμό, κάνοντας την εμπειρία πιο συναρπαστική και αξέχαστη. Αυτό είναι κρίσιμο για εφαρμογές όπως παιχνίδια, εικονικός τουρισμός και ψυχαγωγία, όπου η ικανοποίηση των χρηστών εξαρτάται από την ποιότητα της παρουσίας.

Η παρουσία παίζει επίσης ρόλο στην ενίσχυση της μάθησης και της απόκτησης δεξιοτήτων. Σε εκπαιδευτικές και εκπαιδευτικές εφαρμογές, η υψηλή παρουσία βοηθά τους χρήστες να αλληλεπιδράσουν με το περιβάλλον με τρόπο παρόμοιο με τις πραγματικές συνθήκες (Mikropoulos & Natsis, 2011).

Σε θεραπευτικά πλαίσια, η παρουσία επιτρέπει στους χρήστες να εμπλακούν σε ρεαλιστικά σενάρια για την αντιμετώπιση προβλημάτων, όπως οι φοβίες. Η προσομοίωση πραγματικών συνθηκών μέσω VR προσφέρει ασφαλές περιβάλλον για τη θεραπεία και την αποκατάσταση, με καλύτερα αποτελέσματα από τις παραδοσιακές μεθόδους (Botella et al., 2017; Freeman et al. 2017).

Η μελέτη της παρουσίας προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για το πώς οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται και αλληλεπιδρούν με εικονικά και επαυξημένα περιβάλλοντα. Αυτή η γνώση συμβάλλει στην κατανόηση των γνωστικών και αισθητηριακών διαδικασιών και προάγει τομείς όπως η ψυχολογία και η νευροεπιστήμη.

Η παρουσία λειτουργεί ως δείκτης για την αποτελεσματικότητα των συστημάτων VR και AR. Υψηλά επίπεδα παρουσίας σχετίζονται με καλύτερη απόδοση και ικανοποίηση των χρηστών, προσφέροντας μέτρα αξιολόγησης και βελτίωσης.

Τέλος, η κατανόηση της παρουσίας βοηθά στην αντιμετώπιση πιθανών αρνητικών επιπτώσεων, όπως η κυβερνοναυτία ή η συναισθηματική δυσφορία, εξασφαλίζοντας ασφαλή και ηθική χρήση αυτών των τεχνολογιών.

Ο ρόλος της εγκεφαλογραφίας στη μελέτη της παρουσίας

Η εγκεφαλογραφία (EEG) χρησιμοποιείται στη μελέτη της παρουσίας σε εμβυθιστικά περιβάλλοντα λόγω της ικανότητάς της να καταγράφει τις ηλεκτρικές δραστηριότητες του

εγκεφάλου με υψηλή χρονική ανάλυση. Σε περιβάλλοντα εικονικής ή επαυξημένης πραγματικότητας, οι χρήστες συχνά βιώνουν έντονη αίσθηση παρουσίας, δηλαδή την αίσθηση ότι είναι πραγματικά παρόντες στον ψηφιακό κόσμο. Η EEG αποκαλύπτει τις νευρικές διεργασίες που συνδέονται με αυτήν την αίσθηση, παρακολουθώντας τις αλλαγές στη δραστηριότητα του εγκεφάλου σε πραγματικό χρόνο, με δεδομένα που σχετίζονται με την αντίληψη, την προσοχή και την αίσθηση ελέγχου.

Αντίθετα με τα υποκειμενικά εργαλεία, όπως τα ερωτηματολόγια, που μπορούν να επηρεαστούν από την προσωπική αντίληψη των συμμετεχόντων, η EEG προσφέρει έναν αντικειμενικό δείκτη της εγκεφαλικής δραστηριότητας. Αυτός ο αντικειμενικός χαρακτήρας της EEG επιτρέπει την ακριβή καταγραφή των εγκεφαλικών μηχανισμών που σχετίζονται με την αίσθηση της παρουσίας, χωρίς να επηρεάζεται από υποκειμενικές παραμορφώσεις ή σφάλματα εκτίμησης. Η EEG καταγράφει την εγκεφαλική δραστηριότητα με μεγάλη ακρίβεια, παρέχοντας αξιόπιστα δεδομένα για τις περιοχές του εγκεφάλου που ενεργοποιούνται κατά την αλληλεπίδραση με το εμβυθιστικό περιβάλλον, όπως η επεξεργασία του χώρου, της κίνησης και του ελέγχου, κάτι που ενισχύει την κατανόηση της ψυχολογίας της παρουσίας (Tauscher et al. 2019).

Επιπλέον, η EEG είναι μη επεμβατική και εύκολη στην εφαρμογή, κάτι που είναι χρήσιμο σε πειράματα όπου οι συμμετέχοντες πρέπει να παραμείνουν ακίνητοι για να αποφευχθούν σφάλματα από κίνηση ή άλλες παρεμβολές. Αυτή η δυνατότητα προσφέρει στους ερευνητές ένα πολύτιμο εργαλείο για την κατανόηση της ψυχολογίας και της νευρολογίας της παρουσίας χωρίς την ανάγκη για αυτοαναφορική αξιολόγηση.

Ο ρόλος της προσοχής στον προσδιορισμό της παρουσίας και η μελέτη με EEG

Η μελέτη της προσοχής μέσω των εγκεφαλογραφημάτων (EEG) είναι κρίσιμη για τον προσδιορισμό της αίσθησης της παρουσίας σε εμβυθιστικά περιβάλλοντα, διότι η προσοχή είναι ένας από τους βασικούς ψυχολογικούς και νευρολογικούς μηχανισμούς που επηρεάζουν την εμπειρία της παρουσίας. Η παρουσία σε εμβυθιστικά περιβάλλοντα, όπως τα περιβάλλοντα εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας, συνδέεται με την ικανότητα του ατόμου να εστιάσει και να αλληλεπιδράσει με το ψηφιακό περιβάλλον, παραβλέποντας εξωτερικές περισπασμούς και συναισθηματικές ή σωματικές αντιδράσεις (Darken et al., 1999).

Τα EEG παρέχουν εξαιρετικά ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την εγκεφαλική δραστηριότητα, επιτρέποντας την ανίχνευση της ενεργοποίησης περιοχών του εγκεφάλου που

είναι υπεύθυνες για την επεξεργασία της προσοχής. Όταν ένας χρήστης είναι πλήρως εμβυθισμένος σε ένα περιβάλλον εικονικής ή επαυξημένης πραγματικότητας, η προσοχή του κατευθύνεται στον ψηφιακό κόσμο, ενεργοποιώντας περιοχές του εγκεφάλου που σχετίζονται με την αντιληπτική επεξεργασία, την αντίληψη του χώρου και τη συγκέντρωση. Αυτές οι περιοχές περιλαμβάνουν τον προμετωπιαίο φλοιό, τον ινιακό φλοιό και άλλες περιοχές που σχετίζονται με την επεξεργασία οπτικών ερεθισμάτων και την προσοχή.

Μελετώντας την εγκεφαλική δραστηριότητα μέσω EEG, μπορούμε να καταγράψουμε αλλαγές στα κύματα του εγκεφάλου που σχετίζονται με την ενεργοποίηση αυτών των περιοχών και την εστίαση της προσοχής. Για παράδειγμα, η αύξηση των άλφα κυμάτων (8-13 Hz) ή η μείωση των θήτα κυμάτων (4-7 Hz) κατά τη διάρκεια μιας εμβυθιστικής εμπειρίας μπορεί να υποδεικνύει έντονη προσοχή και εστίαση στο περιβάλλον, στοιχεία που είναι συνδεδεμένα με την αίσθηση της παρουσίας. Επομένως, η παρακολούθηση της προσοχής μέσω EEG μπορεί να μας βοηθήσει να κατανοήσουμε πώς οι χρήστες βιώνουν την παρουσία στον ψηφιακό κόσμο, παρακολουθώντας τις εγκεφαλικές αντιδράσεις τους καθώς αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον.

Έτσι, η EEG προσφέρει ένα εργαλείο για τη μέτρηση της προσοχής που επιτρέπει στους ερευνητές να προσδιορίσουν με αντικειμενικό τρόπο την αίσθηση της παρουσίας, ανιχνεύοντας τις νευρολογικές αντιδράσεις που σχετίζονται με τη συγκέντρωση και την εμπλοκή του χρήστη σε εμβυθιστικά περιβάλλοντα.

Α' ΜΕΡΟΣ - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Το νευρικό σύστημα

Εισαγωγή

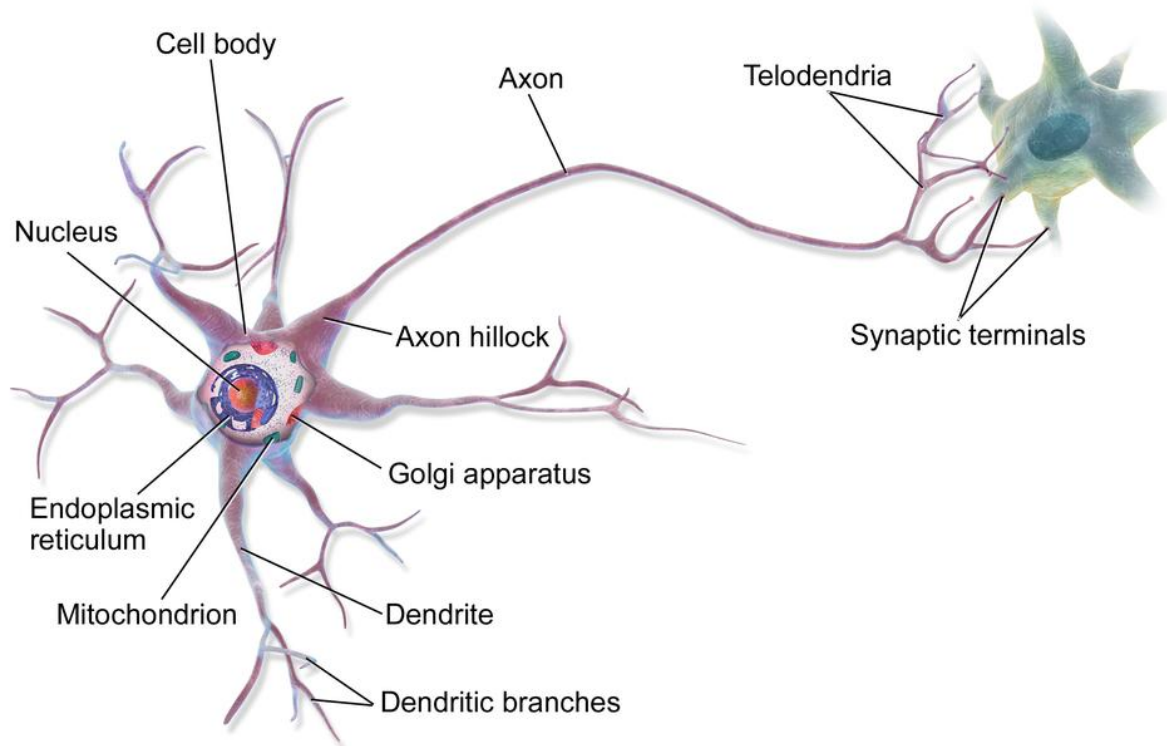
Το νευρικό σύστημα αποτελεί το κεντρικό σύστημα ελέγχου του οργανισμού, υπεύθυνο για τη ρύθμιση των αισθητηριακών, κινητικών και γνωστικών διεργασιών. Ο εγκέφαλος, ως το πιο σύνθετο τμήμα του νευρικού συστήματος, συντονίζει όλες τις λειτουργίες του οργανισμού με τη χρήση εκατομμυρίων νευρώνων που επικοινωνούν μέσω ηλεκτροχημικών σημάτων.

Το νευρικό σύστημα χωρίζεται σε δύο βασικά τμήματα. Το κεντρικό νευρικό σύστημα (ΚΝΣ) περιλαμβάνει τον εγκέφαλο και τον νωτιαίο μυελό, τα οποία επεξεργάζονται πληροφορίες και ελέγχουν τις διάφορες λειτουργίες του σώματος. Το περιφερικό νευρικό σύστημα (ΠΝΣ) περιλαμβάνει τα νεύρα που εκτείνονται από τον εγκέφαλο και τον νωτιαίο μυελό προς τα υπόλοιπα μέρη του σώματος, συνδέοντας τον εγκέφαλο με τα αισθητήρια όργανα και τους μύες.

Ο εγκέφαλος αποτελεί το κέντρο επεξεργασίας και ελέγχου. Περιλαμβάνει περίπου 86 δισεκατομμύρια νευρώνες, οι οποίοι είναι οι βασικές μονάδες του νευρικού συστήματος.

Λειτουργία των νευρώνων

Οι νευρώνες, οι βασικές μονάδες του νευρικού συστήματος, είναι εξειδικευμένα κύτταρα που επικοινωνούν μέσω ηλεκτρικών και χημικών σημάτων. Κάθε νευρώνας (Εικόνα 1) αποτελείται από τρία κύρια μέρη: τους δενδρίτες, το κυτταρικό σώμα (ή κυτταροπλασματικό σώμα) και τον νευράξονα. Οι δενδρίτες δέχονται εισερχόμενα σήματα από άλλους νευρώνες. Το κυτταρικό σώμα επεξεργάζεται αυτά τα σήματα και, αν η συνολική διέγερση υπερβεί ένα κατώφλι, παράγεται ένα δυναμικό ενέργειας, το οποίο ταξιδεύει κατά μήκος του νευράξονα. Ο νευράξονας καταλήγει στις συνάψεις, όπου το σήμα μεταδίδεται στον επόμενο νευρώνα.



Εικόνα 1: Νευρώνας

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blausen_0657_MultipolarNeuron.png

Η μετάδοση μεταξύ των νευρώνων πραγματοποιείται στις συνάψεις, μέσω της απελευθέρωσης νευροδιαβιβαστών στη συναπτική σχισμή. Αυτοί οι χημικοί αγγελιοφόροι συνδέονται με υποδοχείς στον μετασυναπτικό νευρώνα, προκαλώντας είτε διέγερση είτε αναστολή. Η διαδικασία αυτή είναι θεμελιώδης για τη λειτουργία του νευρικού συστήματος, επιτρέποντας την αποστολή αισθητηριακών πληροφοριών, την εκτέλεση κινήσεων και την παραγωγή σκέψεων.

Η μελέτη των συνάψεων ανέδειξε την έννοια της συναπτικής πλαστικότητας, δηλαδή την ικανότητα των συνάψεων να αλλάζουν με βάση την εμπειρία. Οι βραχυπρόθεσμες αλλαγές περιλαμβάνουν την αυξομείωση της ποσότητας των νευροδιαβιβαστών, ενώ οι μακροπρόθεσμες αλλαγές αφορούν δομικές μεταβολές στις συνάψεις, όπως η δημιουργία νέων συνδέσεων. Αυτές οι προσαρμογές αποτελούν τη βιολογική βάση της μάθησης και της μνήμης.

Επιπλέον, οι νευρώνες δεν λειτουργούν μεμονωμένα, αλλά συγχρονίζονται για να επιτύχουν συντονισμένη δραστηριότητα. Μέσω ρυθμών δυναμικών ενέργειας, διαφορετικές περιοχές του εγκεφάλου ευθυγραμμίζονται, σχηματίζοντας δίκτυα. Αυτή η συνεργασία είναι κρίσιμη για σύνθετες γνωστικές λειτουργίες όπως η προσοχή, η σκέψη και η ανάκληση μνήμης.

Η έρευνα έχει αποδείξει ότι η εμπειρία μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στις συνάψεις του εγκεφάλου, ενισχύοντας την ικανότητά του να αποθηκεύει πληροφορίες. Απλές μαθησιακές διαδικασίες, όπως η εξοικείωση και η ευαισθητοποίηση, προκαλούν είτε παροδικές αλλαγές στις ποσότητες νευροδιαβιβαστών είτε μακροπρόθεσμες τροποποιήσεις στη δομή των συνάψεων. Συγκεκριμένα, κατά την εξοικείωση, παρατηρείται μείωση στην απελευθέρωση νευροδιαβιβαστών στις συνάψεις, οδηγώντας σε εξασθένιση της απόκρισης. Αντίθετα, η ευαισθητοποίηση προκαλεί αύξηση στην απελευθέρωση νευροδιαβιβαστών, ενισχύοντας την απόκριση. Επιπλέον, η μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση συνοδεύεται από δομικές αλλαγές, όπως η αύξηση του αριθμού των συνάψεων και των διακλαδώσεων των νευρώνων, υποδεικνύοντας ότι η εμπειρία μπορεί να προκαλέσει φυσικές τροποποιήσεις στη δομή του εγκεφάλου. Αυτά τα ευρήματα υποστηρίζουν τη θεωρία της συναπτικής πλαστικότητας, σύμφωνα με την οποία η μάθηση και η μνήμη βασίζονται σε δραστηριοεξαρτώμενες αλλαγές στις συνάψεις (Kandel et al., 2014, Martin et al., 2000).

Περιοχές του εγκεφάλου και σχετιζόμενες με αυτές λειτουργίες

Περιγραφή των Βασικών Περιοχών του Εγκεφάλου

Ο εγκέφαλος αποτελείται από διάφορες περιοχές (Εικόνα 2), καθεμία από τις οποίες διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση σωματικών, γνωστικών και συναισθηματικών λειτουργιών. Όλες αυτές οι περιοχές συνεργάζονται μέσω πολύπλοκων δικτύων.

1. Εγκεφαλικά Ημισφαίρια

Τα εγκεφαλικά ημισφαίρια αποτελούν την κύρια δομή του εγκεφάλου και διαιρούνται σε αριστερό και δεξιό ημισφαίριο, που συνδέονται μέσω του μεσολόβιου (corpus callosum). Το αριστερό ημισφαίριο σχετίζεται περισσότερο με τη γλώσσα, την ανάλυση και τη λογική σκέψη, ενώ το δεξιό ειδικεύεται στη δημιουργικότητα και την αντίληψη του χώρου. Κάθε ημισφαίριο περιλαμβάνει τέσσερις βασικούς λοβούς: τον μετωπιαίο, τον βρεγματικό, τον κροταφικό και τον ινιακό.

2. Μετωπιαίος Λοβός (Frontal Lobe)

Ο μετωπιαίος λοβός βρίσκεται στο μπροστινό μέρος και είναι υπεύθυνος για την εκτελεστική λειτουργία, την προγραμματισμένη συμπεριφορά και τη λήψη αποφάσεων. Ο πρωτογενής κινητικός φλοιός, που βρίσκεται σε αυτή την περιοχή, ελέγχει τις εκούσιες κινήσεις, ενώ η

προμετωπιαία περιοχή παίζει σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση της προσωπικότητας και της συναισθηματικής ανταπόκρισης.

3. Βρεγματικός Λοβός (Parietal Lobe)

Βρίσκεται πίσω από τον μετωπιαίο λοβό. Είναι υπεύθυνος για λειτουργίες που σχετίζονται με την επεξεργασία αισθητηριακών πληροφοριών (αφή, πίεση, πόνος, θερμοκρασία), για τη χωρική αντίληψη και τον προσανατολισμό, αλλά και το συνδυασμό των αισθήσεων για κατανόηση του περιβάλλοντος.

4. Κροταφικός Λοβός (Temporal Lobe)

Ο κροταφικός λοβός σχετίζεται με την επεξεργασία ακουστικών πληροφοριών και τη μνήμη. Περιέχει τον ιππόκαμπο, ο οποίος είναι κρίσιμος για τη δημιουργία αναμνήσεων, καθώς και την περιοχή του Wernicke, που είναι υπεύθυνη για την κατανόηση της γλώσσας.

5. Ινιακός Λοβός (Occipital Lobe)

Ο ινιακός λοβός βρίσκεται στο πίσω μέρος του εγκεφάλου και είναι υπεύθυνος για την όραση. Περιλαμβάνει τον πρωτογενή οπτικό φλοιό, ο οποίος λαμβάνει και αναλύει οπτικά δεδομένα. Αυτή η περιοχή επεξεργάζεται πληροφορίες όπως το σχήμα, το χρώμα και η κίνηση.

6. Παρεγκεφαλίδα

Η παρεγκεφαλίδα, που βρίσκεται κάτω από τα εγκεφαλικά ημισφαίρια, ελέγχει την ισορροπία, τον συντονισμό και την ακρίβεια των κινήσεων. Είναι επίσης υπεύθυνη για την εκμάθηση νέων κινητικών δεξιοτήτων, όπως εξηγείται από τη συνεργασία της με τον φλοιό και τις βασικές γαγγλιακές δομές.

7. Θάλαμος και υποθάλαμος

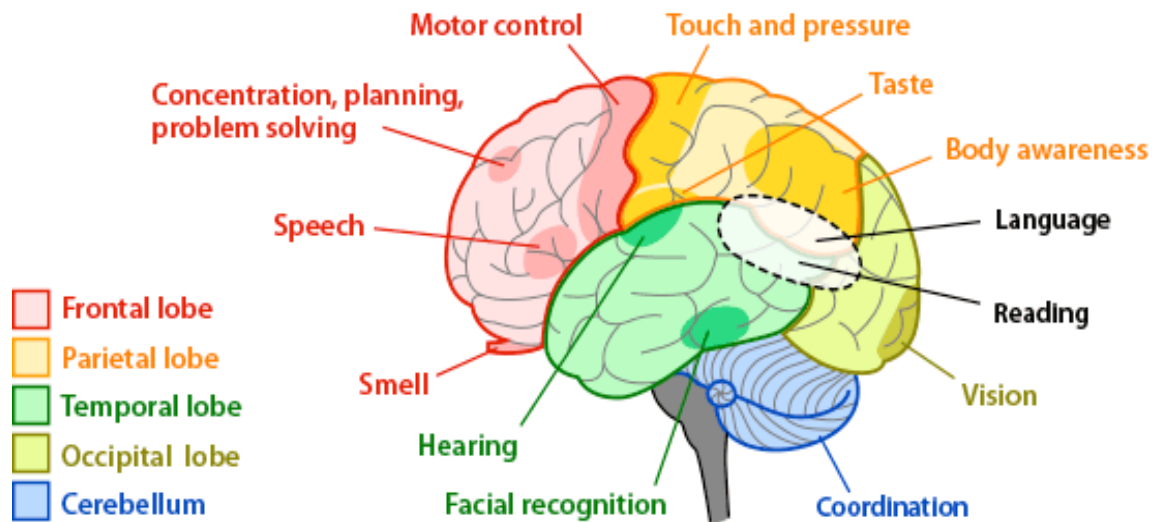
Ο θάλαμος είναι το κέντρο διαβίβασης αισθητηριακών πληροφοριών προς τον εγκεφαλικό φλοιό. Ο υποθάλαμος, από την άλλη πλευρά, ρυθμίζει βασικές λειτουργίες, όπως η θερμοκρασία, η πείνα, η δίψα και οι ορμονικές απαντήσεις μέσω της υπόφυσης.

8. Εγκεφαλικό Στέλεχος

Το εγκεφαλικό στέλεχος, που περιλαμβάνει τον μέσο εγκέφαλο, τη γέφυρα και τον προμήκη μυελό, ελέγχει ζωτικές λειτουργίες όπως η αναπνοή και ο καρδιακός ρυθμός. Είναι επίσης υπεύθυνο για την επικοινωνία του εγκεφάλου με το νωτιαίο μυελό.

9. Λιμβικό σύστημα

Το λυμβικό σύστημα, που περιλαμβάνει τον ιππόκαμπο, την αμυγδαλή και τον προμετωπιαίο φλοιό, ρυθμίζει τα συναισθήματα και τη μνήμη. Η αμυγδαλή συνδέεται στενά με την αντίδραση στο φόβο και το άγχος, ενώ ο ιππόκαμπος είναι κεντρικός για την αποθήκευση μακροπρόθεσμων αναμνήσεων.



Εικόνα 2: Περιοχές του εγκεφάλου

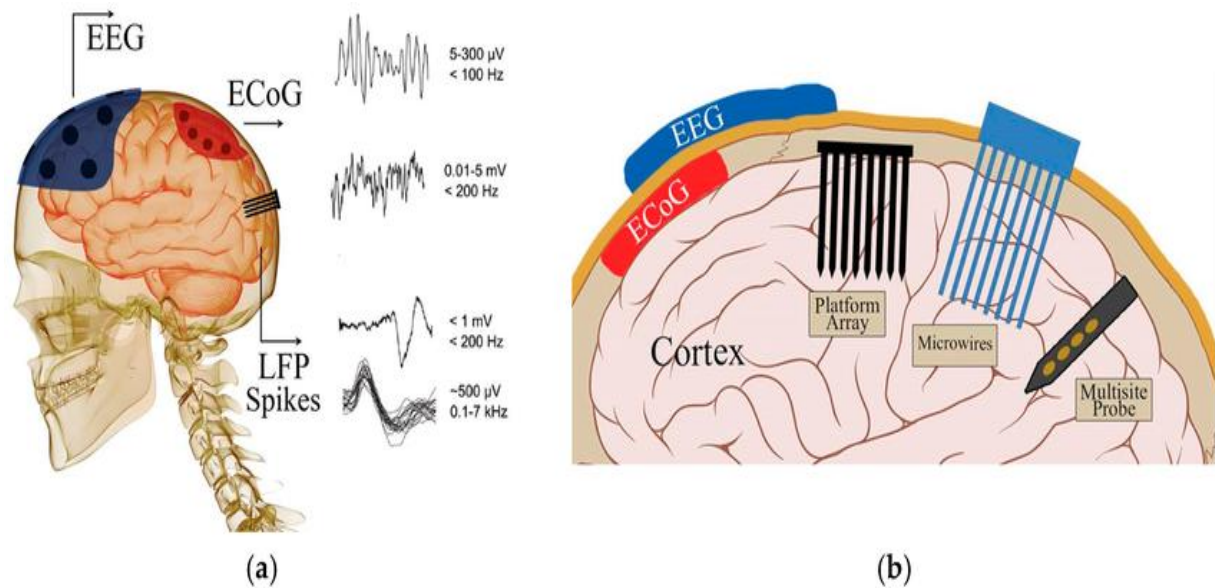
https://askabiologist.asu.edu/sites/default/files/resources/articles/nervous_journey/brain-regions-areas.gif

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα

Μέθοδοι καταγραφής της εγκεφαλικής ηλεκτρικής δραστηριότητας

Το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG), το ηλεκτροκορτικογράφημα (ECoG) και το τοπικό πεδίο δυναμικού (LFP) είναι τεχνικές καταγραφής της ηλεκτρικής δραστηριότητας του εγκεφάλου, οι οποίες διαφέρουν στη χωρική τους ανάλυση και στην τοποθέτηση των ηλεκτροδίων. Το EEG, από τις παλαιότερες και πιο διαδεδομένες τεχνικές, καταγράφει κυρίως μετασυναπτικά δυναμικά από μεγάλους πληθυσμούς νευρώνων μέσω ηλεκτροδίων στην επιφάνεια του κρανίου. Παρόλο που παρέχει ευρεία κάλυψη, η χωρική και χρονική του ανάλυση περιορίζονται λόγω της μετάδοσης του σήματος μέσα από τον ιστό, ενώ η σχέση μεταξύ των καταγραφών και των μοτίβων νευρικής εκφόρτισης παραμένει ασαφής. Από την άλλη πλευρά, το ECoG, καταγράφοντας απευθείας από την επιφάνεια του φλοιού, μειώνει την παραμόρφωση των σημάτων και προσφέρει υψηλότερη χωρική ανάλυση (π.χ. $<5 \text{ mm}^2$), γεγονός που το καθιστά πολύτιμο εργαλείο για κλινικές μελέτες.

Σε αντίθεση με τις τεχνικές EEG και ECoG, το LFP καταγράφει ηλεκτρική δραστηριότητα βαθύτερων εγκεφαλικών στρωμάτων, χρησιμοποιώντας μικροηλεκτρόδια που εισάγονται απευθείας στον εγκέφαλο (Εικόνα 3). Με εξαιρετικά υψηλή χωρική ανάλυση, καταγράφει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (από συνεχές ρεύμα έως 40 kHz), περιλαμβάνοντας τόσο μετασυναπτικά όσο και δυναμικά ενεργείας. Ειδικά, οι καταγραφές των μετασυναπτικών δυναμικών αναφέρονται ως LFP, ενώ οι καταγραφές των δυναμικών ενεργείας από πληθυσμούς νευρώνων ονομάζονται πολυμονάδες καταγραφής (MURs). Αυτή η τεχνική, χάρη στη μικρή απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και των πηγών, επιτρέπει την ακριβή καταγραφή σχεδόν όλων των ηλεκτρικών δραστηριοτήτων μικρών όγκων νευρικού ιστού (Zhang, 2019).



Εικόνα 3 : Καταγραφή της ηλεκτρικής δραστηριότητας του εγκεφάλου

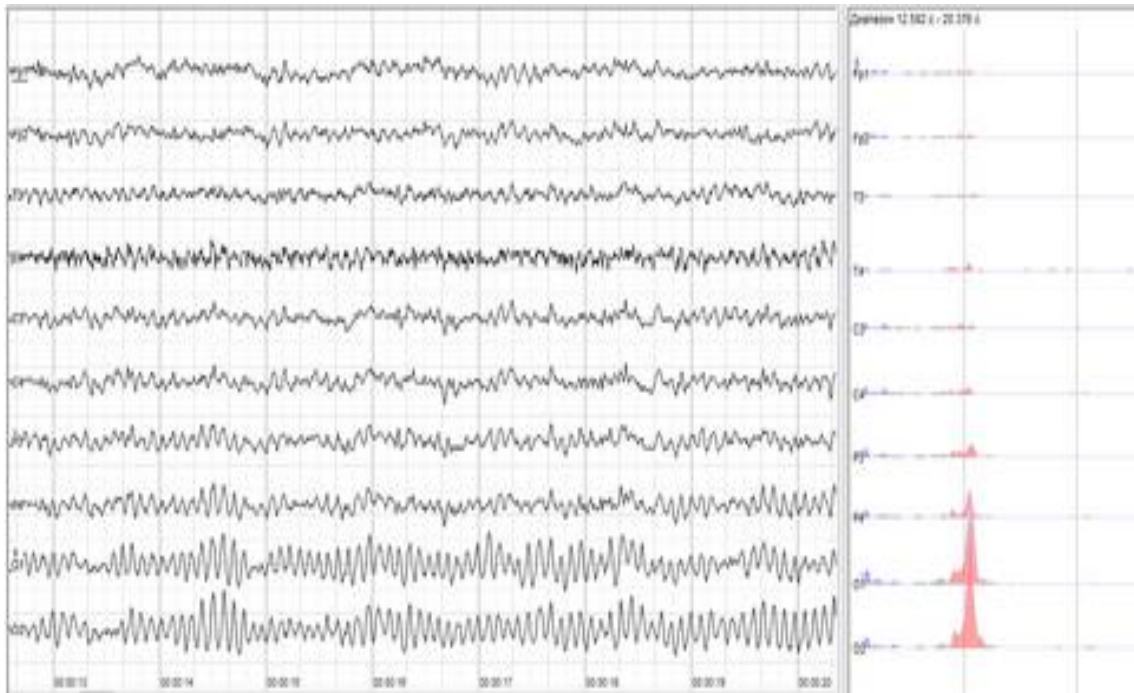
https://www.researchgate.net/figure/a-Schematic-of-neural-signals-EEGs-ECoGs-LFPs-and-spikes-and-their-properties-b_fig1_321764286

Το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG)

Το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG) είναι μια τεχνική καταγραφής της ηλεκτρικής δραστηριότητας του εγκεφάλου μέσω ηλεκτροδίων τοποθετημένων στο τριχωτό της κεφαλής. Η ιστορία του EEG ξεκινάει στις αρχές του 20ού αιώνα και αποτελεί σημαντικό σταθμό στην κατανόηση της λειτουργίας του εγκεφάλου.

Το 1875 ο Richard Caton, Άγγλος γιατρός, ήταν ο πρώτος που κατέγραψε ηλεκτρικές δραστηριότητες στον εγκεφαλο ζώων και ανέφερε την παρουσία δυναμικών που σχετίζονται με τη δραστηριότητα του εγκεφάλου. Ο Vladimir Pravdich-Neminsky το 1890, ένας Ουκρανός φυσιολόγος, έκανε την πρώτη ηλεκτρική καταγραφή του εγκεφάλου ενός σκύλου, παρουσιάζοντας κάτι παρόμοιο με το σημερινό εγκεφαλογράφημα (EEG).

Το 1924 Γερμανός ψυχίατρος Hans Berger ήταν ο πρώτος που κατέγραψε την ηλεκτρική δραστηριότητα του ανθρώπινου εγκεφάλου με μη επεμβατικό τρόπο. Εισήγαγε τον όρο "ηλεκτροεγκεφαλογράφημα" και εντόπισε ρυθμικούς κυματισμούς που σχετίζονται με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο άνθρωπος, όπως για παράδειγμα όταν ο εγκεφαλος είναι σε κατάσταση ηρεμίας (άλφα ρυθμός), συμβάλλοντας σημαντικά στην κατανόηση του εγκεφάλου και στη νευρολογία.



Εικόνα 4: Τυπικό εγκεφαλογράφημα

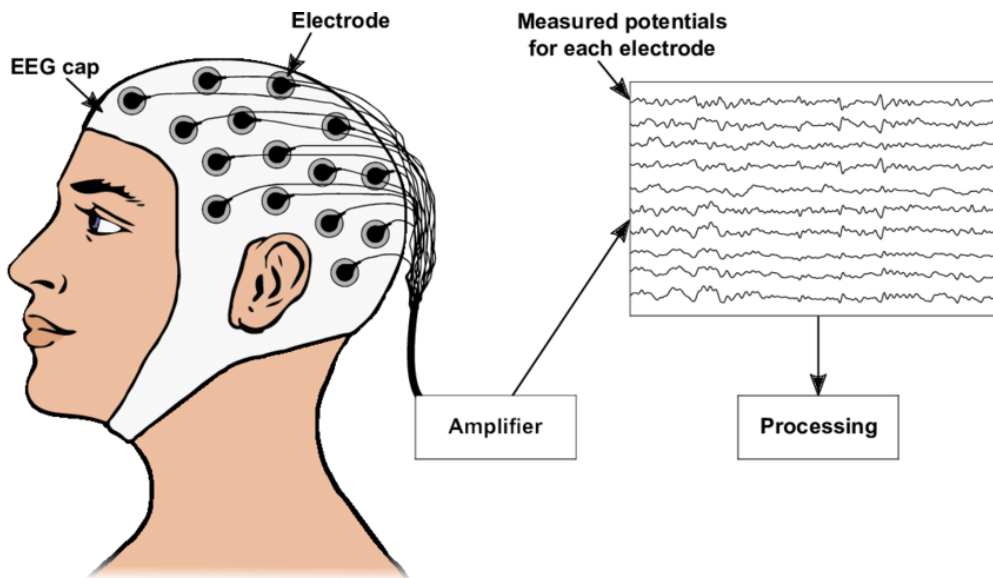
Η τεχνική του EEG διαδόθηκε και βελτιώθηκε, ειδικά για την ανίχνευση επιληπτικών κρίσεων και άλλων νευρολογικών διαταραχών. Το EEG χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην έρευνα ύπνου και έδωσε πληροφορίες για τα διαφορετικά στάδια ύπνου, όπως τα κύματα δέλτα και REM. Με την πρόοδο των υπολογιστών, έγινε δυνατή η ψηφιακή καταγραφή και ανάλυση των δεδομένων EEG, βελτιώνοντας την ακρίβεια και τις δυνατότητες διάγνωσης (Εικόνα 4).

Το EEG αποτελεί βασικό εργαλείο για τη διάγνωση νευρολογικών διαταραχών (π.χ. επιληψία, διαταραχές ύπνου) και για έρευνες σχετικά με τη λειτουργία του εγκεφάλου. Επιπλέον, χρησιμοποιείται σε σύγχρονα πεδία όπως η διεπαφή εγκεφάλου-υπολογιστή (BCI) και η γνωστική νευροεπιστήμη.

Νευροφυσιολογία του ηλεκτροεγκεφαλογράφηματος (EEG)

Το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG) καταγράφει τη συντονισμένη ηλεκτρική δραστηριότητα του εγκεφάλου που προκύπτει από τη δραστηριότητα των νευρώνων. Η καταγραφή (Εικόνα 5) γίνεται μη επεμβατικά μέσω ηλεκτροδίων που τοποθετούνται στην επιφάνεια του κρανίου. Τα ηλεκτρικά σήματα που καταγράφονται είναι αποτέλεσμα δυναμικών μεταβολών στις μεμβράνες των νευρώνων, κυρίως στις περιοχές του εγκεφαλικού φλοιού. Τα ηλεκτρικά

σήματα αυτά είναι πολύ ασθενή με ένα τυπικό εύρος $1\mu\text{V} - 100\mu\text{V}$ και είναι απαραίτητο να ενισχυθούν (Zhang,2019).



Εικόνα 5: Καταγραφή εγκεφαλογράφηματος

https://www.researchgate.net/figure/Sketch-of-how-to-record-an-Electroencephalogram-An-EEG-allows-measuring-the-electrical_fig1_338423585

Συστήματα τοποθέτησης ηλεκτροδίων EEG

Η σωστή τοποθέτηση των ηλεκτροδίων είναι κρίσιμη για την ακρίβεια των μετρήσεων στο ηλεκτροεγκεφαλογράφημα. Υπάρχουν διάφορα συστήματα τοποθέτησης που χρησιμοποιούνται διεθνώς.

Το Διεθνές Σύστημα Τοποθέτησης Ηλεκτροδίων 10–20 (Εικόνα 6) είναι μία ευρέως αναγνωρισμένη μέθοδος για την τοποθέτηση ηλεκτροδίων EEG στο κρανίο, βασιζόμενο στη σχέση των ηλεκτροδίων με τις υποκείμενες περιοχές του εγκεφάλου. Οι αποστάσεις μεταξύ γειτονικών ηλεκτροδίων είναι είτε 10% είτε 20% της συνολικής απόστασης εμπρός-πίσω ή δεξιά-αριστερά του κρανίου (Herwig et al., 2003). Η τοποθέτηση γίνεται σε σχέση με συγκεκριμένα ανατομικά σημεία αναφοράς. Το σημείο στη βάση της μύτης μεταξύ του μετώπου και της ράχης της μύτης - Nasion και το οστέινο εξόγκωμα στο πίσω μέρος του κεφαλιού – Inion, καθώς και τα προωτιαία σημεία πάνω από το κάθε αυτί.

Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει την τυποποίηση, διευκολύνοντας τη σύγκριση και την αναπαραγωγή αποτελεσμάτων σε κλινικές και ερευνητικές μελέτες. Για λεπτομερέστερες

καταγραφές EEG, το σύστημα εμπλουτίζεται με πρόσθετα ηλεκτρόδια, ακολουθώντας την τροποποιημένη συνδυαστική ονοματολογία (MCN), που ενσωματώνει ενδιάμεσες θέσεις ηλεκτροδίων.

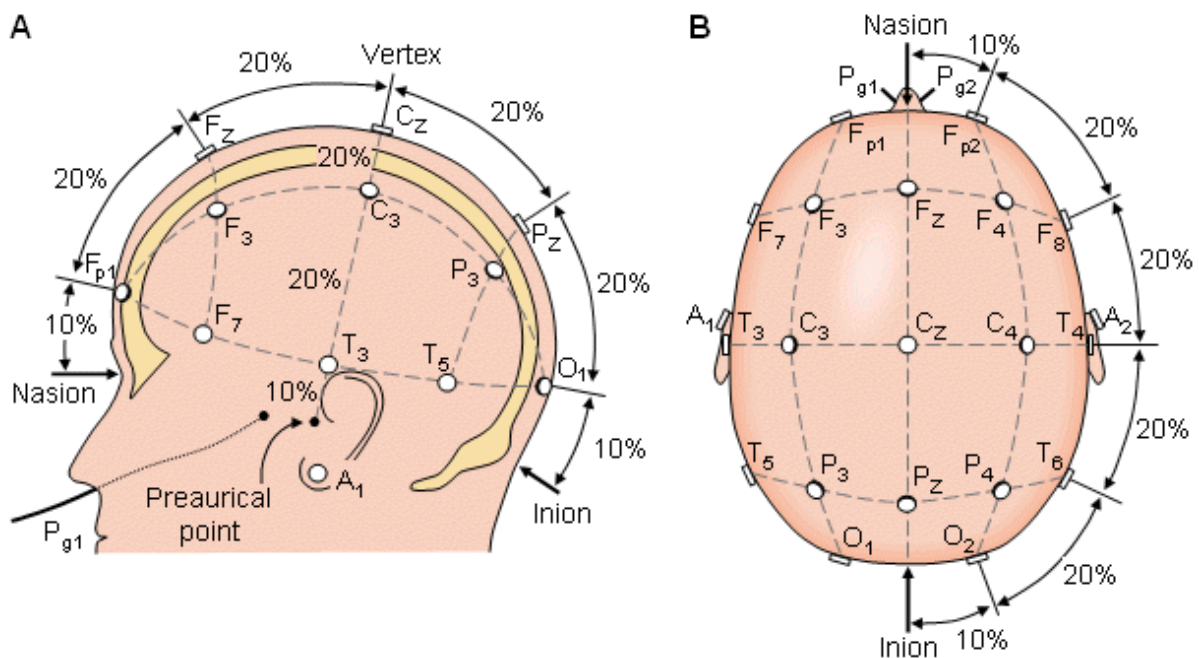
Κάθε θέση ηλεκτροδίου στο σύστημα MCN προσδιορίζεται από γράμματα που αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένους λοβούς ή περιοχές του εγκεφάλου, όπως μετωπιαίος (F), κροταφικός (T), βρεγματικός (P), ινιακός (O) και κεντρικός (C). Τα ηλεκτρόδια στον οβελιαίο άξονα (π.χ. Fz, Cz, Pz, Oz) χρησιμεύουν κυρίως ως σημεία αναφοράς και μέτρησης, χωρίς απαραίτητα να αντανακλούν τη δραστηριότητα των ημισφαιρίων. Τα ηλεκτρικά δυναμικά που καταγράφονται από αυτές τις θέσεις χρησιμοποιούνται για να μελετηθεί η δραστηριότητα σε επιλεγμένες περιοχές του εγκεφάλου με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Οι διαφορές δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων σχηματίζουν κανάλια, τα οποία οργανώνονται σε δύο βασικούς τύπους μοντάζ: το διπολικό και το μονοπολικό (αναφορικό). Στο διπολικό μοντάζ, τα κανάλια οργανώνονται σε αλυσίδες, επιτρέποντας την ακύρωση εξωτερικού θορύβου και την ενίσχυση τοπικών δυναμικών. Στο αναφορικό μοντάζ, κάθε κανάλι αντιπροσωπεύει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και ενός ηλεκτροδίου αναφοράς, ανιχνεύοντας τόσο τοπικά όσο και απομακρυσμένα δυναμικά. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος είναι πιο επιρρεπής σε εξωτερικό θόρυβο σε σύγκριση με το διπολικό μοντάζ.

Στη μονοπολική καταγραφή κάθε ηλεκτρόδιο συνδέεται με ένα σημείο αναφοράς (reference), το οποίο είναι κοινό για όλα τα κανάλια. Συνήθη σημεία αναφοράς είναι το αυτί (π.χ., A1, A2), ο λοβός του αυτιού, η κορυφή του κεφαλιού (Cz) ή μια ουδέτερη θέση. Χρησιμοποιείται σε εξετάσεις ρουτίνας και ερευνητικές μελέτες. Το EEG μετρά διαφορές δυναμικού μεταξύ κάθε ηλεκτροδίου καταγραφής και ενός σημείου αναφοράς. Τα ηλεκτρόδια EEG κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες: ενεργά, αναφοράς και γείωσης, με κάθε κατηγορία να διαδραματίζει διαφορετικό ρόλο στη μέτρηση. Η τάση κάθε ενεργού ηλεκτροδίου (A) προκύπτει ως η διαφορά δυναμικού με το ηλεκτρόδιο αναφοράς (R), δηλαδή $A - R$, αντανακλώντας κυρίως την ηλεκτρική δραστηριότητα κοντά στο ενεργό ηλεκτρόδιο. Θεωρητικά, το ηλεκτρόδιο αναφοράς θα πρέπει να τοποθετείται σε σημείο με μηδενικό δυναμικό, όμως στην πράξη αυτό είναι αδύνατο, καθώς το σημείο αναφοράς δεν είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Συνεπώς, η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει τη δραστηριότητα και στα δύο σημεία. Το ηλεκτρόδιο γείωσης μειώνει τον θόρυβο από τη σύνδεση με το κύκλωμα γείωσης. Τυπικά, ένα σύστημα EEG περιλαμβάνει πολλά ενεργά ηλεκτρόδια, ένα αναφοράς και ένα γείωσης (Zhang, 2019).

Στη διπολική καταγραφή (Bipolar Montages) η διαφορά δυναμικού υπολογίζεται μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων. Ο τρόπος αυτός βοηθά στην εντόπιση τοπικών μεταβολών και χρησιμοποιείται σε κλινικές εφαρμογές (π.χ., εντοπισμός επιληπτικών εκφορτίσεων) (Zhang, 2019).

Η επιλογή του μοντάζ εξαρτάται από τις απαιτήσεις της έρευνας ή της κλινικής εφαρμογής. Τα διπολικά μοντάζ είναι πιο αποτελεσματικά στην εξάλειψη του θορύβου, ενώ τα αναφορικά παρέχουν λεπτομερέστερη εικόνα των απόλυτων δυναμικών. Στην απεικόνιση των χαρτών EEG σε 2D ή 3D μορφές ή για την εκτίμηση της πηγής δεδομένων, οι πληροφορίες σχετικά με τις θέσεις των ηλεκτροδίων είναι κρίσιμες για την ανάλυση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 6: Τοποθέτηση ηλεκτροδίων κατά το Διεθνές Σύστημα 10-20
https://www.researchgate.net/figure/EEG-10-20-Electrode-Placement_fig1_286371237

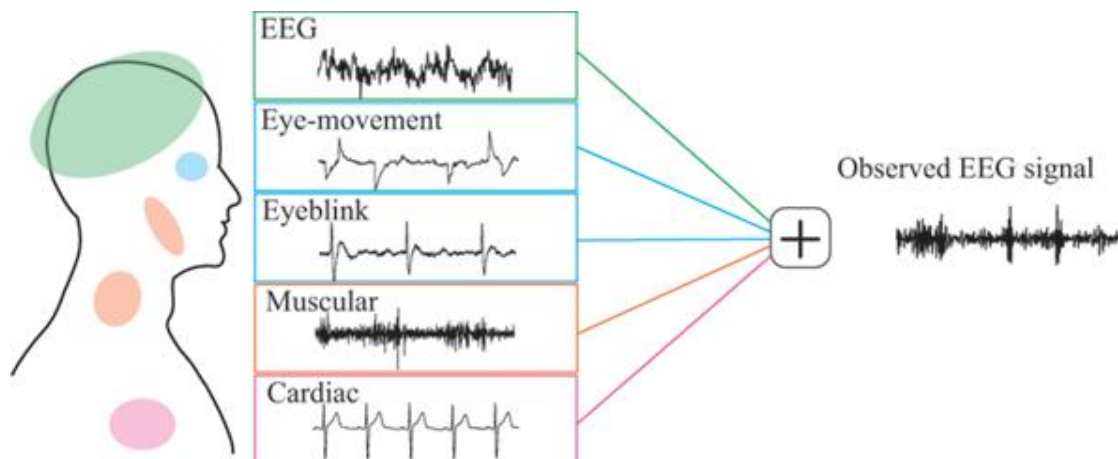
Τεχνουργήματα (Artifacts)

Τα **τεχνουργήματα (artifacts)** στο εγκεφαλογράφημα (EEG) είναι ανεπιθύμητα σήματα (Εικόνα 7) που δεν σχετίζονται με την εγκεφαλική δραστηριότητα και μπορούν να επηρεάσουν την ανάλυση και την ερμηνεία του EEG. Εμφανίζονται ως διαταραχές στις καταγραφές και

προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως ο συμμετέχων, το περιβάλλον ή το σύστημα καταγραφής.

Βιολογικά Τεχνουργήματα (Physiological Artifacts)

Τα βιολογικά τεχνουργήματα προέρχονται από τη φυσιολογική δραστηριότητα του σώματος εκτός του εγκεφάλου, όπως η κίνηση των ματιών (EOG - Electrooculogram) ή το ανοιγόκλεισμα των βλεφάρων, η μυϊκή δραστηριότητα (EMG - Electromyogram) που προκαλείται από την ένταση ή τη σύσπαση των μυών του κεφαλιού ή του λαιμού. Ακόμη προκαλείται από την καρδιακή δραστηριότητα (ECG - Electrocardiogram) που προέρχεται από την ηλεκτρική δραστηριότητα της καρδιάς, την αναπνοή που προκαλεί διακυμάνσεις λόγω της μετακίνησης του θώρακα ή της διακοπής ροής του αέρα και την κίνηση του κεφαλιού που μετακινεί τα ηλεκτρόδια.



Εικόνα 7: Χαρακτηριστικά τεχνουργήματα σε ένα εγκεφαλογράφημα
<https://cdnintech.com/media/chapter/54606/1512345123/media/F2.png>

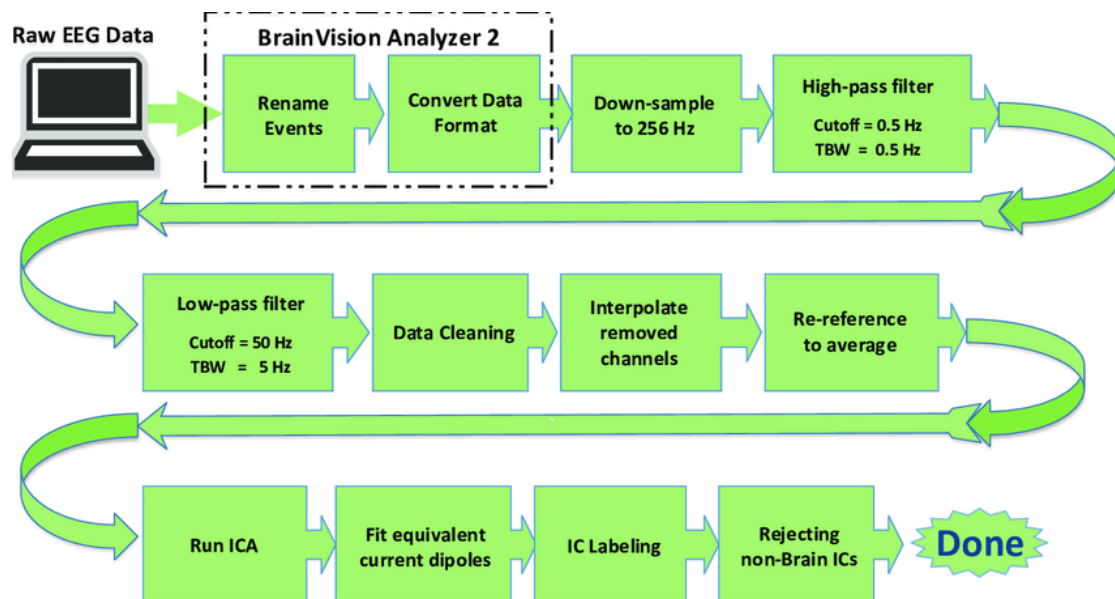
Τεχνικά Τεχνουργήματα (Technical Artifacts)

Τα τεχνικά τεχνουργήματα προκαλούνται από εξωτερικούς παράγοντες ή δυσλειτουργία του εξοπλισμού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το θόρυβος του περιβάλλοντος που προκαλείται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από φώτα, μηχανές ή καλώδια. Παρατηρούνται κυματομορφές με σταθερή συχνότητα, συνήθως 50 ή 60 Hz (ανάλογα με το ηλεκτρικό δίκτυο). Απαιτείται χρήση θωρακισμένων καλωδίων και τοποθέτηση του

εξοπλισμού σε θωρακισμένο δωμάτιο. Άλλη αιτία είναι η κακή επαφή των ηλεκτροδίων που προέρχεται από ανεπαρκή αγωγιμότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων και του δέρματος και παρατηρείται απουσία δραστηριότητας ή μεγάλες διακυμάνσεις στο σήμα. Απαιτείται καλή προετοιμασία του δέρματος και σωστή εφαρμογή gel. Επίσης τεχνουργήματα οφείλονται σε κακή γείωση ή στην κίνηση των ηλεκτροδίων.

Βασικά Βήματα Καθαρισμού EEG

Ο καθαρισμός του εγκεφαλογραφήματος (EEG preprocessing) είναι μια σημαντική διαδικασία που εξαλείφει ή μειώνει την παρουσία τεχνουργημάτων και ανεπιθύμητων σημάτων, ώστε να διατηρηθεί η καθαρή εγκεφαλική δραστηριότητα για περαιτέρω ανάλυση. Ο καθαρισμός πραγματοποιείται μέσω διάφορων σταδίων και τεχνικών (Εικόνα 8), όπως η χρήση φίλτρων, η απομάκρυνση τεχνουργημάτων και η διόρθωση ανεπιθύμητων σημάτων (Kotte et al., 2020; Jiang et al., 2019; Nunez et al., 2006; Kim 2018).



Εικόνα 8: Χαρακτηριστική γραμμή προεπεξεργασίας ενός εγκεφαλογραφήματος
https://www.researchgate.net/figure/EEG-data-preprocessing-pipeline-The-first-two-steps-are-done-using-BrainVision-Analyzer_fig3_352108447

1. Επιθεώρηση και αναγνώριση τεχνουργημάτων

Το πρώτο στάδιο είναι η αρχική παρατήρηση των κυματομορφών για τον εντοπισμό ανεπιθύμητων σημάτων. Γίνεται χειροκίνητη επισήμανση περιοχών που επηρεάζονται από τεχνουργήματα, όπως αιχμές από μυϊκή δραστηριότητα, μεγάλες διακυμάνσεις λόγω κίνησης ηλεκτροδίων.

2. Χρήση φίλτρων

Τα φίλτρα χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση συχνοτήτων που δεν σχετίζονται με τη δραστηριότητα του εγκεφάλου. Η εφαρμογή φίλτρου συνιστάται να γίνεται στο σύνολο των συνεχών δεδομένων EEG ως το πρώτο βήμα του σταδίου προεπεξεργασίας, πριν τη διαίρεση των δεδομένων σε επαναλαμβανόμενα τμήματα (epochs). Η χρήση φίλτρων στις καταγραφές EEG είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων και την ανάλυση εγκεφαλικών σημάτων. Τα φίλτρα (Εικόνα 9) επιτρέπουν την αφαίρεση εξωτερικών παραγόντων που αλλοιώνουν τα σήματα, διατηρώντας τις πληροφορίες που σχετίζονται με τη νευρωνική δραστηριότητα. Ωστόσο, η υπερβολική χρήση φίλτρων μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια σημαντικών δεδομένων, καθιστώντας σημαντική τη σωστή ρύθμιση και επιλογή του κατάλληλου φίλτρου για κάθε περίπτωση. Οι τύποι των φίλτρων που χρησιμοποιούνται στην προεπεξεργασία είναι τα:

Ζωνοπερατά Φίλτρα (Band-Pass Filters): Τα φίλτρα αυτά επιτρέπουν τη διέλευση μόνο συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων και αποκλείουν τις χαμηλότερες ή υψηλότερες από το επιθυμητό εύρος. Αυτά επιτρέπουν να επικεντρωθεί ο ερευνητής στη συγκεκριμένη ζώνη που τον ενδιαφέρει.

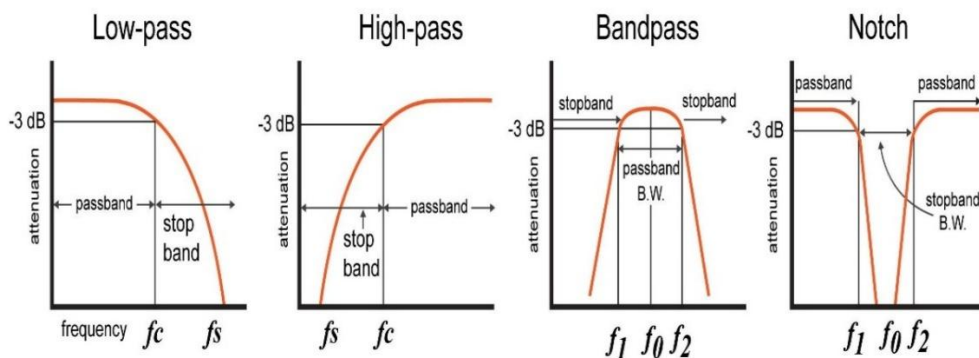
Υψιπερατά Φίλτρα Υψηλής Συχνότητας (High-Pass Filters): Αυτά τα φίλτρα επιτρέπουν τη διέλευση των συχνοτήτων που είναι μεγαλύτερες από ένα όριο (συχνότητα αποκοπής). Αυτά τα φίλτρα χρησιμοποιούνται για να αφαιρέσουν θόρυβο χαμηλών συχνοτήτων, όπως αυτές λόγω dc-offset, τις κινήσεις των ηλεκτροδίων ή τον ιδρώτα. Συνήθως εφαρμόζονται με συχνότητα αποκοπής στο διάστημα 0.1-1 Hz για να εξασφαλίσουν τη διατήρηση των σημάτων χαμηλών συχνοτήτων που σχετίζονται με τη δραστηριότητα δέλτα.

Χαμηλοπερατά Φίλτρα (Low-Pass Filters): Αυτά τα φίλτρα επιτρέπουν τη διέλευση των συχνοτήτων που είναι μικρότερες από ένα όριο (συχνότητα αποκοπής). Για το EEG, η συχνότητα αποκοπής ρυθμίζεται συχνά γύρω στα 30–50 Hz. Εξαλείφεται έτσι ο θόρυβος που προέρχεται από υψηλές συχνότητες π.χ. μυϊκή δραστηριότητα (EMG), διατηρώντας ωστόσο τις μικρότερες.

Ψηφιακά Φίλτρα Notch (Notch Filters): Χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση θορύβου από το ηλεκτρικό δίκτυο (συχνότητα 50 ή 60 Hz ανάλογα με την περιοχή). Το notch φίλτρο απομονώνει αυτές τις συγκεκριμένες συχνότητες και τις απομακρύνει χωρίς να επηρεάζει τις γύρω συχνότητες. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιβάλλοντα με υψηλό ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο.

Προσαρμοστικά Φίλτρα (Adaptive Filters): Αυτά τα φίλτρα χρησιμοποιούνται όταν ο θόρυβος είναι δυναμικός και οι ιδιότητές του αλλάζουν με τον χρόνο. Τα προσαρμοστικά φίλτρα, όπως τα LMS (Least Mean Squares), χρησιμοποιούν μοντέλα που προσαρμόζονται στις αλλαγές του θορύβου, διατηρώντας την εγκεφαλική δραστηριότητα ανεπηρέαστη. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά για την αφαίρεση καρδιακών τεχνουργημάτων.

Φίλτρα ή(Wavelet Filters): χρησιμοποιούνται για την απομόνωση τεχνουργημάτων που εμφανίζονται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές ή περιοχές συχνοτήτων. Αυτή η τεχνική είναι χρήσιμη για την αναγνώριση και αφαίρεση σύνθετων τεχνουργημάτων, όπως οι μυϊκοί θόρυβοι ή τα μάτια που ανοιγοκλείνουν.



Εικόνα 9: Φίλτρα για την επεξεργασία ενός εγκεφαλογραφήματος

3. Απομάκρυνση περιόδων με τεχνουργήματα

Σε ένα εγκεφαλογράφημα είναι δυνατό να απαιτηθεί να απομακρυνθούν περιοχές με έντονα τεχνουργήματα (π.χ., κίνηση κεφαλιού ή ηλεκτροδίων) που δεν μπορούν να διορθωθούν. Αυτό μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα, είτε με αυτοματοποιημένη ανίχνευση με χρήση αλγορίθμων για την επισημάνση και αφαίρεση των συγκεκριμένων περιοχών. Ο καθαρισμός του EEG είναι απαραίτητος για τη διασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων, ειδικά σε εφαρμογές όπως η διάγνωση εγκεφαλικών διαταραχών, η γνωστική έρευνα και η νευροφυσιολογική ανάλυση.

Πολλές φορές είμαστε αναγκασμένοι να θέτουμε ολόκληρα κανάλια εκτός επεξεργασίας αν έχουν μεγάλο θόρυβο ή να αναγκαστούμε να τα προσομοιώσουμε με βάση τα δεδομένα γειτονικών τους.

4. Ανα - αναφορά (Re-referencing)

Στις εγγραφές EEG, το ηλεκτρόδιο αναφοράς παίζει καθοριστικό ρόλο στη μείωση του θορύβου και στη διασφάλιση ακριβών δεδομένων. Συνήθεις επιλογές για το ηλεκτρόδιο αναφοράς είναι στα μαστοειδή οστά (πίσω από τα αυτιά), οι συνδεδεμένοι μαστοειδείς, το κεντρικό ηλεκτρόδιο (Cz), οι λοβοί των αυτιών ή η άκρη της μύτης. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς δεν είναι κρίσιμο κατά τη διάρκεια της καταγραφής, καθώς τα δεδομένα EEG μπορούν να ανααναφερθούν (re-reference) εκ των υστέρων. Η ανα-αναφορά είναι σημαντική για τη μείωση του θορύβου, και χωρίς αυτήν μπορεί να υπάρχει σημαντικός θόρυβος στα δεδομένα. Εάν το αρχικό σημείο αναφοράς περιείχε θόρυβο (π.χ., από μυϊκή δραστηριότητα), η αλλαγή αναφοράς βελτιώνει την ποιότητα του σήματος. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς πρέπει να τοποθετείται κατάλληλα ώστε να μην επηρεάζει τα σήματα που μας ενδιαφέρουν και πρέπει να βρίσκεται μακριά από τα σημεία καταγραφής της εγκεφαλικής δραστηριότητας.

Οι μαστοειδείς χρησιμοποιούνται συχνά ως σημεία αναφοράς, καθώς βρίσκονται μακριά από τις πηγές εγκεφαλικής δραστηριότητας και γενικά καταγράφουν λιγότερη νευρική δραστηριότητα. Οι διμερείς μαστοειδείς ή ο μέσος όρος των δύο λοβών των αυτιών είναι επίσης κοινές επιλογές. Ωστόσο, η αναφορά σε μία μόνο πλευρική θέση δεν συνιστάται, καθώς μπορεί να εισάγει μεροληψία. Το κεντρικό ηλεκτρόδιο (Cz) μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν το ενδιαφέρον είναι για δραστηριότητες του εγκεφάλου μακριά από αυτή την περιοχή.

Για συστήματα με μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων (π.χ., πάνω από 100), συχνά συνιστάται η μέση αναφορά, με την προϋπόθεση ότι το άθροισμα των ηλεκτρικών πεδίων που καταγράφονται από όλα τα ηλεκτρόδια του τριχωτού της κεφαλής είναι μηδέν. Ωστόσο, αυτή η υπόθεση είναι προβληματική εάν τα ηλεκτρόδια δεν είναι πυκνά τοποθετημένα ή ομοιόμορφα κατανεμημένα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η μέση αναφορά μπορεί να μην είναι κατάλληλη, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται λιγότεροι από 32 ηλεκτρόδια. Επίσης, όταν υπολογίζεται η μέση αναφορά, τα ηλεκτρόδια στην άκρη της μύτης ή οι λοβοί των αυτιών πρέπει να εξαιρούνται για να μην αλλοιώνουν τα αποτελέσματα.

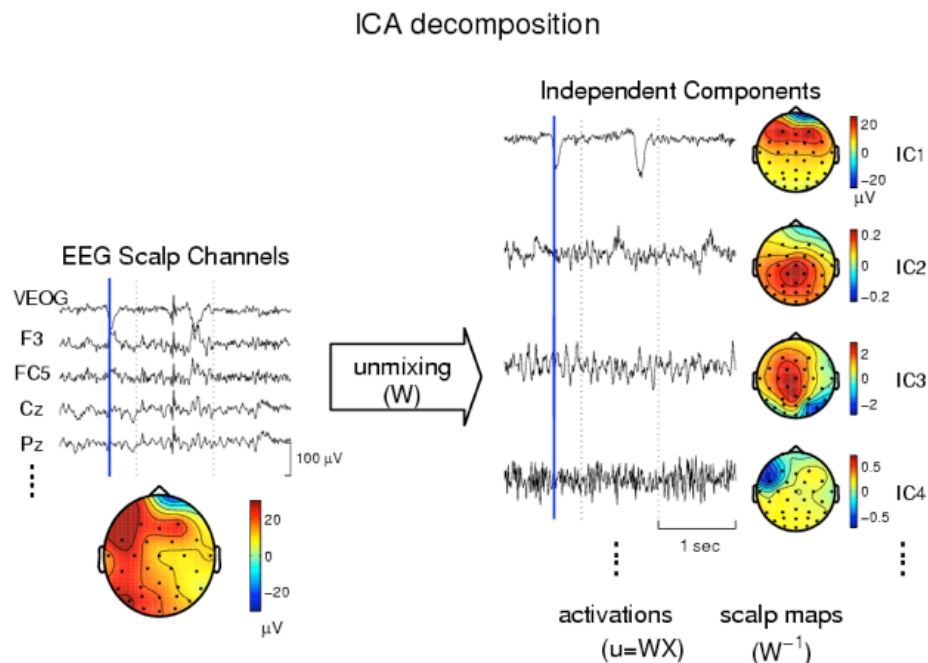
5. Διόρθωση τεχνουργημάτων με ειδικά ηλεκτρόδια

Χρησιμοποιούνται ειδικά ηλεκτρόδια για την καταγραφή της κίνησης των ματιών ή τον εντοπισμό των περιοδικών καρδιακών σημάτων για τη μετέπειτα αφαίρεσή τους από το EEG.

6. Προηγμένες τεχνικές καθαρισμού

Ανάλυση (ICA –(Independent Component Analysis): Η ICA βασίζεται στην υπόθεση ότι τα σήματα που συνθέτουν το EEG είναι στατιστικά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Μέσω μαθηματικών αλγορίθμων, όπως ο FastICA ή ο Infomax, διασπάται το πολυκαναλικό EEG σε έναν αριθμό ανεξάρτητων συνιστωσών (Independent Components, ICs), καθεμία από τις οποίες αντιπροσωπεύει μία πιθανή πηγή σήματος. Η ICA είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην απομάκρυνση σημάτων που προέρχονται από κινήσεις ματιών, από τον καρδιακό ρυθμό, από μυϊκούς σπασμούς. Δεν επηρεάζονται τα εγκεφαλικά σήματα, αλλά απαιτεί εμπειρία για τη σωστή επιλογή παραμέτρων και συνιστωσών (Εικόνα 10).

Ανάλυση με Μηχανική Μάθηση: Χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης για τον αυτόματο εντοπισμό και την αφαίρεση τεχνουργημάτων. Είναι κατάλληλη μέθοδος για μεγάλα σύνολα δεδομένων με πολλαπλά κανάλια.



Εικόνα 10: Independent Component Analysis
https://scn.ucsd.edu/~jung/Site/EEG_artifact_removal_files/EEGdecomposition.png

Ανάλυση χρόνου-συχνότητας (Time-Frequency Analysis) του EEG

Η χρονική επεξεργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση των σημάτων σαν συνάρτηση του χρόνου δίνοντας έμφαση σε αλλαγές που σχετίζονται με συγκεκριμένα γεγονότα ή στα δυναμικά χαρακτηριστικά τους αναζητώντας μοτίβα. Επιτρέπει την παρακολούθηση αλλαγών στη δραστηριότητα του εγκεφάλου κατά τη διάρκεια γνωστικών διεργασιών ή περιόδων ύπνου.

Η παραδοσιακή ανάλυση του EEG υποθέτει ότι το φάσμα του σήματος είναι σταθερό, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η πραγματική φύση του EEG ως ένα σήμα που αλλάζει συνεχώς με το χρόνο. Αυτή η υπόθεση αποτυγχάνει να καταγράψει τις σημαντικές δυναμικές αλλαγές που συμβαίνουν στο EEG, καθώς τα σήματα EEG είναι μη σταθερά και οι ιδιότητες τους (όπως η φασματική πυκνότητα), μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Για παράδειγμα, τα σήματα EEG αλλάζουν σημαντικά σε διάφορες ψυχικές και φυσιολογικές καταστάσεις, όπως όταν τα μάτια είναι ανοιχτά ή κλειστά, κατά τη διάρκεια του ύπνου ή του διαλογισμού. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τις εγκεφαλικές δραστηριότητες, αλλά η παραδοσιακή φασματική ανάλυση δεν μπορεί να εντοπίσει αυτές τις δυναμικές αλλαγές με ακρίβεια. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη για μεθόδους ανάλυσης που να καταγράφουν τις μεταβολές του φάσματος σε συνδυασμό με το χρόνο, κάτι που επιτυγχάνεται μέσω της ανάλυσης χρόνου-συχνότητας (TFA).

Η ανάλυση χρόνου-συχνότητας (TFA) συνδυάζει τις δύο διαστάσεις του χρόνου και της συχνότητας, επιτρέποντας την ταυτόχρονη παρακολούθηση της κατανομής της φασματικής ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή και συχνότητα. Αυτός ο συνδυασμός παρέχει μια πιο λεπτομερή εικόνα των μη σταθερών σημάτων, επιτρέποντας την ανάλυση του τρόπου με τον οποίο η ισχύς σε διάφορες συχνότητες μεταβάλλεται με το χρόνο. Για παράδειγμα, ένα σήμα EEG που καταγράφεται κατά τη διάρκεια των συνθηκών "μάτια ανοιχτά" και "μάτια κλειστά" παρουσιάζει διαφορετικά φάσματα στις δύο χρονικές περιόδους. Αυτή η διαφορά είναι εμφανής μόνο αν εξετάσουμε τη χρονική-φασματική κατανομή του σήματος και όχι το συνολικό φάσμα του σήματος. Στην πράξη, η ανάλυση TFA επιτρέπει την παρακολούθηση του πότε εμφανίζονται συγκεκριμένοι ρυθμοί, όπως ο ρυθμός άλφα, και πώς αυτοί οι ρυθμοί σχετίζονται με τις φυσιολογικές ή ψυχικές καταστάσεις.

Βασικές τεχνικές ανάλυσης χρόνου - συχνότητας

Η ανάλυση χρόνου-συχνότητας περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους που μπορούν να καταγράψουν τη φασματική ισχύ του σήματος σε διάφορες χρονικές περιόδους και συχνότητες. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες μεθόδων: οι κατανομές ισχύος χρόνου-συχνότητας και οι μέθοδοι αποσύνθεσης σήματος χρόνου-συχνότητας.

Κατανομές Ισχύος Χρόνου-Συχνότητας: Αυτές οι μέθοδοι καταγράφουν τη φασματική ισχύ του σήματος σε κάθε χρονική στιγμή και σε κάθε συχνότητα. Δύο από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους είναι ο Σύντομος Μετασχηματισμός Fourier (STFT, short-time Fourier transform) και ο Συνεχής Μετασχηματισμός Κυμάτων (CWT). Ο STFT χωρίζει το σήμα σε μικρές χρονικές περιόδους και υπολογίζει το φάσμα για κάθε περίοδο, προσφέροντας μια εκτίμηση της ισχύος στις διάφορες συχνότητες. Ο CWT χρησιμοποιεί κυματικά φίλτρα για να αναλύσει το σήμα σε διαφορετικές κλίμακες χρόνου και συχνότητας, επιτρέποντας μια πιο ευέλικτη ανάλυση των μη σταθερών σημάτων.

Αποσύνθεση Σήματος Χρόνου-Συχνότητας: Αυτές οι μέθοδοι επιδιώκουν να αποσυνθέσουν το σήμα σε συστατικά μέρη που έχουν χαρακτηριστικά συγκεκριμένων συχνοτήτων και χρονικών περιόδων. Ο Διακριτός Μετασχηματισμός Κυμάτων (DWT) και η Αναζήτηση Αντιστοιχίας (Matching Pursuit) είναι κοινές μέθοδοι για αυτήν την αποσύνθεση, επιτρέποντας την αναγνώριση και απομόνωση των διαφορετικών χαρακτηριστικών του σήματος. Επιπλέον, η Αυτοσχέδια Ανάλυση (Empirical Mode Decomposition) αποσυνθέτει το σήμα σε μια σειρά από μοτίβα που αντανakλούν τις δυναμικές μεταβολές του σε διαφορετικές κλίμακες χρόνου και συχνότητας.

Η ανάλυση χρόνου-συχνότητας είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάλυση των μη σταθερών σημάτων του EEG, επιτρέποντας την παρακολούθηση των μεταβολών του σήματος σε σχέση με διαφορετικές φυσιολογικές καταστάσεις και ψυχικές καταστάσεις. Για παράδειγμα, η ανάλυση των αλλαγών του φάσματος κατά τη διάρκεια του διαλογισμού ή της αλλαγής από την κατάσταση ύπνου σε κατάσταση εγρήγορσης μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τις εγκεφαλικές διαδικασίες που σχετίζονται με αυτές τις καταστάσεις.

Οι μέθοδοι TFA παρέχουν μια ισχυρή προσέγγιση για την κατανόηση της δυναμικής των εγκεφαλικών κυμάτων και των αλλαγών τους με την πάροδο του χρόνου, κάτι που είναι αδύνατο να επιτευχθεί μέσω της παραδοσιακής ανάλυσης φάσματος, η οποία δεν εξετάζει τη χρονική διάσταση.

Φασματική επεξεργασία (Spectral Analysis) του EEG

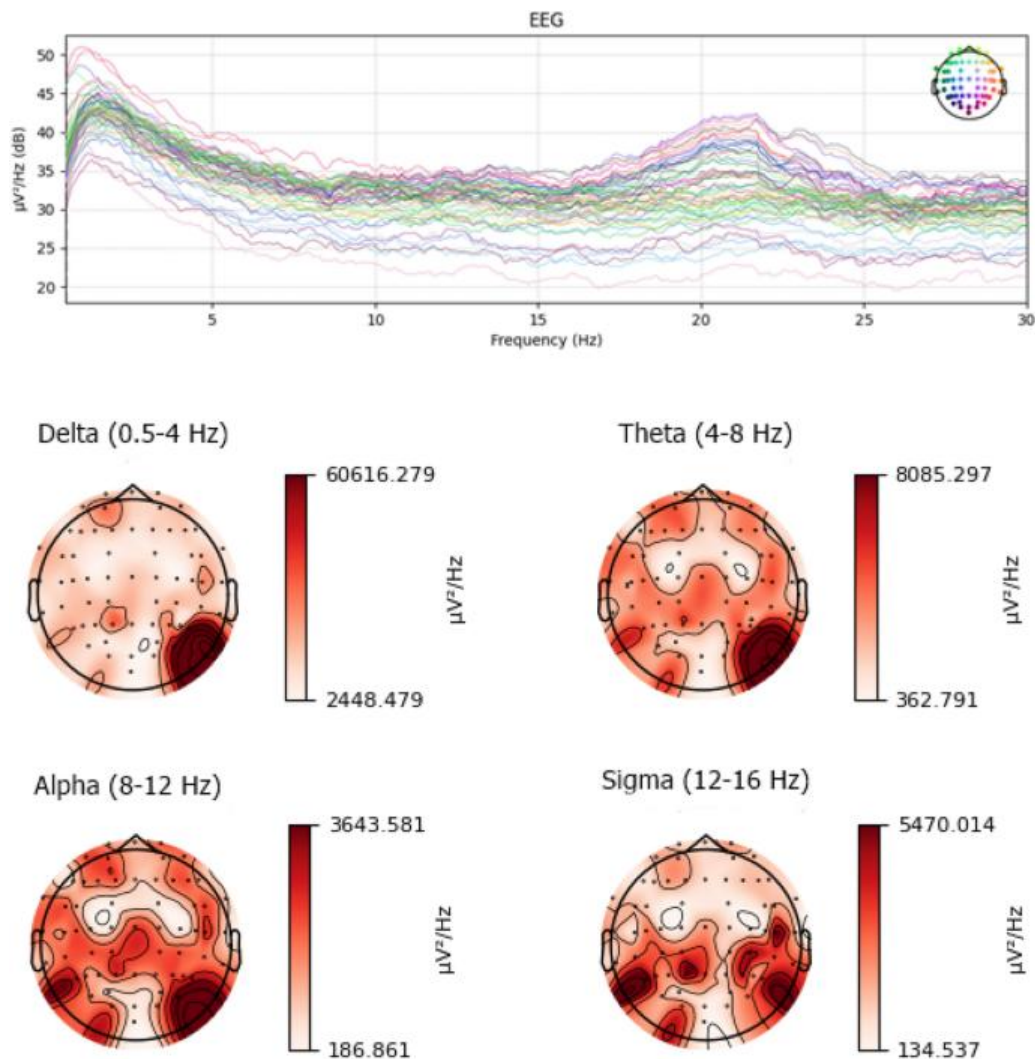
Η φασματική ανάλυση αποτελεί μία θεμελιώδη μέθοδο για τη μελέτη ταλαντωτικών και ρυθμικών σημάτων, όπως τα σήματα EEG (ηλεκτροεγκεφαλογράφημα). Αντί να εξετάζει τις χρονικές μεταβολές του σήματος, η φασματική ανάλυση εστιάζει στην κατανομή ενέργειας του σήματος σε διάφορες συχνότητες. Η συχνότητα, που μετρείται σε Hertz (Hz), αντιπροσωπεύει τον αριθμό κύκλων ανά δευτερόλεπτο και χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις ταλαντώσεις των σημάτων. Η φασματική ανάλυση μετατρέπει ένα σήμα από τον χρονικό τομέα στον φασματικό, επιτρέποντας την ανάλυση της ισχύος του σήματος σε σχέση με τη συχνότητα. Οι φασματικές τεχνικές αποκαλύπτουν περιοδικότητες μέσα στο σήμα και παρέχουν πληροφορίες για την ενεργειακή κατανομή του στις διάφορες συχνότητες. Στην ανάλυση EEG, αυτή η τεχνική είναι ζωτικής σημασίας για την κατηγοριοποίηση των ρυθμών του εγκεφάλου, όπως οι ρυθμοί δέλτα (1–4 Hz), θήτα (4–8 Hz), άλφα (8–12 Hz), βήτα (12–20 Hz), και γάμμα (>20 Hz).

Η θεμελίωση της φασματικής ανάλυσης βασίζεται στον μετασχηματισμό Fourier, που αναλύει το σήμα του χρόνου ως άθροισμα συνημίτονων και ημιτόνων με διαφορετικές συχνότητες. Ο μετασχηματισμός Fourier επιτρέπει τη μετατροπή ενός χρονοσειριακού σήματος στον φασματικό τομέα, όπου μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ σε κάθε συχνότητα. Στην πραγματικότητα, οι συσκευές EEG χρησιμοποιούν τη Διακριτή Εκδοχή του Μετασχηματισμού Fourier (DFT), καθώς τα δεδομένα EEG είναι δειγματοληπτικά και όχι συνεχόμενα. Ο υπολογισμός του DFT πραγματοποιείται συνήθως με τον αλγόριθμο Fast Fourier Transform (FFT), ο οποίος επιτρέπει την ταχύτατη ανάλυση του σήματος και τη μετατροπή του σε φασματική μορφή.

Η πυκνότητα φασματικής ισχύος (PSD) είναι ένα βασικό αποτέλεσμα της φασματικής ανάλυσης και περιγράφει πώς η ισχύς ενός σήματος κατανέμεται σε διαφορετικές συχνότητες. Η PSD συνήθως εκφράζεται σε μονάδες V^2/Hz ή dB (δηλαδή $10\log_{10}(V^2/Hz)$) και παρέχει πληροφορίες για την κατανομή της ισχύος στο φάσμα του σήματος. Στην περίπτωση του EEG, η φασματική ανάλυση χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η ισχύς των κύριων ρυθμών του εγκεφάλου, που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες περιοχές του εγκεφάλου και είναι σχετιζόμενοι με διάφορες ψυχικές και νευρολογικές καταστάσεις.

Η φασματική εκτίμηση (Εικόνα 11) είναι κρίσιμη για την κατηγοριοποίηση των ρυθμών του εγκεφάλου. Οι βασικοί ρυθμοί περιλαμβάνουν το ρυθμό δέλτα (1–4 Hz), ο οποίος σχετίζεται με την εγρήγορση και τη συγκέντρωση, το ρυθμό θήτα (4–8 Hz), που εμφανίζεται κυρίως κατά

τη διάρκεια του ύπνου, το ρυθμό άλφα (8–12 Hz), που παρατηρείται σε χαλάρωση και ήρεμη εγρήγορση, το ρυθμό βήτα (12–20 Hz), που συνδέεται με τη συνειδητή σκέψη και τη δραστηριότητα του κινητικού φλοιού, και τον ρυθμό γάμα (>20 Hz), ο οποίος σχετίζεται με την υψηλή γνωστική δραστηριότητα και την επεξεργασία πληροφοριών. Η ανάλυση αυτών των ρυθμών επιτρέπει στους ερευνητές να κατανοήσουν καλύτερα τις εγκεφαλικές διαδικασίες και να διεξάγουν κλινικές μελέτες για την εκτίμηση νευρολογικών καταστάσεων όπως η επιληψία, οι ψυχικές διαταραχές και η νόσος του Αλτσχάιμερ.



Εικόνα 11: Φασματική ανάλυση εγκεφαλογραφήματος

https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1038%2Fs41598-024-66110-0/MediaObjects/41598_2024_66110_Fig6_HTML.png?as=webp

Πολλές μέθοδοι φασματικής εκτίμησης χρησιμοποιούνται για την ανάλυση του EEG, η πιο δημοφιλής από τις οποίες είναι το περιοδικόγραμμα, η μέθοδος Welch, οι πολλαπλές κωνικές συναρτήσεις (multitaper) και τα αυτοπαλίνδρομα μοντέλα (AR). Κάθε μέθοδος έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και περιορισμούς, ανάλογα με τον τύπο του σήματος και το σκοπό της ανάλυσης. Για παράδειγμα, η μέθοδος Welch είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη καθώς μειώνει την παραμόρφωση του σήματος και αυξάνει την ανάλυση ισχύος. Η μέθοδος των πολλαπλών κωνικών συναρτήσεων είναι χρήσιμη για την ανάλυση σημάτων με υψηλή παραμόρφωση, ενώ τα αυτοπαλίνδρομα μοντέλα επιτρέπουν την εκτίμηση της φασματικής ισχύος με βάση τις παρατηρούμενες χρονικές εξαρτήσεις του σήματος.

Στην κλινική και ερευνητική πρακτική, η φασματική ανάλυση του EEG παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για την κατανόηση των νευρολογικών δραστηριοτήτων και τη διάγνωση καταστάσεων όπως η επιληψία, οι διαταραχές του ύπνου και οι ψυχικές νόσοι. Η κατανόηση των χαρακτηριστικών των διάφορων εγκεφαλικών ρυθμών και η ανάλυσή τους μέσω φασματικών τεχνικών συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη θεραπευτικών προσεγγίσεων και στη μελέτη της λειτουργίας του εγκεφάλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Οι εγκεφαλικοί ρυθμοί

Εισαγωγή

Οι εγκεφαλικοί ρυθμοί (Εικόνα 12) αναφέρονται σε διαφορετικές συχνότητες κυμάτων που καταγράφονται μέσω του εγκεφαλογραφήματος (EEG) και αντικατοπτρίζουν τη δραστηριότητα του εγκεφάλου. Αυτοί οι ρυθμοί σχετίζονται με διάφορες ψυχικές καταστάσεις και λειτουργίες, όπως η συνείδηση, η προσοχή, ο ύπνος, η χαλάρωση και η εγρήγορση. Οι εγκεφαλικοί ρυθμοί κατηγοριοποιούνται σε ομάδες με βάση τη συχνότητά τους, και κάθε ομάδα σχετίζεται με διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του εγκεφάλου (Niedermeyer & da Silva, 2005).

Δέλτα (Delta, 0.5 - 4 Hz)

Οι συχνότητες κάτω από 4 Hz θεωρούνται κύματα δέλτα και το πλάτος τους κυμαίνεται μεταξύ 20–200 μV . Συνδέονται κυρίως με τον βαθύ ύπνο και την αναγέννηση του οργανισμού. Συναντώνται συχνά σε καταστάσεις αναισθησίας ή σε περιόδους έντονης χαλάρωσης. Ενισχύονται σε διαταραχές όπως ο υποθυρεοειδισμός ή οι εγκεφαλικές βλάβες.

Θήτα (Theta, 4 - 8 Hz)

Οι συχνότητες από 4 έως 8 Hz αποτελούν τον ρυθμό θήτα και το πλάτος τους κυμαίνεται μεταξύ 10–100 μV . Συνδέεται με χαλάρωση, υποσυνείδητες καταστάσεις, και την ενοποίηση – αναδιοργάνωση της μνήμης και τη δημιουργική σκέψη. Στη διάρκεια του διαλογισμού ή της χαλάρωσης, οι ρυθμοί θήτα είναι έντονοι. Εντοπίζονται κυρίως στο μετωπιαίο και το κεντρικό τμήμα του εγκεφάλου.

Άλφα (Alpha, 8 - 12 Hz)

Ο ρυθμός άλφα βρίσκεται μεταξύ 8 και 12 Hz και το πλάτος τους κυμαίνεται μεταξύ 20–60 μV , είναι ο πιο μελετημένος ρυθμός στο EEG. Συχνά εμφανίζεται όταν είμαστε χαλαροί και ξύπνιοι, χωρίς να είμαστε ιδιαίτερα ενεργοί ή συγκεντρωμένοι. Σχετίζεται με την κατάσταση εγρήγορσης και χαλάρωσης, ενώ η δραστηριότητα άλφα συχνά μειώνεται όταν η προσοχή αυξάνεται ή όταν αναλαμβάνεται μια δραστηριότητα. Ενισχύεται κατά την χαλάρωση και τον διαλογισμό. Εμφανίζονται κυρίως στα ινιακά και κροταφικά τμήματα του εγκεφάλου όταν το άτομο είναι ήρεμο και αναπαυμένο.

Ο ρυθμός άλφα συχνότητας (8–12 Hz) είναι από τα κυρίαρχα φαινόμενα στον ανθρώπινο εγκέφαλο (Klimesch, 2012), παρουσιάζει σημαντικές αλλαγές ανάλογα με το είδος του

ερεθίσματος ή τις απαιτήσεις της εκάστοτε εργασίας (Palva & Palva, 2007). Αυτές οι αλλαγές εκδηλώνονται είτε ως μείωση της ισχύος του στις περιοχές του εγκεφάλου που ενεργοποιούνται σχετίζονται με την εργασία και καλείται αποσυγχρονισμός που σχετίζεται με κάποιο γεγονός (Event-Related Desynchronization, ERD) (Pfurtscheller et. al. 2007), είτε ως συγχρονισμός που σχετίζεται με κάποιο γεγονός (Event-Related Synchronization, ERS) δηλαδή αύξηση της ισχύος άλφα σε περιοχές που επεξεργάζονται ερεθίσματα που δεν σχετίζονται με την εργασία και αφορούν ερεθίσματα που δρουν ανταγωνιστικά και διασπαστικά (Foxe & Snyder, 2011).

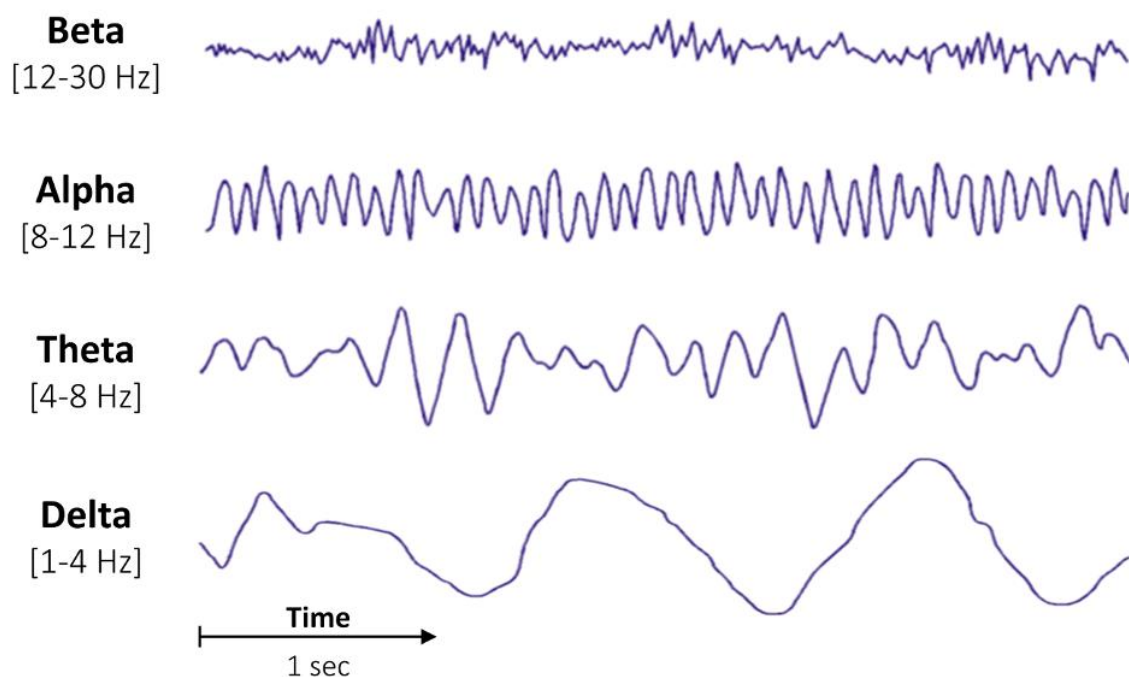
Διαφορές υπάρχουν στην μεταβολή της δραστηριότητας άλφα ανάλογα με το αν το ερέθισμα είναι οπτικό ή ακουστικό. Επίσης σημασία έχει αν η προσοχή εστιάζεται σε εξωτερικά ή εσωτερικά ερεθίσματα. Η μεγαλύτερη εξωτερική προσοχή οδηγεί σε ισχυρότερο αποσυγχρονισμό της άλφα, υποστηρίζοντας την επεξεργασία των σχετικών πληροφοριών. Ο συγχρονισμός της άλφα δρα ως φίλτρο που καταστέλλει τα εξωτερικά ερεθίσματα (υπόθεση αναστολής), επιτρέποντας την εστιασμένη εσωτερική επεξεργασία κατά τη διάρκεια εργασιών που απαιτούν πρόσβαση στη μνήμη ή ενέχουν αυξημένο φόρτο (Magosso et al. 2019).

Βήτα (Beta, 13 - 30 Hz)

Οι συχνότητες από 13 έως 30 Hz ανήκουν στον ρυθμό βήτα και το πλάτος τους κυμαίνεται μεταξύ 5–20 μ V. Πρόκειται για δραστηριότητα που σχετίζεται με τη νοητική εγρήγορση, τη συγκέντρωση, την ανάλυση και την επίλυση προβλημάτων (Engel & Fries, 2010). Εμφανίζεται σε καταστάσεις ενεργούς σκέψης, συγκέντρωσης ή όταν επιλύονται προβλήματα. Μπορεί να αυξάνει σε καταστάσεις άγχους ή ανησυχίας, όταν το άτομο είναι σε υψηλή εγρήγορση (Ray & Cole, 1985). Η δραστηριότητα βήτα θεωρείται πως ασκεί ανασταλτικό έλεγχο εμποδίζοντας την πρόωρη ή ανεπιθύμητη δράση (Jensen et al., 2012). Η συχνότητα βήτα ενισχύεται κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας για κίνηση και μειώνεται (αποσυγχρονισμός) κατά την εκτέλεση της κίνησης. Η αποκατάσταση της βήτα δραστηριότητας (συγχρονισμός) μετά την κίνηση σηματοδοτεί την ολοκλήρωση της δράσης και την προετοιμασία για νέες κινήσεις (Pfurtscheller & da Silva, 1999). Στα εικονικά περιβάλλοντα τα μοτίβα δραστηριότητας βήτα επιτρέπουν την ανάλυση της κινητικής απόδοσης, όπως σε εκπαιδευτικές εφαρμογές ή προσομοιώσεις για χειρουργούς ή πιλότους. Συνήθως εμφανίζονται στο μετωπιαίο και κροταφικό τμήμα του εγκεφάλου.

Γάμα (Gamma, 30 - 100 Hz και άνω)

Ο ρυθμός γάμα αφορά συχνότητες πάνω από 30 Hz και μπορεί να φτάσει έως και 100 Hz ή περισσότερο και το πλάτος τους κυμαίνεται μεταξύ $<5-10 \mu V$. Αφορά δραστηριότητα που συνδέεται με υψηλής έντασης γνωστικές λειτουργίες, όπως η μάθηση, η ενεργή σκέψη, η ανάλυση και η επεξεργασία πληροφοριών. Παίζει ρόλο στην αντίληψη και τη γνωστική συναρμογή. Σχετίζεται επίσης με την καλύτερη συγκέντρωση και αντίληψη όταν γίνεται επεξεργασία πληροφοριών. Παρατηρούνται στο κροταφικό και ινιακό τμήμα του εγκεφάλου. Η δραστηριότητα στη συχνότητα γάμα συχνά χρησιμοποιείται ως νευρολογικός δείκτης στα εικονικά περιβάλλοντα (Athif *et al.*, 2020). Υψηλή δραστηριότητα γάμα συσχετίζεται με την αντίληψη συνοχής και πειστικότητας του εικονικού περιβάλλοντος, ενισχύοντας την αίσθηση παρουσίας. Η δραστηριότητα γάμα χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης και του γνωστικού φόρτου κατά τη διάρκεια εκπαιδευτικών εφαρμογών VR (Fitzgibbon *et al.*, 2004). Παρά τη σημασία της, η μελέτη της συχνότητας γάμα αντιμετωπίζει προκλήσεις, όπως η δυσκολία ανίχνευσης μέσω EEG λόγω θορύβου από μυϊκά και εξωγενή σήματα.



Εικόνα 12: Εγκεφαλικοί ρυθμοί

https://raphaelvallat.com/images/tutorials/bandpower/brain_waves.png

Κεφάλαιο 4^ο: Προκλητά δυναμικά (ERPs)

Εισαγωγή

Τα προκλητά δυναμικά (Event-Related Potentials, ERPs) είναι ηλεκτρικές δραστηριότητες του εγκεφάλου που προκαλούνται από συγκεκριμένα ερεθίσματα ή αντιδράσεις σε ερεθίσματα και καταγράφονται μέσω του εγκεφαλογραφήματος (EEG). Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στην ψυχολογική και νευρολογική έρευνα.

Βασικά Χαρακτηριστικά των Προκλητών Δυναμικών (ERPs)

Ένα ERP αναφέρεται σε μια δυναμική αλλαγή στη δραστηριότητα του εγκεφάλου που συμβαίνει αμέσως μετά από ένα εξωτερικό ερέθισμα. Η ένταση και η μορφή αυτών των δυναμικών εξαρτώνται από την ιδιαιτερότητα του ερεθίσματος, τον τύπο ερεθίσματος (οπτικό, ακουστικό, αισθητηριακό) και την ψυχική κατάσταση του ατόμου.

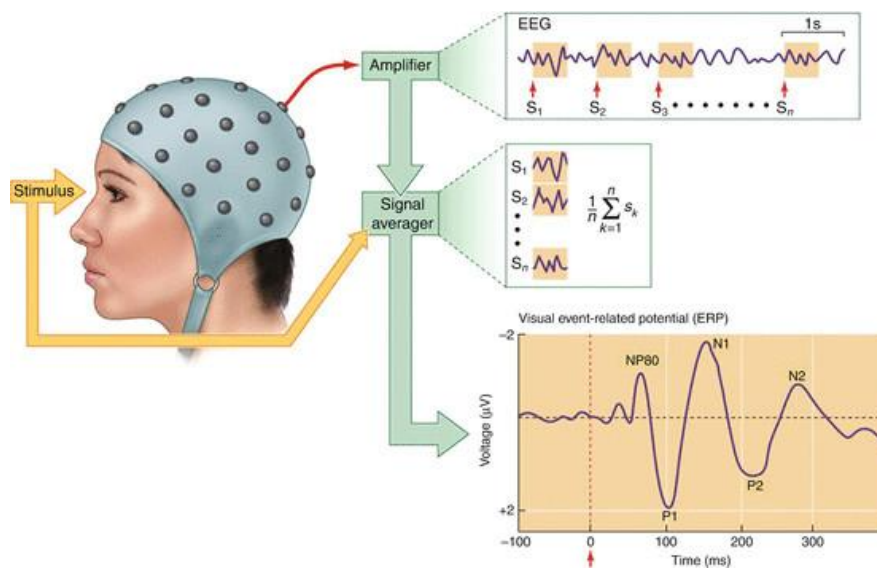
Ένα εξωτερικό ερέθισμα παρουσιάζεται στον συμμετέχοντα (π.χ., ήχος, εικόνα, λέξη, κίνηση κ.λπ.). Ο εγκέφαλος επεξεργάζεται το ερέθισμα και αντιδρά με μια σειρά από ηλεκτρικές αντιδράσεις που καταγράφονται ως δυναμικά (προκλητά δυναμικά). Το ERP αναλύεται για να απομονωθεί η καθαρή εγκεφαλική αντίδραση στο ερέθισμα.

Συγκεκριμένα ο υπολογισμός των προκλητών δυναμικών (ERPs) βασίζεται στη διαδικασία του μέσου όρου για την εξαγωγή της σταθερής εγκεφαλικής απόκρισης στα ερεθίσματα, μειώνοντας τον τυχαίο θόρυβο. Το σήμα αρχικά υπόκειται κάποια προεπεξεργασία για τον καθαρισμό του. Στη συνέχεια ακολουθεί ο κατακερματισμός (segmentation), ή χρονική τμηματοποίησή του (epoching). Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η συνεχής καταγραφή του EEG χωρίζεται σε χρονικά τμήματα, γνωστά ως epochs, που είναι συγχρονισμένα με τα γεγονότα ενδιαφέροντος, συνήθως καλύπτοντας μια περίοδο πριν το ερέθισμα (π.χ., -200 ms) έως μετά το ερέθισμα (π.χ., +800 ms). Στη συνέχεια εφαρμόζεται διόρθωση της βασικής γραμμής (baseline correction), αφαιρώντας τον μέσο όρο του σήματος κατά την προ-ερεθισματική περίοδο από ολόκληρο το epoch, ομαλοποιώντας τα δεδομένα και εξαλείφοντας αργές μεταβολές. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία του κατακερματισμού, όλα τα epochs που αντιστοιχούν στον ίδιο τύπο ερεθίσματος υπολογίζονται ως μέσος όρος, ενισχύοντας τις συνεπείς, συγχρονισμένες με το ερέθισμα εγκεφαλικές αποκρίσεις, ενώ μειώνεται ο τυχαίος θόρυβος που διαφέρει ανάμεσα στις δοκιμές. Αυτή η διαδικασία μέσου όρου παράγει ένα καθαρό δυναμικό ERP, το οποίο αντιπροσωπεύει την τυπική νευρική απόκριση στο ερέθισμα και μπορεί στη συνέχεια να αναλυθεί ως προς το πλάτος, τη

λανθάνουσα περίοδο και την πολικότητά του για τη μελέτη αισθητηριακών, γνωστικών ή κινητικών διαδικασιών. (Εικόνα 13).

Η χρονική ανάλυση του ERP επιτρέπει την καταγραφή των χρονικών χαρακτηριστικών των εγκεφαλικών αντιδράσεων και των συγκεκριμένων χρονικών σημείων που σχετίζονται με τις γνωστικές διεργασίες.

Τα ERPs παρουσιάζουν διάφορα χαρακτηριστικά που καταγράφονται ως αιχμές (peaks) ή κοιλάδες (troughs) στην χρονική κλίμακα (Εικόνα 14). Αυτά τα σημεία σχετίζονται με συγκεκριμένες γνωστικές διαδικασίες και ψυχικές καταστάσεις.

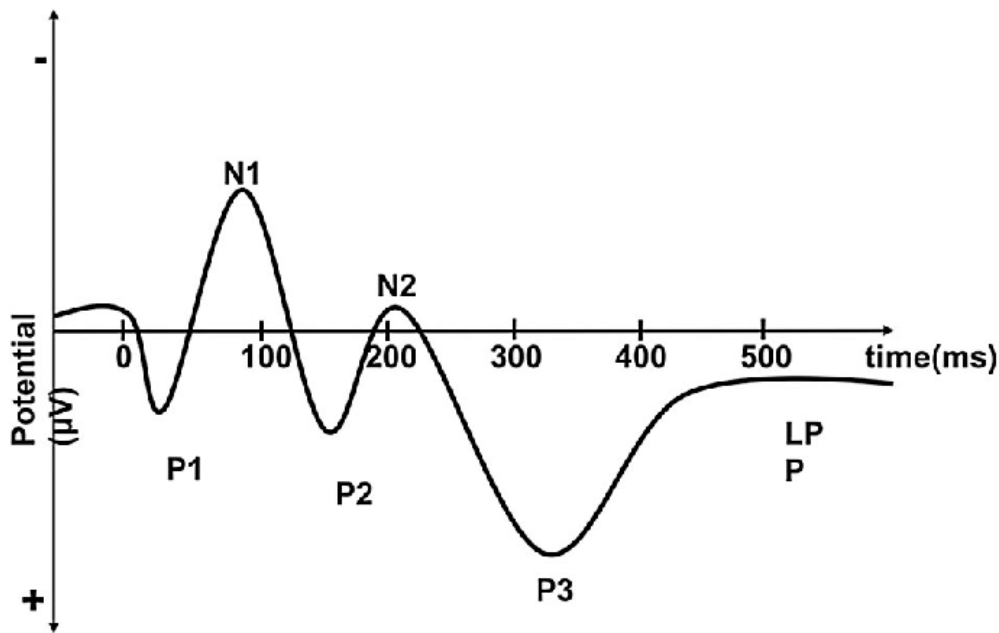


Εικόνα 13: Διαδικασία υπολογισμού ενός προκλητού δυναμικού
<https://cegget-it.nl/Images/erp/averaging.jpg>

Τυπικά προκλητά δυναμικά

P300 (P3): Ένα από τα πιο μελετημένα και αναγνωρίσιμα ERPs, το P300 εμφανίζεται συνήθως 300 – 600 χιλιοστά του δευτερολέπτου μετά το ερέθισμα και συνδέεται με τη γνωστική επεξεργασία και την επιλεκτική προσοχή. Το P300 είναι μια θετική (Positive 300) αιχμή που παρατηρείται όταν οι συμμετέχοντες προσπαθούν και ανιχνεύουν κάποιο σημαντικό ερέθισμα ή κάποιο που σχετίζεται με την εργασία. Αυξημένο πλάτος P300 υποδεικνύει ισχυρή προσοχή σε ένα στόχο.

C1: Η συνιστώσα C1 των προκλητών δυναμικών (ERP) είναι μια πρώιμη οπτική εγκεφαλική απόκριση που εμφανίζεται περίπου 50 έως 90 χιλιοστά του δευτερολέπτου μετά την παρουσίαση ενός οπτικού ερεθίσματος και θεωρείται ότι αντανakλά την ενεργοποίηση του πρωτογενούς οπτικού φλοιού (V1). Πρόκειται για την πρώτη φάση της αισθητηριακής επεξεργασίας που μπορεί να καταγραφεί μέσω EEG και παρουσιάζει τοπογραφική κατανομή στον ινιακό λοβό, κυρίως στις θέσεις Oz και POz. Η πολικότητα της C1 — δηλαδή αν εμφανίζεται ως θετικό ή αρνητικό κύμα — εξαρτάται από τη θέση του ερεθίσματος στο οπτικό πεδίο, με ερεθίσματα στο άνω ή κάτω τεταρτημόριο να προκαλούν αντίθετες αποκρίσεις. Σε αντίθεση με μεταγενέστερες συνιστώσες, η C1 δεν επηρεάζεται από την προσοχή ή από γνωστικούς παράγοντες και αποτελεί έναν δείκτη της πρώτης, αμιγώς αισθητηριακής, επεξεργασίας. Η συνιστώσα C1 (40–90 ms), που προέρχεται από τον πρωτογενή οπτικό φλοιό (V1), ιστορικά θεωρούνταν ανθεκτική στη ρύθμιση από την προσοχή (Anllo-Vento & Hillyard, 1996; Clark & Hillyard, 1996). Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι υπό συγκεκριμένες συνθήκες, όπως υψηλό αντιληπτικό φορτίο ή εργασίες βασισμένες σε χαρακτηριστικά, η προσοχή μπορεί να επηρεάσει την C1 (Kelly et al., 2008; Fu et al., 2009; Prasad et al., 2023). Μια μετα-ανάλυση των Qin et al. (2022) επιβεβαίωσε αυτή τη δυνατότητα, δείχνοντας μέτρια ρύθμιση της C1 από την προσοχή. Αυτό υποδηλώνει ότι η πρώιμη αισθητηριακή επεξεργασία δεν είναι αυστηρά προωθητική, όπως υποστήριζε η παραδοσιακή θεωρία, η οποία θεωρούσε τη ροή της πληροφορίας ως μονοκατευθυντική από τα χαμηλότερα αισθητηριακά κέντρα (όπως ο V1) προς τα ανώτερα γνωστικά κέντρα, χωρίς ανατροφοδότηση ή επιρροή από ανώτερες γνωστικές διεργασίες. Σύγχρονες προσεγγίσεις αναδεικνύουν την ύπαρξη μηχανισμών ανώτερης τάξης (top-down signals), όπως η προσοχή, οι προσδοκίες και η εκμάθηση, οι οποίοι επηρεάζουν ακόμα και τα πρώιμα στάδια επεξεργασίας στον V1. Η θεωρία της προβλεπτικής κωδικοποίησης (predictive coding) προτείνει ότι ο εγκέφαλος δημιουργεί ενεργά προβλέψεις για τα αισθητηριακά ερεθίσματα και στέλνει σήματα ανατροφοδότησης στα πρωτογενή αισθητηριακά κέντρα, προσαρμόζοντας τη νευρωνική δραστηριότητα με βάση τις προσδοκίες. Επιπλέον, οι μηχανισμοί επαναπληροφόρησης (reentrant processing) επιτρέπουν την ανατροφοδότηση πληροφοριών από ανώτερες περιοχές (π.χ., βρεγματικός ή μετωπιαίος φλοιός) προς τον V1, ενισχύοντας την αντίληψη σε σύνθετες ή αβέβαιες σκηνές. Συνολικά, τα ευρήματα αυτά καταρρίπτουν την παραδοσιακή άποψη της καθαρά προωθητικής ροής πληροφορίας, υποστηρίζοντας ότι η πρώιμη αισθητηριακή επεξεργασία είναι δυναμική και αλληλεπιδραστική, ακόμη και στα αρχικά στάδια όπως η C1.



Εικόνα 14: Τυπικά προκλητά δυναμικά

<https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5a96f42d5b409bfd5be103ca/30b36a5b-4fe3-422f-a3b9-5df8d9524aea/erp+event+related+potential.png?format=2500w>

N100 (N1): Το N100 (Negative 100) είναι μια αρνητική αιχμή που εμφανίζεται γύρω από τα πρώτα 100 χιλιοστά του δευτερολέπτου μετά την παρουσίαση ενός ερεθίσματος. Είναι συνήθως αρνητική και σχετίζεται με την αντίληψη ή την αντίδραση σε εξωτερικά ερεθίσματα.

N200 (N2): Είναι μια αρνητική αιχμή που εμφανίζεται περίπου 200 ms μετά από ερέθισμα. Συνδέεται με ανίχνευση συγκρούσεων ή καταστολή μη σχετικών πληροφοριών. Ενισχυμένη δραστηριότητα N200 παρατηρείται σε καθήκοντα που απαιτούν επιλεκτική προσοχή.

P200 (ή P2): Μια θετική αιχμή που εμφανίζεται περίπου στα 200 ms και σχετίζεται με τις πρώτες φάσεις της αντίληψης και επεξεργασίας ενός ερεθίσματος. Η συνιστώσα P200 διαδραματίζει τριπλό ρόλο στην επεξεργασία αισθητηριακών και γνωστικών αποκλίσεων κατά την παρατήρηση ανωμαλιών στην κίνηση αντικειμένων. Πρώτον, συμβάλλει στην ανίχνευση αισθητηριακής ασυνέχειας ή την παραβίαση της αναμενόμενης συμπεριφοράς, ενεργοποιώντας τα οπτικά και μετωπιαία συστήματα (Kourtzi & Shiffrar, 2001). Δεύτερον, το πλάτος της P200 αντανakλά την αξιολόγηση της φυσικής εγκυρότητας της κίνησης - μεταβολής, επιτρέποντας την εκτίμηση της πιθανότητας του φαινομένου μέσω της διαμεσολάβησης περιοχών όπως η V5/MT και ο προκινητικός φλοιός (Höfel et al., 2007). Τέλος, λειτουργεί ως γέφυρα προς υψηλότερες γνωστικές διεργασίες, συνδέοντας την πρώιμη

αισθητηριακή επεξεργασία (N100) με την ύστερη συνειδητή αξιολόγηση (P300), ενισχύοντας την κατανόηση των αποκλίσεων από τα αναμενόμενα πρότυπα (Polich, 2007).

N400: Το N400 είναι μια αρνητική αιχμή που εμφανίζεται περίπου 400 ms μετά την παρουσίαση ενός ασύμβατου ή αναμενόμενου ερεθίσματος. Συνδέεται με τη γνωστική επεξεργασία και την αντίληψη ασυμβατότητας (π.χ., ασυμβατότητα λέξεων ή εικόνας).

P50 και άλλες μικρές αιχμές: Οι μικρότερες αιχμές, όπως το P50, συμβαδίζουν με τις πρώιμες διαδικασίες επεξεργασίας και είναι χρήσιμες για την ανάλυση της αισθητηριακής αντίληψης.

Mismatch Negativity (MMN): Μια αυτόματη απόκριση σε απροσδόκητες αλλαγές ή αλλαγές σε ένα μοτίβο ερεθισμάτων. Σχετίζεται με αυτόματη ανίχνευση αλλαγών στο περιβάλλον, ανεξάρτητα από την εστίαση της προσοχής.

Late Positive Potential (LPP) (Emotional and Motivational Engagement): Εμφανίζεται 300-1000 ms μετά την παρουσίαση του ερεθίσματος, με μέγιστο πλάτος σε κεντρικές και βρεγματικές περιοχές (π.χ., ηλεκτρόδια Cz, Pz), και διατηρείται για εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου ή ακόμη και για δευτερόλεπτα. Το LPP ενισχύεται σημαντικά από ερεθίσματα που επιφέρουν υψηλή συναισθηματική διέγερση (φόβο, ευχαρίστηση), γεγονός που το καθιστά κρίσιμο δείκτη για τη μελέτη της συναισθηματικής επεξεργασίας. Επιπλέον, σχετίζεται με γνωστικές διεργασίες υψηλού επιπέδου, όπως η λήψη αποφάσεων και ο γνωστικός έλεγχος, ενώ παίζει σημαντικό ρόλο στην έρευνα ψυχιατρικών διαταραχών, όπως το άγχος και η κατάθλιψη.

Περιοχές του εγκεφάλου - προκλητά δυναμικά

Οπτικός Φλοιός (Occipital Lobe): Τα C1, P1 και N1 είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα ERPs που καταγράφονται συνήθως στις οπίσθιες περιοχές του εγκεφάλου και σχετίζονται με την αντίληψη εικόνας και την επικέντρωση προσοχής σε οπτικά ερεθίσματα.

Ακουστικός Φλοιός (Auditory Cortex): Το P300 και το N100 σχετίζονται με την αναγνώριση ή την αναμενόμενη αντίδραση σε ήχους. Η αντίδραση του εγκεφάλου σε ακουστικά ερεθίσματα καταγράφεται μέσω χαρακτηριστικών κυμάτων όπως το N100, που σχετίζεται με την προσοχή σε ήχους και τη διάκριση ανάμεσα σε διαφορετικούς ήχους.

Προμετωπιαίος Φλοιός (Prefrontal Cortex): Ο προμετωπιαίος φλοιός σχετίζεται με τον P300 και άλλες θετικές αιχμές που καταγράφονται κατά την παρουσίαση ασυνήθιστων ή

απροσδόκητων ερεθισμάτων. Η εμφάνιση του P300 σχετίζεται με την επεξεργασία του ερεθίσματος και την ανάγκη για προσοχή ή αλλαγή στρατηγικής.

Κροταφικός Λοβός (Temporal Lobe): Το N400 είναι ένα από τα πιο γνωστά ERPs που συνδέεται με την επεξεργασία ασυνήθιστων ή ασύμβατων γλωσσικών ερεθισμάτων (π.χ., ασυνήθιστες λέξεις ή καταστάσεις).

Βρεγματικός Φλοιός (Parietal Cortex): Η περιοχή αυτή σχετίζεται με την καταγραφή του P300, που εμφανίζεται όταν τα άτομα επεξεργάζονται συμπεράσματα ή ασυνήθιστα γεγονότα (π.χ., στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος).

Αμυγδαλή (Amygdala): Η αμυγδαλή είναι σημαντική για τη συναισθηματική επεξεργασία και τη συναισθηματική μνήμη. Αν και η αμυγδαλή δεν καταγράφεται άμεσα σε όλα τα ERPs, οι συναισθηματικές αντιδράσεις σε συναρπαστικά ή τρομακτικά ερεθίσματα μπορούν να ενεργοποιήσουν την αμυγδαλή, και αυτό μπορεί να καταγραφεί μέσω προκλητών δυναμικών. Η αμυγδαλή είναι συνδεδεμένη με τα ERPs που σχετίζονται με την αντίδραση σε απειλητικά ή συναισθηματικά φορτισμένα ερεθίσματα.

Οι περιοχές του εγκεφάλου που σχετίζονται με τα προκλητά δυναμικά (ERPs) εξαρτώνται από την φύση του ερεθίσματος (οπτικό, ακουστικό, συναισθηματικό) και τη γνωστική διαδικασία που εξελίσσεται κατά την παρουσίαση του ερεθίσματος. Ο οπτικός φλοιός επεξεργάζεται οπτικά ερεθίσματα, ο ακουστικός φλοιός ανταποκρίνεται σε ήχους, και ο προμετωπιαίος φλοιός συνδέεται με τη λήψη αποφάσεων και την προσοχή. Περιοχές όπως ο κροταφικός φλοιός και η αμυγδαλή εμπλέκονται στην αναγνώριση συναισθηματικών ή γλωσσικών ερεθισμάτων. Οι προκλητές αιχμές σε διαφορετικά σημεία του εγκεφάλου καθοδηγούν την ανάλυση των γνωστικών διεργασιών και της συναισθηματικής επεξεργασίας.

Τοπολογία – κατανομή στις εγκεφαλικές περιοχές

Για να θεωρηθεί ένα προκλητό δυναμικό (ERP) έγκυρο και ερμηνεύσιμο, δεν αρκεί μόνο η ύπαρξη κατάλληλου πλάτους, χρονικής εμφάνισης (latency) και πολικότητας (θετική ή αρνητική τιμή), αλλά απαιτείται επίσης η αναμενόμενη τοπογραφική κατανομή στην κεφαλή. Η τοπολογία του σήματος — δηλαδή η χωρική του διάταξη ανάμεσα στα ηλεκτρόδια — αποτελεί κρίσιμο δείκτη για την ταυτοποίηση της εγκεφαλικής πηγής του δυναμικού και τη διασφάλιση ότι η καταγραφή προέρχεται πράγματι από τη νευρωνική διαδικασία που διερευνάται. Για παράδειγμα, η συνιστώσα P300 αναμένεται να εμφανίζει μέγιστη θετική τιμή

στα μεσοκεντρικά ηλεκτρόδια (π.χ. Cz, Pz. Η απόκλιση από τις καθιερωμένες τοπολογικές περιοχές ενδέχεται να υποδεικνύει τεχνικά σφάλματα, όπως κακή εφαρμογή ηλεκτροδίων ή παρουσία θορύβου, αλλά και ψευδώς εντοπισμένα δυναμικά. Επομένως, η συνδυαστική αξιολόγηση τόσο της χρονικής όσο και της τοπογραφικής πληροφορίας είναι απαραίτητη για την επιστημονική εγκυρότητα και τη νευροφυσιολογική ερμηνεία ενός ERP σήματος (Luck, 2014).

Η επίδραση του είδους των ηλεκτροδίων

Πολλές μελέτες έχουν επιβεβαιώσει ότι τα ξηρά ηλεκτρόδια, αν και πρακτικά και όλο και πιο διαδεδομένα σε φορητές εφαρμογές EEG, ενδέχεται να οδηγούν σε ελαφρώς μειωμένα πλάτη ERP σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υγρά ηλεκτρόδια. Για παράδειγμα, οι Mathewson et al. (2017) διαπίστωσαν ότι, παρότι τα ERP στοιχεία όπως τα P1 και N1 ανιχνεύονταν καθαρά με ξηρά ηλεκτρόδια, τα πλάτη τους ήταν μέτρια μικρότερα και η σχέση σήματος προς θόρυβο χαμηλότερη. Αυτή η μείωση αποδίδεται στη μεγαλύτερη εμπέδηση και την όχι ιδανική επαφή με το τριχωτό της κεφαλής. Επιπλέον, οι Chi et al. (2010) επεσήμαναν ότι πρώιμες και χαμηλού πλάτους συνιστώσες, όπως η C1, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε μείωση σήματος λόγω των φυσικών χαρακτηριστικών των ξηρών ηλεκτροδίων. Παρ' όλα αυτά, τα χρονικά χαρακτηριστικά παραμένουν συνεπή και τα ξηρά συστήματα θεωρούνται έγκυρα για ανάλυση ERP, υπό την προϋπόθεση επαρκούς μέσου όρου επαναλήψεων.

Η επίδραση της ανατομίας

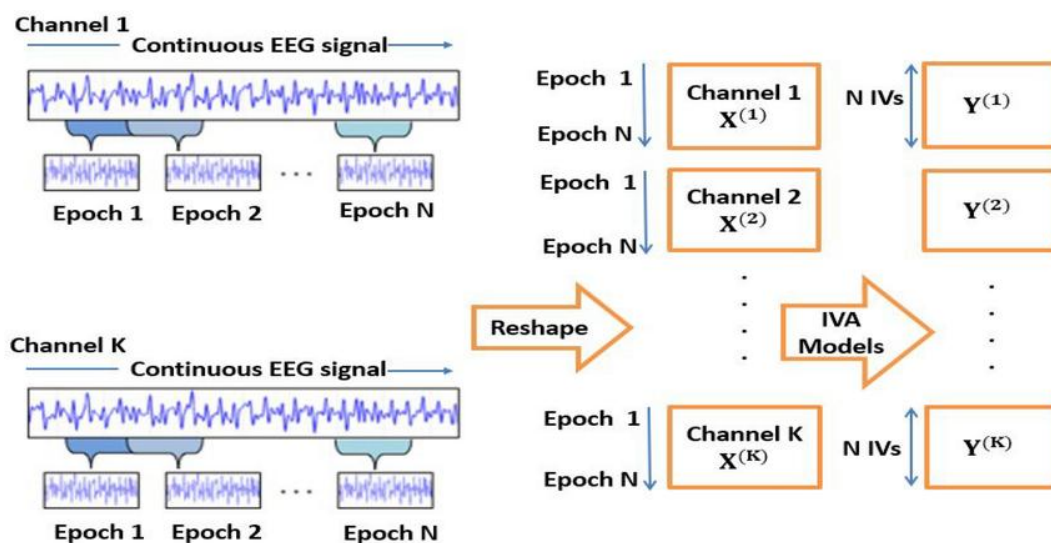
Η πολικότητα ορισμένων προκλητών δυναμικών (ERPs), όπως η συνιστώσα C1, μπορεί να επηρεάζεται σημαντικά από την ανατομία του εγκεφάλου, ιδιαίτερα από τη μορφολογία του ινιακού λοβού και της πρωτογενούς οπτικής περιοχής (V1). Η C1 γενικά εμφανίζεται μεταξύ 50–90 ms μετά την οπτική διέγερση και θεωρείται ότι παράγεται στον φλοιό V1. Ωστόσο, η πολικότητά της (δηλαδή αν θα εμφανιστεί ως θετική ή αρνητική μεταβολή) εξαρτάται από τη θέση του ερεθίσματος στο οπτικό πεδίο και την ακριβή γεωμετρία της επιφάνειας του φλοιού. Για παράδειγμα, ερεθίσματα στο άνω οπτικό πεδίο συχνά παράγουν αρνητική C1, ενώ στο κάτω οπτικό πεδίο προκαλούν θετική. Αυτές οι αντιστροφές σχετίζονται με την καμπυλότητα της ινιακής σχισμής (calcarine sulcus), μέσα στην οποία βρίσκεται ο φλοιός V1, και τη φορά των δυναμικών ρευμάτων. Επιπλέον, ατομικές διαφορές στη φλοιώδη ανατομία μπορούν να οδηγήσουν σε μεταβλητότητα στην εντόπιση, το μέγεθος και την πολικότητα της C1, κάτι που

υπογραμμίζει τη σημασία της ενσωμάτωσης δομικών δεδομένων (π.χ. MRI) για την ακριβέστερη ερμηνεία των ERP καταγραφών (Ales et al., 2010).

Η ανάλυση ενός εγκεφαλογραφήματος (EEG) μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο βασικούς τρόπους, ανάλογα με το ερευνητικό ερώτημα: είτε μέσω της ανάλυσης συνεχών σημάτων είτε μέσω της τμηματοποίησης (epoching) του EEG.

Στην ανάλυση συνεχών σημάτων, το EEG εξετάζεται ως μια ενιαία, αδιάκοπη χρονική ακολουθία. Αυτή η προσέγγιση είναι κατάλληλη για μελέτες που εστιάζουν σε παρατεταμένες καταστάσεις ή συνεχείς γνωστικές διεργασίες, όπως η συγκέντρωση κατά τη διάρκεια ενός μαθήματος ή η μελέτη της συνδεσιμότητας μεταξύ περιοχών του εγκεφάλου. Η φασματική ανάλυση (π.χ. μέσω Fast Fourier Transform ή wavelets) εφαρμόζεται συχνά σε συνεχή σήματα για να εντοπιστούν αλλαγές στη συχνότητα και ισχύ των εγκεφαλικών κυμάτων, όπως οι ζώνες άλφα, βήτα, θήτα, δέλτα και γάμα.

Αντίθετα, η τμηματοποίηση του EEG (epochs) χρησιμοποιείται όταν ενδιαφερόμαστε για την απόκριση του εγκεφάλου σε συγκεκριμένα ερεθίσματα ή γεγονότα, όπως οπτικά ή ακουστικά σήματα (Εικόνα 15). Κάθε epoch είναι ένα μικρό χρονικό παράθυρο γύρω από ένα γεγονός (συνήθως από μερικές εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου πριν έως και μετά την παρουσίασή του), και τα τμήματα αυτά ευθυγραμμίζονται χρονικά με το ερέθισμα. Η μέση απόκριση σε πολλά τέτοια τμήματα οδηγεί στη δημιουργία των προκλητών δυναμικών (ERPs), που αποκαλύπτουν την τυπική χρονική εξέλιξη της νευρωνικής επεξεργασίας. Αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά ευαίσθητη σε χρονομετρημένες γνωστικές διεργασίες, όπως η προσοχή, η αντίληψη και η λήψη αποφάσεων.



Εικόνα 15: Τμηματοποίηση (epoching) του συνεχούς σήματος

Εφαρμογές των προκλητών δυναμικών

Ψυχολογική Έρευνα: Τα ERPs χρησιμοποιούνται ευρέως για να μελετηθεί η γνωστική επεξεργασία και οι αντιδράσεις του εγκεφάλου σε διάφορους τύπους ερεθισμάτων, όπως για παράδειγμα σε πειράματα προσοχής, αντίληψης και μνήμης. Ειδικότερα, μελετάται η χρονική δυναμική της εγκεφαλικής αντίδρασης σε ερεθίσματα.

Κλινικές Εφαρμογές: Τα ERPs χρησιμοποιούνται για τη διάγνωση νευρολογικών διαταραχών και ψυχικών καταστάσεων όπως η διπολική διαταραχή, η σκλήρυνση κατά πλάκας, οι διαταραχές ύπνου και οι αντιδράσεις σε φάρμακα. Χρησιμοποιούνται επίσης για την εκτίμηση της γνωστικής ευχέρειας και προσοχής σε νευροαναπτυξιακές διαταραχές όπως το άνοιγμα του αυτιστικού φάσματος και η διαταραχή ελλειμματικής προσοχής με υπερκινητικότητα (ADHD).

Εφαρμογές στη νευροεπιστήμη: Στη νευροεπιστήμη, τα ERPs χρησιμοποιούνται για να μελετηθούν οι γνωστικές διεργασίες στον εγκέφαλο, όπως η διαχείριση του λόγου, η επικοινωνία και η λήψη αποφάσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Εμβυθιστικά περιβάλλοντα

Εικονικά περιβάλλοντα

Τα εικονικά περιβάλλοντα (Virtual Environments, VEs) είναι προηγμένες τεχνολογικές διεπαφές ανθρώπου-υπολογιστή που παρέχουν στους χρήστες τη δυνατότητα να αλληλεπιδρούν με δημιουργημένους από υπολογιστή κόσμους, οι οποίοι προσομοιώνουν πραγματικές ή φανταστικές καταστάσεις. Τα εικονικά περιβάλλοντα χρησιμοποιούνται σε μια ποικιλία επιστημονικών πεδίων και έχουν εφαρμογές σε πολλές διαφορετικές επιστημονικές και τεχνολογικές περιοχές. Χρησιμοποιούνται στην Ψυχολογία (Lampathaki et. al 2022), στις Νευροεπιστήμες και Νευρολογία (Shin et al. 2015), στην Ιατρική και Αποκατάσταση, στην Εκπαίδευση και Μάθηση (Mikropoulos & Natsis, 2011), στην Αυτοκινητοβιομηχανία και το Στρατό, στην Ανάπτυξη Λογισμικού, στις Ψηφιακές Τέχνες και τον Πολιτισμό.

Μέτρηση Αποτελεσματικότητας των Εικονικών Περιβαλλόντων

Παρά την ποικιλία των χρήσεων, τα VEs δεν διαθέτουν έναν ενιαίο ορισμό αξιολόγησης της αποτελεσματικότητάς τους, καθώς οι απαιτήσεις διαφέρουν ανά εφαρμογή. Η μέτρηση της αποτελεσματικότητας των VEs γίνεται μέσω συγκεκριμένων δεικτών που εξαρτώνται από το πεδίο εφαρμογής.

Σε εκπαιδευτικά VEs, η αποτελεσματικότητα μπορεί να αξιολογηθεί με δείκτες όπως ο ρυθμός ολοκλήρωσης εργασιών (units per time), η συχνότητα λαθών (errors per task) και η ακρίβεια ολοκλήρωσης εργασιών (percentage of correct completions). Τα μέτρα είναι συχνά συγκεκριμένα για μία εφαρμογή και δεν μπορούν να συγκριθούν μεταξύ διαφορετικών VEs (Bailenson et al., 2004). Ελεγχόμενα πειράματα που συγκρίνουν την εκπαίδευση μέσω VE με τις παραδοσιακές μεθόδους μπορούν να παρέχουν ενδείξεις για την αποτελεσματικότητα, αλλά σπάνια διεξάγονται λόγω του χρόνου, του κόστους και της προσπάθειας που απαιτούν. Ωστόσο, πραγματοποιούνται περιστασιακά σε κρίσιμες εφαρμογές, όπως η εκπαίδευση αστροναυτών, πυροσβεστών ή χειρουργών.

Η πρόκληση της ανάπτυξης γενικεύσιμων μέτρων για την αποτελεσματικότητα των VEs παραμένει. Έννοιες όπως η παρουσία βρίσκονται στο επίκεντρο της έρευνας, με στόχο τον εντοπισμό και τη μέτρηση των βασικών παραγόντων που συμβάλλουν στην επιτυχία των VEs, χωρίς να έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά η συμβολή τους, αφού παρουσιάζονται αντικρουόμενα αποτελέσματα, χωρίς να είναι εύκολο να επιβεβαιώσουμε πως η όποια

συμβολή πραγματικά οφείλεται στην παρουσία και όχι σε κάποιο άλλο χαρακτηριστικό του εικονικού περιβάλλοντος. Αυτή η προσπάθεια συνεχίζει να αποτελεί σημαντικό αντικείμενο μελέτης στον τομέα. (Skarbez et. al. 2017).

Η παράλληλη χρήση VR κατά την καταγραφή EEG

Η ταυτόχρονη χρήση συστήματος VR και καταγραφής EEG εισάγει αρκετούς περιορισμούς που πρέπει να αντιμετωπίσουν οι ερευνητές. Οι βασικές προκλήσεις περιλαμβάνουν τεχνικά, φυσιολογικά και περιβαλλοντικά ζητήματα, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων.

Η χρήση VR περιλαμβάνει έντονη οπτική και γνωστική διέγερση, οι κινήσεις του κεφαλιού ή του σώματος μπορούν να δημιουργήσουν σημαντικά τεχνουργήματα (artifacts) στα δεδομένα EEG. Αυτά τα τεχνουργήματα προκύπτουν από κινήσεις των ηλεκτροδίων, τραβήγματα καλωδίων ή μυϊκή δραστηριότητα κατά τη διάρκεια αλληλεπιδράσεων στο VR. Αυτό είναι ιδιαίτερα προβληματικό με τα ξηρά ηλεκτρόδια, τα οποία δεν προσκολλώνται τόσο σταθερά όσο τα υγρά (Gramann et. al., 2010).

Τα συστήματα VR, ειδικά εκείνα με ενεργό εξοπλισμό εντοπισμού, δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία που μπορεί να μολύνουν τις εγγραφές EEG. Οι ασύρματες επικοινωνίες (π.χ. Bluetooth) που χρησιμοποιούνται στο VR μπορούν επίσης να παρεμβαίνουν στα EEG συστήματα.

Ο συνδυασμός του βάρους του VR headset (HMD) και του καπέλου EEG μπορεί να προκαλέσει δυσφορία ή κόπωση, ειδικά σε μεγαλύτερης διάρκειας συνεδρίες, επηρεάζοντας την απόδοση των συμμετεχόντων και την ποιότητα των δεδομένων. Η παρατεταμένη χρήση VR μπορεί να προκαλέσει οπτική κόπωση, ζάλη ή ακόμα και κυβερνοναυτία (cybersickness), τα οποία επηρεάζουν τη συγκέντρωση και τη φυσιολογική εγκεφαλική δραστηριότητα. Αυτή η δυσφορία μπορεί να επηρεάσει τις εγγραφές EEG, δημιουργώντας μη φυσιολογικά μοτίβα εγκεφαλικής δραστηριότητας (Lécuyer et al., 2008).

Η καταγραφή του EEG απαιτεί συχνά εκτεταμένη καλωδίωση, η οποία δυσκολεύει την ταυτόχρονη τοποθέτηση συσκευών HMD. Υπάρχουν ειδικές συσκευές που ενσωματώνουν τις δύο απαιτήσεις ή υπάρχει ανάγκη ειδικής προσαρμογής, ιδιαίτερα όταν απαιτείται ακριβής τοποθέτηση των ηλεκτροδίων EEG (Tauscher et al., 2019).

Η καταγραφή EEG πρέπει να είναι τέλεια συγχρονισμένη με τα γεγονότα στο VR (π.χ. οπτικά ερεθίσματα ή ενέργειες του χρήστη). Ακόμα και μικρές αποκλίσεις μπορεί να αλλοιώσουν την ερμηνεία των προκλητών δυναμικών. Απαιτείται ειδικός εξοπλισμός που συνδυάζει υλικό και λογισμικό που εξασφαλίζει το συγχρονισμό ώστε να μην υποβαθμιστεί η ακεραιότητα των δεδομένων.

Με την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών μέσω βελτιστοποιημένων ρυθμίσεων (π.χ. ελαχιστοποίηση κινήσεων κεφαλιού, χρήση θωρακισμένων καλωδίων και εξασφάλιση συγχρονισμού), οι ερευνητές μπορούν να βελτιώσουν τη δυνατότητα συνδυασμού VR και EEG.

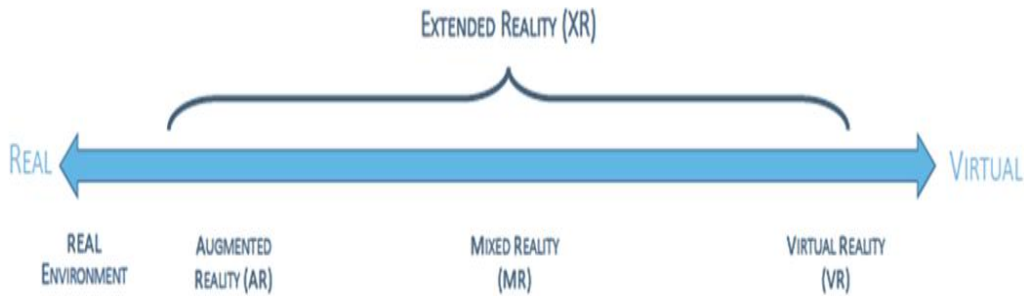
Επαυξημένη πραγματικότητα

Ο όρος Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality – AR) πρωτοεμφανίστηκε το 1992 από τον Thomas Caudell, ερευνητή της Boeing, για να περιγράψει ένα σύστημα που καθοδηγούσε τεχνικούς στη συναρμολόγηση προβάλλοντας ψηφιακές οδηγίες σε οθόνη, ενισχύοντας το φυσικό τους περιβάλλον με ψηφιακή πληροφορία. Σύμφωνα με τον Azuma (1997), η επαυξημένη πραγματικότητα ορίζεται ως ένα σύστημα που συνδυάζει πραγματικό και εικονικό περιεχόμενο, λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο και επιτρέπει διαδραστικότητα σε τρεις διαστάσεις. Η AR δεν αντικαθιστά την πραγματικότητα, αλλά την εμπλουτίζει με επιπρόσθετες πληροφορίες, καθιστώντας δυνατή τη βελτίωση της αντίληψης και κατανόησης του χρήστη για τον κόσμο γύρω του.

Σύμφωνα με το μοντέλο του Milgram και του Kishino (1994), η επαυξημένη πραγματικότητα τοποθετείται στο «Συνεχές Εικονικής-Πραγματικής Πραγματικότητας» (Reality-Virtuality Continuum), το οποίο εκτείνεται από το πλήρως φυσικό περιβάλλον (Real Environment) έως την πλήρως συνθετική εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality). Στο ενδιάμεσο αυτού του φάσματος συναντάται η επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality), όπου το φυσικό περιβάλλον εμπλουτίζεται με ψηφιακά αντικείμενα, και η επαυξημένη εικονικότητα (Augmented Virtuality), όπου κυριαρχούν τα ψηφιακά στοιχεία αλλά ενσωματώνονται και πραγματικά (Εικόνα 16).

Η βασική λειτουργία της AR είναι η δημιουργία λειτουργικών συνδέσμων ανάμεσα στο φυσικό περιβάλλον και τα δεδομένα που παράγονται ή προβάλλονται από υπολογιστικές συσκευές. Αυτά τα δεδομένα μπορεί να είναι αριθμοί, κείμενο, γραφικά, βίντεο ή ήχος και προβάλλονται στον χρήστη με τρόπο που να ενισχύει τη φυσική του εμπειρία σε πραγματικό

χρόνο. Όπως επισημαίνουν οι Arena et al. (2022), η AR προσφέρει νέους τρόπους για να ενισχύσει τη γνωστική επεξεργασία και την αλληλεπίδραση, παρέχοντας δυνατότητες για υποστήριξη της μάθησης, της επίλυσης προβλημάτων και της λήψης αποφάσεων.



Εικόνα 16: Τα τέσσερα περιβάλλοντα του συνεχούς

https://www.mdpi.com/computers/computers-11-00028/article_deploy/html/images/computers-11-00028-g001.png

Προσοχή

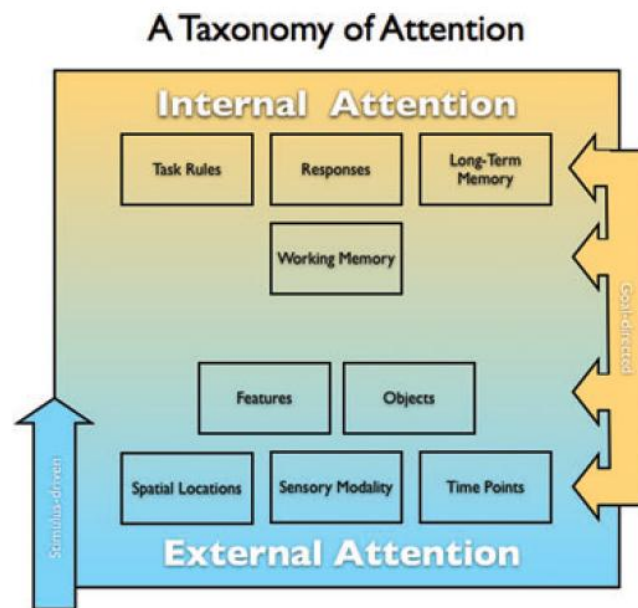
Στην καθημερινότητά μας δεχόμαστε περισσότερα ερεθίσματα από όσα μπορούμε να επεξεργαστούμε ταυτόχρονα. Η προσοχή, μια γενική έννοια με πολλές διαστάσεις, είναι μια θεμελιώδης γνωστική λειτουργία. Οι αισθητηριακές και γνωστικές λειτουργίες μας σχετίζονται με την προσοχή. Οι μηχανισμοί της εξελίχθηκαν λόγω της ανάγκης να εστιάζουμε τις περιορισμένες δυνατότητές μας σε αυτά τα ερεθίσματα που έχουν σχέση με τις ανάγκες και τους στόχους μας και να αγνοούμε τα άσχετα (Pashler et al. 2001).

Στα εμβυθιστικά περιβάλλοντα (immersive environments), η προσοχή διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην αίσθηση της παρουσίας. Η κατανόηση των τύπων προσοχής και η ενσωμάτωσή τους στον σχεδιασμό μπορεί να βελτιώσει την αλληλεπίδραση του χρήστη με αυτό το περιβάλλον και να μεγιστοποιήσει τα οφέλη από τη χρήση του (Souza & Naves 2021, Strauss et al., 2024, Chiossi et al. 2024)..

Μια ταξινομία της σχετίζεται με τον τύπο των πληροφοριών στις οποίες εστιάζεται, διακρίνοντάς την σε εσωτερική και εξωτερική προσοχή (Εικόνα 17). Η εξωτερική προσοχή αναφέρεται στην επιλογή και τροποποίηση της αισθητηριακής πληροφορίας από το εξωτερικό

περιβάλλον. Μπορεί να εστιάσει σε συγκεκριμένα μέρη, χρονικές στιγμές ή εισερχόμενα δεδομένα από τις αισθητηριακές οδούς. Η εξωτερική προσοχή μπορεί να στοχεύσει χαρακτηριστικά, όπως το χρώμα ή το σχήμα, ή πιο σύνθετες αναπαραστάσεις - αντικείμενα. Η εσωτερική προσοχή αφορά την επιλογή, την τροποποίηση και τη διατήρηση της εσωτερικά παραγόμενης πληροφορίας, όπως οι κανόνες εκτέλεσης εργασιών, οι αποκρίσεις, η μακροπρόθεσμη μνήμη ή η μνήμη εργασίας. Εστιάζεται σε νοητικές αναπαραστάσεις αντί για αισθητηριακή είσοδο και είναι κρίσιμη για τη διαχείριση σκέψεων και ενεργειών με βάση τους στόχους. Η μνήμη εργασίας λειτουργεί ως σύνδεσμος μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής προσοχής (Chun et. al. 2011, Kaldas 2022).

Κατηγοριοποιούμε την προσοχή ανάλογα με τον τύπο της πληροφορίας. Υπάρχει διάκριση ανάμεσα στην επιλογή κάποιας πληροφορίας που προέρχεται από τις αισθήσεις και ανάμεσα σε κάποια πληροφορία που ήδη υπάρχει μέσα μας, στη μακροχρόνια ή εργασίας μνήμη μας.



Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση της εξωτερικής και εσωτερικής προσοχής. Chun et al., 2011

Τύποι της προσοχής

Επιλεκτική προσοχή (Selective Attention) ορίζεται η ικανότητα να εστιάζουμε σε ένα ερεθίσμα ή συγκεκριμένη δραστηριότητα αγνοώντας τα άλλα ερεθίσματα.

Εστιασμένη προσοχή (Sustained Attention) ορίζεται η ικανότητα διατήρησης της εστίασης για παρατεταμένο χρονικό διάστημα.

Εναλλασσόμενη προσοχή (Alternating Attention) ορίζεται η ικανότητα μετακίνησης της εστίασης από μία δραστηριότητα σε άλλη. Επιτρέπει στον χρήστη να αντιδρά σε νέα ερεθίσματα ή γεγονότα. Αυξάνει τη διαδραστικότητα και τη ρεαλιστική αίσθηση του κόσμου.

Διαιρεμένη Προσοχή (Divided Attention) ορίζεται η ικανότητα διαχείρισης πολλαπλών ερεθισμάτων ή δραστηριοτήτων ταυτόχρονα.

Αυτόματη Προσοχή (Bottom-Up Attention): Κατευθύνεται από εξωτερικά ερεθίσματα, όπως κινούμενα αντικείμενα ή αλλαγές στο φως. Ενισχύεται από τα οπτικά και ακουστικά ερεθίσματα που προσελκύουν την προσοχή του χρήστη και τον κρατούν «ενεργό».

Σκόπιμη Προσοχή (Top-Down Attention): Κατευθύνεται από εσωτερικούς στόχους και προσδοκίες και βοηθά τον χρήστη να αισθάνεται ότι έχει έλεγχο στο περιβάλλον.

Οι διάφορες εργασίες μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Αυτές που στηρίζονται στην επεξεργασία εξωτερικών ερεθισμάτων (sensory-intake tasks) και σε εργασίες που απαιτούν επεξεργασία ερεθισμάτων που προέρχονται από το εσωτερικό (intake-rejection tasks), π.χ. μνήμη, νοερές πράξεις και αναπαραστάσεις.

Η επεξεργασία αισθητηριακών ερεθισμάτων στον εγκέφαλο πραγματοποιείται μέσω δύο κύριων μηχανισμών, από κάτω προς τα πάνω (bottom-up) ή από πάνω προς τα κάτω (top-down). Αυτές οι διεργασίες συνεργάζονται για την κατανόηση και ερμηνεία των αισθητηριακών πληροφοριών, συνδυάζοντας δεδομένα από το περιβάλλον με προϋπάρχουσες γνώσεις και πεποιθήσεις.

Η bottom-up επεξεργασία ξεκινά από τα αισθητηριακά όργανα και προχωρά προς ανώτερες περιοχές του εγκεφάλου. Είναι βασισμένη στα δεδομένα που λαμβάνονται από το περιβάλλον χωρίς να επηρεάζεται από προηγούμενη γνώση ή προσδοκίες. Τα ερεθίσματα από τα αισθητηριακά όργανα (π.χ., μάτια, αυτιά) μεταδίδονται μέσω των αισθητηριακών οδών σε πρωτογενείς περιοχές του εγκεφάλου, όπως ο πρωτογενής οπτικός φλοιός ή ο πρωτογενής ακουστικός φλοιός. Η bottom-up επεξεργασία είναι απαραίτητη για τη βασική αντίληψη και την αρχική ανάλυση των ερεθισμάτων (Corbetta & Shulman, 2002).

Η top-down επεξεργασία βασίζεται στην προηγούμενη γνώση, εμπειρία, προσδοκίες και στόχους για την ερμηνεία των αισθητηριακών δεδομένων. Περιλαμβάνει την κατεύθυνση της προσοχής και την επιλεκτική ενίσχυση σχετικών πληροφοριών. Η top-down επεξεργασία είναι κρίσιμη για τη διαχείριση της προσοχής και την προσαρμογή της συμπεριφοράς με βάση τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος (Desimone & Duncan, 1995; Corbetta & Shulman, 2002).

Η συνεργασία αυτών των διεργασιών είναι απαραίτητη σε εργασίες που απαιτούν γρήγορη και ακριβή αντίληψη του περιβάλλοντος.

Συνειδητά ή ασυνειδητά οι άνθρωποι εναλλάσσουν την κατεύθυνση της προσοχής προς το εσωτερικό ή το εξωτερικό. Θα ήταν καλό λοιπόν να μπορούμε με κάποιο τρόπο να προσδιορίζουμε την κατεύθυνση αυτή, αφού με αυτό τον τρόπο θα είχαμε τη δυνατότητα να αντιληφθούμε το επίπεδο της παρουσίας κάποιου, καθώς και να προσδιορίζαμε αν είναι απαραίτητη κάποια προειδοποίηση ή τροποποίηση της δραστηριότητας σε εκπαιδευτικά, εργασιακά και άλλα πραγματικά ή εικονικά περιβάλλοντα.

Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την ανίχνευση της προσοχής και της συμμετοχής μέσω σημάτων EEG, ιδιαίτερα σε εικονικά περιβάλλοντα με έντονα επίπεδα διέγερσης (Souza & Naves , 2021; Vite & Hu, Y. ,2023). Αυτά τα σήματα παρέχουν πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα μιας εφαρμογής και το πόσο προσεκτικός είναι ο χρήστης. Ακόμα και όταν δεν υπάρχουν ανταγωνιστικά ερεθίσματα, η διατήρηση της συνεχιζόμενης προσοχής στο εικονικό σύστημα μπορεί να παραμείνει πρόκληση. Επομένως, η διαμόρφωση των νευρολογικών απαντήσεων με βάση την κατάσταση προσοχής είναι μια κρίσιμη περιοχή έρευνας. Αυτό είναι σημαντικό, διότι η κατανόηση αυτών των διακυμάνσεων της προσοχής μπορεί να βοηθήσει στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του εικονικού συστήματος που βασίζεται στο EEG, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για το πώς οι εμπειρίες εμπύθισης επηρεάζουν την συμμετοχή και την προσοχή του χρήστη.

Το EEG χρησιμοποιείται για να μετρήσει πώς η προσοχή αλλάζει καθώς οι χρήστες αλληλεπιδρούν με εικονικά περιβάλλοντα Kosmyna και Maes (2022). Παρακολουθώντας πώς συμβαίνουν αυτές οι αλλαγές σε απάντηση σε εικονικά ερεθίσματα, μπορούμε να αξιολογήσουμε πόσο καλά το σύστημα διατηρεί τον χρήστη εστιασμένο και πώς η εμπύθιση επηρεάζει τα επίπεδα προσοχής του χρήστη (Terkildsen & Makransky, 2019). Αυτό βοηθά στο να κατανοήσουμε αν το εικονικό σύστημα είναι επιτυχημένο στο να διατηρεί την προσοχή ή αν υπάρχουν πτυχές του περιβάλλοντος που χρειάζονται προσαρμογή για να βελτιώσουν την συμμετοχή του χρήστη.

Ένας από τους τρόπους με τους οποίους έχει προταθεί να αποκωδικοποιηθεί η κατεύθυνση της προσοχής είναι τα εγκεφαλογράφημα, αφού οι δύο κατευθύνσεις παρουσιάζουν αρκετές νευροφυσιολογικές διαφορές ώστε να μπορούν να διαχωριστούν (Corbetta & Shulman, 2002).

Η εγκεφαλογραφία χρησιμοποιεί γνωστές ζώνες συχνοτήτων για να μελετήσει τη δραστηριότητα στον εγκέφαλο. Η ζώνη άλφα κυριαρχεί και έχει συσχετιστεί με μια σειρά από γνωστικές και συναισθηματικές λειτουργίες, όπως η προσοχή και η μνήμη (Klimesch, 2012).

Η δραστηριότητα στη ζώνη άλφα μεταβάλλεται διαρκώς και η μεταβολή αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες με κυριότερους το είδος των ερεθισμάτων (εσωτερικά/εξωτερικά), την συμμετοχή ή όχι της μνήμης, αλλά και από τις απαιτήσεις (μεγάλος/μικρός φόρτος) της εκάστοτε εργασίας, με τις περιοχές του εγκεφάλου να ανταποκρίνονται είτε με αύξηση είτε με ελάττωση της ισχύος της άλφα.

Η λειτουργική σημασία των ταλαντώσεων στη ζώνη συχνοτήτων άλφα (8–13 Hz) ποικίλει στη βιβλιογραφία. Ο συγχρονισμός (αύξηση της ισχύος) στη ζώνη συχνοτήτων άλφα θεωρείτο σαν δείκτης της γνωστικής «αδράνειας» του εγκεφαλικού φλοιού (Mann et al. 1996), δηλαδή σε καταστάσεις όπως η ανάπαυση, η χαλάρωση και γενικά όταν δεν επεξεργάζεται ενεργά εξωτερικές πληροφορίες. Αποσυγχρονισμός (μείωση της ισχύος) έχει καταγραφεί σε εργασίες που απαιτούν ενεργή γνωστική επεξεργασία, προσοχή, ανάκτηση μνήμης και επίλυση προβλημάτων (Ray & Cole 1985; Klimesch, 1999; Jensen et al., 2002).

Ο συγχρονισμός της άλφα μπορεί ακόμη να αντανakλά την ενεργοποίηση του default mode network (DMN), ενός δικτύου που σχετίζεται με την ενδοσκόπηση, την ονειροπόληση, την νοητική περιπλάνηση και ενεργοποιείται όταν ο άνθρωπος δεν εστιάζει σε κάποιο εξωτερικό γεγονός (Raichle, 2015).

Η περιπλάνηση του νου (mind-wandering), γνωστή και ως ονειροπόληση, σχετίζεται με σκέψεις άσχετες με το έργο, αναφέρεται σε μια νοητική κατάσταση όπου οι σκέψεις κατευθύνονται εσωτερικά, αντί να εστιάζονται σε εξωτερικά ερεθίσματα ή στις εργασίες που πρέπει να εκτελεστούν. Εκδηλώνεται αυθόρμητα και εκδηλώνεται σαν εσωτερικά βιωμένο φαινόμενο, γεγονός που την καθιστά δύσκολη στη μελέτη (Smallwood & Schooler, 2015). Οι υπάρχουσες έρευνες καταδεικνύουν ισχυρή σύνδεση μεταξύ της περιπλάνησης του νου και της δραστηριότητας των άλφα κυμάτων στον εγκέφαλο (Macdonald et al., 2011; Baldwin et al., 2017; Jin et al., 2019).

Πολλές έρευνες μέσω EEG καταδεικνύουν πως η δραστηριότητα της άλφα σχετίζεται με τη δημιουργικότητα που απαιτούν οι εργασίες, όπου περισσότερη άλφα αντιστοιχεί σε πιο δημιουργικές ιδέες και πρωτοτυπία, (Fink & Benedek, 2013).

Στην συνέχεια, εμπειρικά δεδομένα που σχετίζονταν με απρόσμενη αύξησή της σε συγκεκριμένες καταστάσεις, οδήγησαν σε μια αναθεώρηση του ρόλου της. Προτάθηκε πως ο

συγχρονισμός της άλφα αντανάκλα μια διαδικασία αναστολής (inhibition hypothesis) που ενεργοποιείται από μια λειτουργία ελέγχου καθοδηγούμενη από πάνω προς τα κάτω. Η αναστολή αυτή έχει σαν στόχο να γίνει εστίαση της προσοχής εκεί που χρειάζεται, αναλαμβάνοντας ένα ρόλο ελεγκτή (gating role) για να περιορίσει τις παρεμβολές από περιοχές του εγκεφάλου που δεν σχετίζονται με την τρέχουσα εργασία (π.χ. πρόσβαση στη μακροχρόνια μνήμη (Klimesch, 1999), ή των οπτικές περιοχών (Jensen et al., 2002) ή άλλα ανταγωνιστικά συστήματα επεξεργασίας και να εξοικονομήσει τελικά γνωστικούς πόρους με τη μη επεξεργασία των αντίστοιχων ερεθισμάτων. Η αναστολή αυτή σχετίζεται περισσότερο με εσωτερικά κατευθυνόμενη προσοχή, με καταστάσεις που απαιτούν αυξημένες (εσωτερικές) διανοητικές απαιτήσεις επεξεργασίας και αναπαραστάσεις, όπως οι μαθηματικοί υπολογισμοί και οι νοητικές εικόνες (mental imagery), στις οποίες καταγράφεται αυξημένη ισχύς της άλφα. Σε καταστάσεις που απαιτούν κυρίως επεξεργασία αισθητηριακών πληροφοριών, η διαδικασία ελέγχεται από αυτόματους μηχανισμούς από κάτω προς τα πάνω (bottom-up) και καταγράφεται μικρότερη ισχύς της άλφα.

Υπάρχουν μελέτες που ερευνούν τη σχέση της κατεύθυνσης της προσοχής με χαρακτηριστικά ενός σήματος EEG. Οι Cooper et al. (2003) με δύο πειράματα που πραγματοποίησαν υιοθέτησαν την άποψη πως ο συγχρονισμός άλφα είναι κυρίως δείκτης ενεργής αναστολής της επεξεργασίας εξωτερικών ερεθισμάτων κατά τη διάρκεια εσωτερικών εργασιών προσοχής, αφού στα ευρήματά τους κατέγραψαν πως η ισχύς ενώ θα έπρεπε να μειώνεται, αυξανόταν τόσο κατά τις εργασίες που σχετίζονταν με εξωτερική προσοχή, όσο και κατά τις εργασίες με αυξημένη δυσκολία (φόρτο). Οι Benedek et al. (2014) ανέφεραν διαφορές στο φάσμα ισχύος της άλφα στη δεξιά βρεγματική περιοχή του εγκεφάλου ως δείκτη για τη διάκριση μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής προσοχής. Οι Putze et al. (2016) έδειξαν πως σε ένα περιβάλλον επαυξημένης πραγματικότητας από δεδομένα EEG μπορούν να εξαχθούν δείκτες που επιτρέπουν να διακριθεί η κατεύθυνση της προσοχής και να ταξινομηθεί σαν εσωτερική ή εξωτερική με τεχνικές μηχανικής μάθησης. Οι Braboszcz & Delorme (2011) χρησιμοποίησαν ERP (προκλητικά δυναμικά, MMN) και φασματική ανάλυση των ζωνών συχνοτήτων και εντόπισαν παραμέτρους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες που υποδηλώνουν απεμπλοκή και στροφή της προσοχής στο εσωτερικό (νοητική περιπλάνηση) που ήταν παρόμοιες με παραμέτρους που συσχετίζονται με χαμηλή εγρήγορση.

Η υψηλότερη ισχύς των άλφα κυμάτων παρατηρείται συνήθως κατά τη διάρκεια της ανάπαυσης ή όταν τα άτομα κλείνουν τα μάτια τους, υποδεικνύοντας μειωμένη ανταπόκριση σε οπτικά ή άλλα αισθητηριακά ερεθίσματα (Rushby et al., 2007).

Σε έρευνά τους οι Ray & Cole (1985) διαπίστωσαν ότι η ισχύς των άλφα κυμάτων είναι χαμηλότερη σε εργασίες που βασίζονται στην επεξεργασία εξωτερικών ερεθισμάτων, όπως η καταμέτρηση ρημάτων σε ένα κείμενο ή η εργασία διπλώματος χαρτιού, σε σύγκριση με εργασίες που δεν απαιτούν επεξεργασία εξωτερικών ερεθισμάτων, όπως η νοητική αριθμητική ή η σκέψη μιας φανταστικής βόλτας. Υπέθεσαν ότι η δραστηριότητα των άλφα κυμάτων αντανακλά τις απαιτήσεις προσοχής και είναι υψηλότερη σε εργασίες που επικεντρώνονται στην εσωτερική προσοχή σε σχέση με αυτές που επικεντρώνονται στην εξωτερική προσοχή. Άλλες έρευνες που χρησιμοποιούν εργασίες βραχυπρόθεσμης μνήμης έδειξαν ότι η δραστηριότητα των άλφα κυμάτων αυξάνεται ως συνάρτηση του φορτίου μνήμης.

Η υπερβολική συγχρονισμένη δραστηριότητα των άλφα κυμάτων μπορεί να συνδέεται με υπνηλία, την έναρξη ύπνου ή παθολογικές καταστάσεις και νευρολογικές διαταραχές.

Ο προμετωπιαίος φλοιός (Prefrontal Cortex) στέλνει σήματα από πάνω προς τα κάτω για να ρυθμίσει τη δραστηριότητα των άλφα κυμάτων στις αισθητηριακές και συνειρμικές περιοχές, ανάλογα με τους στόχους της εργασίας και τις γνωστικές προτεραιότητες.

Ο οπίσθιος βρεγματικός φλοιός (Parietal Cortex), που εμπλέκεται στη χωρική προσοχή και την πολυαισθητηριακή ολοκλήρωση, διαδραματίζει βασικό ρόλο στη κατεύθυνση της δραστηριότητας των άλφα κυμάτων σε συγκεκριμένες αισθητηριακές οδούς.

Οι ταλαντώσεις των άλφα κυμάτων ρυθμίζονται επίσης μέσω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του φλοιού και του θαλάμου, ο οποίος λειτουργεί ως κέντρο μεταγωγής αισθητηριακών πληροφοριών.

Η καταστολή του άλφα και η ενίσχυση του βήτα και του γάμα ρυθμού σε VE σχετίζεται με αυξημένη προσοχή και αίσθηση παρουσίας (Magosso et al., 2019, Kumar et al., 20121, Hagedorn et al., 2023).

Η ζώνη θήτα στη δραστηριότητα του εγκεφαλογραφήματος σχετίζεται στενά με τις διεργασίες της εργαζόμενης μνήμης. Αύξηση της ισχύος των κυμάτων θήτα, ιδιαίτερα στις μετωπιαίες-μεσαίες περιοχές του εγκεφάλου, παρατηρείται συχνά κατά την εκτέλεση εργασιών που απαιτούν ενεργή διατήρηση και επεξεργασία πληροφοριών, υποδεικνύοντας τον ρόλο τους στον γνωστικό έλεγχο και την ενσωμάτωση πληροφοριών. Οι ταλαντώσεις θήτα θεωρείται ότι διευκολύνουν την επικοινωνία μεταξύ του προμετωπιαίου φλοιού και άλλων περιοχών όπως ο ιππόκαμπος, υποστηρίζοντας την προσωρινή αποθήκευση και τον συντονισμό του περιεχομένου της μνήμης. Αυτή η ρυθμική δραστηριότητα φαίνεται να υποστηρίζει την κωδικοποίηση, διατήρηση και ανάκτηση πληροφοριών στην εργαζόμενη μνήμη, καθιστώντας

τα κύματα θήτα βασικό νευρωνικό δείκτη εκτελεστικών λειτουργιών (Klimesch 1999, Tan et al., 2024, Geva et al., 2025).

Εμβύθιση (immersion)

Η εμβύθιση αποτελεί θεμελιώδη έννοια στα διαμεσολαβούμενα περιβάλλοντα. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις στον ορισμό της έχουν οδηγήσει σε ασάφεια και συχνά χρησιμοποιείται ακόμη και ως συνώνυμο της παρουσίας, κάτι που εντείνει τη σύγχυση (π.χ., Lombard, 1997). Ο Slater θεωρεί πως είναι ένα αντικειμενικό και μετρήσιμο χαρακτηριστικό του μεσολαβούμενου περιβάλλοντος και σχετίζεται με τις τεχνολογικές του δυνατότητες (π.χ. ανάλυση εικόνας, χρόνος απόκρισης), με τις ενέργειες που μπορεί να προσφέρει και είναι επιτρεπτές μέσα σε αυτό. Ένα σύστημα που παρέχει μεγάλη εμβύθιση είναι εκείνο που παρέχει ρεαλιστική και λεπτομερή αναπαράσταση της πραγματικότητας, αξιοποιώντας περισσότερες αισθητηριακές οδούς και με μεγαλύτερη πιστότητα (Slater, 1999). Σε άλλο μήκος κύματος κινούμενοι οι Witmer και Singer ορίζουν την εμβύθιση ως «μια ψυχολογική κατάσταση που χαρακτηρίζεται από την αίσθηση που έχει κάποιος όταν περικλείεται, συμπεριλαμβάνεται και αλληλεπιδρά με ένα περιβάλλον που του παρέχει μια συνεχή ροή ερεθισμάτων και εμπειριών» (Witmer & Singer, 1998). Η εμβύθιση θεωρείται η βάση που ενεργοποιεί την ψυχολογική εμφάνιση της παρουσίας και «προσδιορίζει τα όρια εντός των οποίων μπορεί να συμβεί», χωρίς να την εξασφαλίζει, καθώς η παρουσία εξαρτάται από την αντίδραση του χρήστη στο σύστημα (Slater, 2009).

Συμμετοχή (involvement)

Ένας αποδεκτός ορισμός της συμμετοχής είναι αυτός των Witmer and Singer. Αυτοί όρισαν την συμμετοχή ως την «ψυχολογική κατάσταση που βιώνεται σαν συνέπεια της συγκέντρωσης από κάποιον της ενέργειας και της προσοχής του σε ένα σύνολο ερεθισμάτων ή δραστηριοτήτων που έχει συνέπεια και νόημα». Η συμμετοχή αντικατοπτρίζει το βαθμό συναισθηματικής και γνωστικής συμμετοχής που βιώνει ο χρήστης στο διαμεσολαβημένο περιβάλλον, φτάνοντας σε επίπεδα (κατάσταση ροής) όπου οι πράξεις και οι σκέψεις του χρήστη είναι πλήρως ενσωματωμένες με το διαμεσολαβημένο περιβάλλον.

Η συμμετοχή αφορά λοιπόν τη διάθεση της προσοχής (attention allocation) και συγκεκριμένα το βαθμό στον οποίο η προσοχή του χρήστη είναι εστιασμένη περισσότερο στο

διαμεσολαβημένο περιβάλλον παρά στους περισπασμούς του πραγματικού κόσμου, οδηγώντας συχνά σε αίσθηση βύθισης, απορρόφησης στην εμπειρία.

Η συμμετοχή αφορά και το συναίσθημα, το πόσο επενδύει ή ταυτίζεται ο χρήστης με τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος εμπύθισης ή τη θεματολογία της εργασίας, κατά πόσο αυτά δημιουργούν συναισθηματικά φορτισμένες αλληλεπιδράσεις ή ερεθίσματα που έχουν ιδιαίτερο νόημα ή σχετίζονται με προηγούμενες εμπειρίες του.

Παρουσία (presence)

Η έννοια της παρουσίας, η οποία ορίζεται πιο συχνά ως η αίσθηση του «να βρίσκεσαι εκεί», έχει καθοδηγήσει την έρευνα και την ανάπτυξη εικονικών περιβαλλόντων (VEs) για δεκαετίες. Παρ' όλα αυτά, δεν υπάρχει ευρεία συμφωνία σχετικά με το πώς να οριστεί ή να επιχειρηθεί η λειτουργική αξιοποίηση αυτής της έννοιας. Η βιβλιογραφία περιλαμβάνει πολλούς διαφορετικούς ορισμούς της παρουσίας και αρκετές προτεινόμενες μεθόδους μέτρησής της.

Η έννοια της παρουσίας δεν έχει συγκεκριμένη και μοναδική προέλευση, καθώς εμφανίστηκε σε διάφορα πεδία και εξελίχθηκε με την πάροδο του χρόνου. Ο Marvin Minsky (1980) σηματοδότησε την αρχή της εξερεύνησης της παρουσίας σε διαμεσολαβούμενα περιβάλλοντα, όταν επινόησε τον όρο τηλεπαρουσία στο πλαίσιο των τηλεκατευθυνόμενων συστημάτων και της ρομποτικής. Ορίζοντας αυτή ως την αίσθηση σαν να είναι κάποιος φυσικά παρών σε μια απομακρυσμένη τοποθεσία μέσω της τεχνολογίας.

Στη δεκαετία του 1990, με την εξέλιξη των τεχνολογιών εικονικής πραγματικότητας (VR), η παρουσία έγινε κεντρικό σημείο εστίασης για τους ερευνητές που μελετούσαν την αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή. Ο Sheridan (1992) επέκτεινε τις ιδέες του Minsky προτείνοντας την έννοια της παρουσίας που δεν ήταν τίποτα άλλο παρά η εφαρμογή της τηλεπαρουσίας σε ένα εικονικό περιβάλλον αντί σε ένα φυσικό και απομακρυσμένο περιβάλλον. Χρησιμοποιώντας τον όρο εικονική παρουσία (virtual presence) περιέγραψε την έννοια σαν η αίσθηση να είναι κάποιος παρών σε ένα περιβάλλον που δημιουργείται από υπολογιστή.

Η παρουσία ορίζεται ως μια ψυχολογική κατάσταση κατά την οποία το άτομο αισθάνεται «παρόν» σε ένα εικονικό περιβάλλον (VE). Περιλαμβάνει μια *υποκειμενική* αξιολόγηση, όπου το άτομο αισθάνεται ότι το VE είναι πραγματικό και *αντικειμενικά* παρατηρούμενες συμπεριφορές τις οποίες εκδηλώνει το άτομο μέσα στο εικονικό περιβάλλον και που μοιάζουν

με αυτές που θα εκδήλωνε στον πραγματικό κόσμο σε ανάλογες περιστάσεις (Slater & Wilbur 1997).

Οι Lombard & Ditton (1997) κάνοντας μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας προσδιόρισαν έξι διαφορετικές διαστάσεις της παρουσίας και προσπάθησαν να δώσουν έναν γενικό ορισμό αυτής. Την προσδιόρισαν σαν την «αντιληπτική ψευδαίσθηση της μη μεσολάβησης» που συμβαίνει «όταν ένα άτομο αποτυγχάνει να αντιληφθεί ή να αναγνωρίσει την ύπαρξη ενός μέσου στο περιβάλλον δράσης του και ανταποκρίνεται σαν το μέσο να μην ήταν εκεί »

Η διεθνής οργάνωση για την έρευνα της παρουσίας (International Society for Presence Research) το 2000 μετά από μακρές συζητήσεις όρισε την παρουσία ως μια ψυχολογική κατάσταση ή υποκειμενική αντίληψη κατά την οποία αν και μέρος ή ολόκληρη η εμπειρία ενός ατόμου δημιουργείται ή φιλτράρεται μέσα από μια τεχνολογία το άτομο δεν μπορεί να αναγνωρίσει το ρόλο της τεχνολογίας σε αυτή την εμπειρία.

Η παρουσία περιγράφεται και ως ένα αποτέλεσμα της κατασκευής και αλληλεπίδρασης ενός ειδικού τύπου νοητικού μοντέλου του εικονικού κόσμου από μέρους του χρήστη (Schubert et al., 2001). Η ενεργητική συμμετοχή στη δραστηριότητα δεν ισοδυναμεί με παρουσία, αφού κάποιος μπορεί να είναι συγκεντρωμένος και να αποδίδει καλά στη δραστηριότητα, χωρίς να ενδιαφέρεται για τη θέση του μέσα στον κόσμο αυτό. Η παρουσία βιώνεται μόνο όταν οι ο χρήστης δεν έχει απλά την αίσθηση πως είναι εκεί, αλλά και πως οι ενέργειές του πραγματοποιούνται μέσα είναι στο εικονικό περιβάλλον, με το οποίο και αλληλεπιδρά. Χρησιμοποιώντας στοιχεία από πολλά διαφορετικά ερωτηματολόγια μέτρησης της παρουσίας (Schubert et al., 2001) η παραγοντική ανάλυση της έννοιας της παρουσίας ανέδειξε τρεις κύριους παράγοντες, τη χωρική παρουσία, την συμμετοχή και τον ρεαλισμό, επιβεβαιώνοντας πως η παρουσία είναι μια πολυδιάστατη έννοια.

Οι Lombard & Jones (2015) πρότειναν ένα πλαίσιο προκειμένου να κατηγοριοποιηθούν οι πολλοί ορισμοί της παρουσίας από τα πολλά γνωστικά πεδία και επιστήμες που τη μελετούν. Το πρώτο επίπεδο κατηγοριοποίησης σχετίζεται με το αν εμπλέκεται η τεχνολογία ή όχι. Το δεύτερο επίπεδο αφορά το κατά πόσο το φαινόμενο που ορίζεται είναι μια αντικειμενική ιδιότητα του τρόπου επικοινωνίας, της τεχνολογίας, του ατόμου ή μια υποκειμενική ιδιότητα του ατόμου. Το τρίτο επίπεδο του πλαισίου εξετάζει την "πηγή των ερεθισμάτων" ως κρίσιμη πτυχή της παρουσίας, ορίζοντάς τη ως "υποκειμενική ιδιότητα ενός ατόμου". Οι προσεγγίσεις σχετικά με την πηγή των ερεθισμάτων ποικίλλουν αφού αυτά μπορεί να είναι αποκλειστικά εξωτερικά ή εσωτερικά και εξωτερικά. Στην αρχή υπήρχε η πεποίθηση ότι η αίσθηση της

παρουσίας ενός ατόμου εναλλάσσεται μεταξύ δύο καταστάσεων. Είτε κάποιος ένιωθε παρών μέσα στο φυσικό περιβάλλον είτε στο εικονικό περιβάλλον. Ο Biocca πρόσθεσε έναν τρίτο πόλο του νοητικού φανταστικού χώρου. Το επιχείρημα του ήταν πώς οι διανοητικές φανταστικές διαδικασίες μπορούσαν να παράγουν χωρικά μοντέλα ανάλογα με αυτά που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν οι αισθήσεις. Υποθέτοντας πως η αίσθηση της παρουσίας καθορίζεται από κάποιο νοητικό μοντέλο του χώρου τότε η παρουσία μπορεί σταδιακά να εναλλάσσεται μεταξύ του φυσικού και του εικονικού κόσμου καθώς και του νοητικού φανταστικού χώρου ανάλογα με το ποιος από τους τρεις παράγοντες παρέχει στο νοητικό μοντέλο χωρικές ενδείξεις. Αυτό το πλαίσιο υπογραμμίζει τη υποκειμενική φύση της παρουσίας, η οποία διαμορφώνεται από τον τρόπο με τον οποίο τα ερεθίσματα—είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά, είτε συνδυασμός αυτών—αντιλαμβάνονται και επεξεργάζονται. Στο τέταρτο επίπεδο του πλαισίου εξετάζεται κατά πόσο γίνεται αντιληπτός με ακρίβεια ο ρόλος της τεχνολογίας. Στην περίπτωση της παρουσίας σε εικονική πραγματικότητα (VR), οι χρήστες έχουν ανακριβή αντίληψη της τεχνολογίας. Αντιλαμβάνονται ότι η τεχνολογία δεν εμπλέκεται στην εμπειρία, παρόλο που στην πραγματικότητα εμπλέκεται. Υπάρχει μια "αντιληπτική ψευδαίσθηση της μη-μεσολάβησης," υποδηλώνοντας ότι ένας χρήστης βιώνει παρουσία όταν αποτυγχάνει να αντιληφθεί ή να αναγνωρίσει ότι το περιβάλλον του παρουσιάζεται μέσω κάποιου τύπου μέσου, όπως τηλεόραση ή συσκευές HMD (Lombard & Ditton, 1997).

Οι διαστάσεις της παρουσίας

Οι διαστάσεις της παρουσίας σύμφωνα με τους Wirth et al. (2007) παρέχουν μια δομημένη προσέγγιση για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι χρήστες βιώνουν την παρουσία σε διαμεσολαβημένα περιβάλλοντα. Αυτές οι διαστάσεις επισημαίνουν τους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους οι χρήστες αντιλαμβάνονται την παρουσία και τη σύνδεσή τους με το εικονικό περιβάλλον. Κάθε διάσταση συμβάλλει στην συνολική αίσθηση παρουσίας, και αυτές οι διαστάσεις αλληλεπιδρούν συχνά για να ενισχύσουν ή να αποδυναμώσουν την αίσθηση παρουσίας, ανάλογα με το πλαίσιο και το σχεδιασμό του διαμεσολαβημένου περιβάλλοντος.

Χωρική Παρουσία (Spatial Presence)

Η χωρική παρουσία αναφέρεται στην αίσθηση του χρήστη ότι «είναι εκεί», ότι βρίσκεται φυσικά μέσα στο διαμεσολαβημένο περιβάλλον, ακόμη κι αν έχει επίγνωση ότι η εμπειρία συμβαίνει μέσω ενός μέσου (π.χ., κράνος VR, οθόνη υπολογιστή). Ο χρήστης δεν αντιλαμβάνεται απλά το εικονικό περιβάλλον σαν να είναι πραγματικό, αλλά τοποθετεί τον εαυτό του μέσα σε αυτό και αλληλεπιδρά με τα αντικείμενα, θεωρώντας πως επηρεάζει τα πράγματα σε αυτό. Ο χρήστης χτίζει ένα νοητικό μοντέλο του περιβάλλοντος, βασισμένο σε αισθητηριακά ερεθίσματα και προηγούμενη γνώση. Ο Wirth και οι συνεργάτες του πρότειναν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για τον τρόπο που κάποιος οδηγείται στο να νιώσει παρών σε ένα μεσολαβούμενο περιβάλλον. Η διαδικασία που οδηγεί στην αίσθηση της χωρικής παρουσίας (spatial presence) περιλαμβάνει μια σειρά από βήματα.

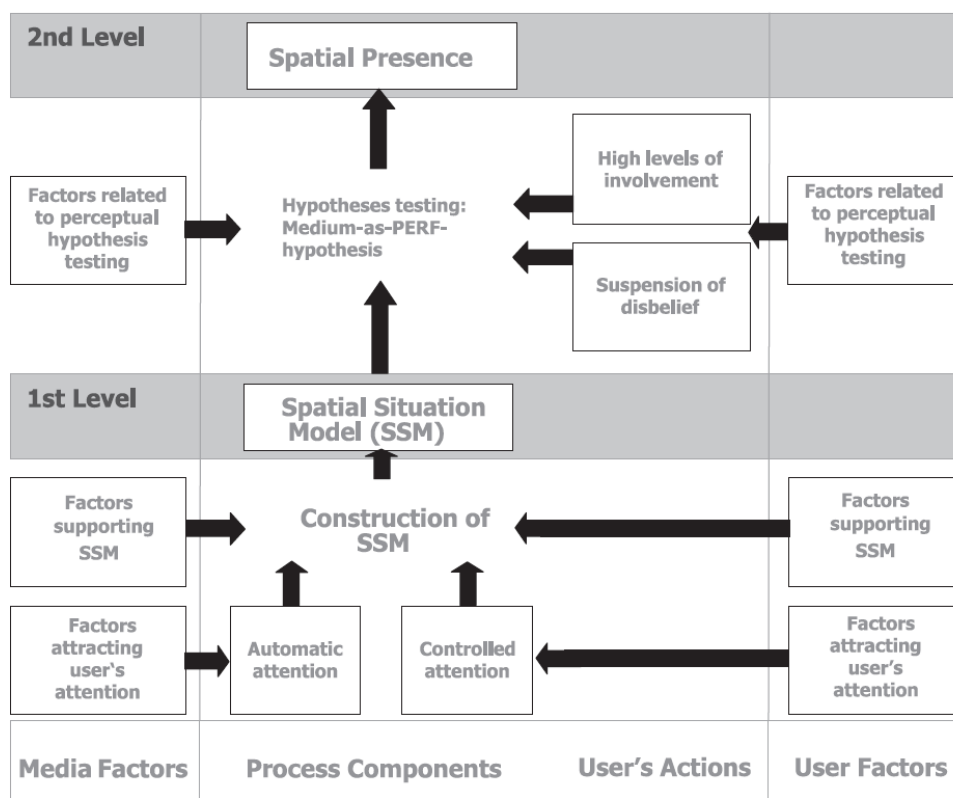
Αρχικά είναι κρίσιμο η προσοχή των χρηστών να απομακρυνθεί από το φυσικό περιβάλλον και να στραφεί στο μεσολαβούμενο περιβάλλον (mediated environment). Η εστίαση σε αυτό μπορεί να γίνει τόσο ακούσια (involuntary attention) και οφείλεται στα πλούσια αισθητηριακά ερεθίσματα που λαμβάνονται, όσο και εκούσια - ελεγχόμενα (controlled attention) λόγω του ενδιαφέροντος και των κινήτρων που προκαλεί το προσφερόμενο περιεχόμενο (Hidi, 1995). Η ροή των ερεθισμάτων θα πρέπει να είναι οπωσδήποτε συνεχής, αυτή χωρίς να είναι υπερβολικά σύνθετη, αφού τότε υπάρχει κίνδυνος κορεσμού των αισθήσεων και αίσθημα κούρασης με αντίθετα αποτελέσματα (de Rijk et al., 1999). Στη συνέχεια κατασκευάζεται από τους χρήστες ένα νοητικό μοντέλο του μεσολαβούμενου περιβάλλοντος (Spatial Situation Model - SSM), διαδικασία που ξεκινά με την οργάνωση των χωρικών ενδείξεων (cues) και δεδομένων που παρέχονται από το μέσο και επεξεργάζεται ο ίδιος και συνεχίζεται με τη συμπλήρωση των όποιων κενών στην οικοδόμηση να συμπληρώνονται με βάση τις προσωπικές του χωρικές αναμνήσεις – γνώσεις, πεποιθήσεις και εμπειρίες. Οι προσωπικές διαφορές και ικανότητες μπορεί να οδηγήσουν τελικά να κατασκευαστούν από διαφορετικά άτομα, διαφορετικά νοητικά μοντέλα του ίδιου χώρου. Σε κάθε περίπτωση καταλήγουμε με μια ερμηνεία και ενσωμάτωση όλων αυτών σε μία (εσωτερικά) συνεπή, πλούσια και ελκυστική αναπαράστασή του (Εικόνα 18).

Ύστερα ο χρήστης πρέπει υποκειμενικά να τοποθετήσει τη φυσική του παρουσία μέσα στο μεσολαβούμενο ή στο πραγματικό περιβάλλον. Το κύριο εγωκεντρικό πλαίσιο αναφοράς (Primary Ego Reference Frame - PERF) καθορίζει την αντιλαμβανόμενη θέση και τις δυνατότητες δράσης ενός ατόμου μέσα σε έναν χώρο. Με βάση το πόσο λογικά, πειστικά και αληθοφανή είναι τα στοιχεία του εικονικού περιβάλλοντος τόσο στα εξωτερικά

χαρακτηριστικά του όσο και στον τρόπο αλληλεπίδρασης και συσχέτισης με αυτό (Perceptual Hypothesis Testing), ο χρήστης αν καταστείλει και τη δυσπιστία του σε ότι αφορά την ύπαρξη ή όχι του εικονικού περιβάλλοντος είναι πιθανό να καταλήξει και να αποδεχτεί το εικονικό περιβάλλον σαν PERF.

Το νοητικό μοντέλο που κατασκευάζεται δεν είναι στατικό, αλλά συνεχώς ενημερώνεται και επικαιροποιείται. Για το λόγο αυτό είναι πάντα κρίσιμο αν παρουσιαστούν αστοχίες από πλευράς λογισμικού, ή ασυνέπειες στον τρόπο λειτουργίας και αλληλεπίδρασης, να καταρρεύσει και να γίνει άμεσα επιστροφή στο πραγματικό περιβάλλον.

Όταν το μεσολαβούμενο περιβάλλον γίνεται αποδεκτό σαν το προσωπικό σύστημα αναφοράς, οι χρήστες βιώνουν τη χωρική παρουσία, αντιλαμβανόμενοι τον εαυτό τους τοποθετημένους εντός του εικονικού χώρου έχοντας τη δυνατότητα να αλληλοεπιδρούν με τα αντικείμενα μέσα σε αυτόν και να το επηρεάζουν.



Εικόνα 18: Το μοντέλο της χωρικής παρουσίας του Wirth et al., 2007

Ρεαλισμός

Αφορά την κρίση του χρήστη για την αυθεντικότητα ή τον ρεαλισμό του VE. Η αξιολόγηση γίνεται σε σύγκριση με την εικόνα του πραγματικού κόσμου, εκτιμώντας πόσο ρεαλιστικό φαίνεται το μεσολαβούμενο περιβάλλον σε σχέση με αυτό. Το περιεχόμενο καθορίζει το βαθμό κατά τον οποίο απαιτείται αυξημένος ή όχι ρεαλισμός (π.χ εξομοιωτής πτήσεων, χειρουργική).

Αν ορίσουμε την πιστότητα σαν «το βαθμό κατά τον οποίο το εικονικό περιβάλλον προσομοιώνει τον πραγματικό κόσμο» (Alexander et al., 2005), ο ρεαλισμός καθορίζεται από την πιστότητα (sensory fidelity) των αισθητηριακών ερεθισμάτων (οπτικών, ακουστικών, απτικών) που καθιστά το περιβάλλον να φαίνεται ζωντανό, αληθοφανές. Σημαντική πάντως σε κάθε περίπτωση είναι η λογική συνοχή του περιβάλλοντος, καθιστώντας το να φαίνεται σαν ένας τόπος που είναι πιθανό να υπάρχει ή ακόμη και να αντιστοιχεί σε ένα φανταστικό κόσμο, αλλά όπου τα γεγονότα συμβαίνουν κάτω από ένα σύνολο κανόνων, διασφαλίζοντας ότι οι αλληλεπιδράσεις είναι συνεπείς και ουσιαστικές άσχετα με το αν αυτές μπορούν να υπάρχουν στην πραγματικότητα ή όχι.

Αυτοπαρουσία (Self-Presence)

Είναι η αντίληψη του εαυτού (Self-Presence) για το σώμα του (ή του avatar) και την αλληλεπίδρασή του με το εικονικό χώρο. Η δυνατότητα να έχει συνείδηση της ταυτότητάς του και των πράξεών του μέσα στο εικονικό περιβάλλον. Η δυνατότητα του χρήστη να βιώσει και να εκφράσει συναισθήματα εντός του εικονικού περιβάλλοντος.

Κοινωνική Παρουσία (Social Presence)

Ένα εικονικό περιβάλλον μπορεί να περιέχει και άλλους χαρακτήρες που μπορούν να ελέγχονται είτε από τον υπολογιστή είτε από άλλους ανθρώπους με τους οποίους μπορεί να υπάρχει ή όχι κάποια αλληλεπίδραση. Η κοινωνική παρουσία αναφέρεται στην αίσθηση ότι κάποιος βρίσκεται μαζί με άλλους χρήστες στο διαμεσολαβημένο περιβάλλον και μπορεί να συνοδεύεται είτε με άμεση αλληλεπίδραση (π.χ., συνομιλία ή χειρονομίες με avatars) είτε με απλή παρατήρηση άλλων avatars χωρίς να απαιτείται να μεταφερθούν σε κάποιο μέρος. Ακόμη είναι δυνατή η λήψη και η ερμηνεία κοινωνικών σημάτων, όπως η γλώσσα του σώματος, ο τόνος της φωνής και η οπτική επαφή, εντός του εικονικού χώρου. Εστιάζει περισσότερο στην ποιότητα και το βάθος των διαπροσωπικών σχέσεων.

Συμπαρουσία (Copresence)

Αναφέρεται στην αίσθηση «είμαστε μαζί» με κάποιο άλλο άτομο, έχουμε επίγνωση και κάποιου άλλου και μοιραζόμαστε τον χώρο, χωρίς απαραίτητα να αλληλοεπιδρούμε. Αφορά τόσο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συστήματος που επιτρέπουν την επίγνωση του άλλου την αλληλεπίδραση με τον άλλο, όσο και την υποκειμενική αίσθηση του είμαστε μαζί.

Η ψυχολογική θεώρηση της παρουσίας

Ο Slater δεν θεωρεί την παρουσία σαν μια υποκειμενική κατάσταση ή ένα αίσθημα που εμπεριέχει την έννοια «του να είσαι εκεί» και που μπορεί να την προσεγγίσει και να τη μετρήσει κάποιος με ερωτηματολόγια. Τη ορίζει σαν το βαθμό στον οποίο τα άτομα ανταποκρίνονται σε εικονικά παραγόμενα αισθητηριακά δεδομένα σαν να ήταν αληθινά. Προτείνει μετρήσεις μέσω σύγκρισης αντιδράσεων σε πραγματικά και εικονικά περιβάλλοντα, αλλά και τη μελέτη φυσιολογικών και συμπεριφορικών δεδομένων. Αυτή η εννοιολόγηση δίνει έμφαση στην δυνατότητα του χρήστη να αλληλοεπιδράσει με το περιβάλλον να χρησιμοποιήσει ακόμη και το σώμα του όπου η αλληλεπίδραση το επιτρέπει και να αντιδράσει σε αυτό με τρόπους που σχετίζονται με το πως θα αντιδρούσε σε αντίστοιχες πραγματικές καταστάσεις. Η παρουσία για αυτόν περιλαμβάνει πολυεπίπεδες αντιδράσεις, που ποικίλουν μεταξύ ασυνείδητων φυσιολογικών αντιδράσεων (αλλαγές στον καρδιακό ρυθμό και τη δερματική αγωγιμότητα), αυτόματων συμπεριφορών – αντανακλαστικών και συνειδητών γνωστικών και συναισθηματικών αντιδράσεων (αποφυγή εικονικών εμποδίων, αίσθηση του φόβου σε μια επικίνδυνη σκηνή) που περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων και την αίσθηση ότι είσαι εκεί (Slater et al., 2009).

Διαχωρίζει την παρουσία από τη συμμετοχή (involvement) που σχετίζεται με το επίπεδο προσοχής και ενδιαφέροντος του χρήστη για το περιβάλλον ή την εμπειρία. Η συμμετοχή και η παρουσία είναι ξεχωριστές έννοιες αφού μπορεί κάποιος να νιώθει παρουσία χωρίς να είναι συναισθηματικά εμπλεκόμενος και αντίστροφα (π.χ., παρουσία σε ένα βαρετό περιβάλλον). Διαχωρίζει την παρουσία από το συναίσθημα (emotion), το οποίο μπορεί να ενισχύσει την αίσθηση παρουσίας, αλλά η παρουσία δεν ταυτίζεται με αυτό αφού σημαντικό είναι η ομοιότητα των συναισθηματικών αντιδράσεων στο εικονικό περιβάλλον με εκείνες της πραγματικότητας, όχι η ένταση των συναισθημάτων.

Η παρουσία δεν είναι επίσης η αφοσίωση - εμπλοκή (engagement), η οποία εμπλοκή με τη σειρά της αναφέρεται στη γνωστική και συναισθηματική εστίαση στην εμπειρία. Είναι παρόμοια με την συμμετοχή, αλλά διαφορετική από την παρουσία.

Επίσης ορίζει σαν διάσπαση της παρουσίας (Breaks in Presence - BIPs) τις στιγμές κατά τις οποίες ο χρήστης "επιστρέφει" στην πραγματικότητα λόγω ενός σφάλματος ή ανακολουθίας στο εικονικό περιβάλλον (π.χ., τεχνικά προβλήματα, κακή απόδοση).

Οι απαραίτητες προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται για την επίτευξη της αίσθησης παρουσίας σε εικονικά περιβάλλοντα σχετίζονται με τη συνέπεια και την χαμηλή καθυστέρηση (latency) μεταξύ της κίνησης του χρήστη και των αντίστοιχων αλλαγών στα αισθητηριακά δεδομένα. Οι δράσεις του χρήστη, όπως η κίνηση του κεφαλιού ή του σώματος, πρέπει να συνοδεύονται από άμεσες και ακριβείς αλλαγές στο περιβάλλον. Οι εικόνες και τα ερεθίσματα που παράγονται στο εικονικό περιβάλλον πρέπει να είναι στατιστικά συμβατά με αυτά που αναμένονται από φυσικές σκηνές.

Παρά την υψηλή σημασία της αληθοφάνειας, η πιστότητα (fidelity) των γραφικών δεν είναι απαραίτητο να είναι απόλυτα υψηλή, καθώς ο εγκέφαλος μπορεί να "συμπληρώσει" κενά μέσω προηγούμενων εμπειριών.

Η παρουσία μπορεί να ενισχυθεί και να διατηρηθεί μέσω κατάλληλων αντιδράσεων του περιβάλλοντος στις δράσεις του χρήστη. Η απουσία συσχετίσεων, όπως η έλλειψη αλληλεπίδρασης με εικονικά αντικείμενα ή χαρακτήρες, μειώνει την αίσθηση παρουσίας. Η διαρκής αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, σε διαφορετικά επίπεδα (σωματικά, αισθητηριακά, και γνωστικά), είναι απαραίτητη.

Η παρουσία μπορεί να είναι έντονη στην αρχή μιας εμπειρίας, αλλά μειώνεται αν οι αντιδράσεις του περιβάλλοντος γίνονται προβλέψιμες ή μη σχετικές με τη συμπεριφορά του χρήστη.

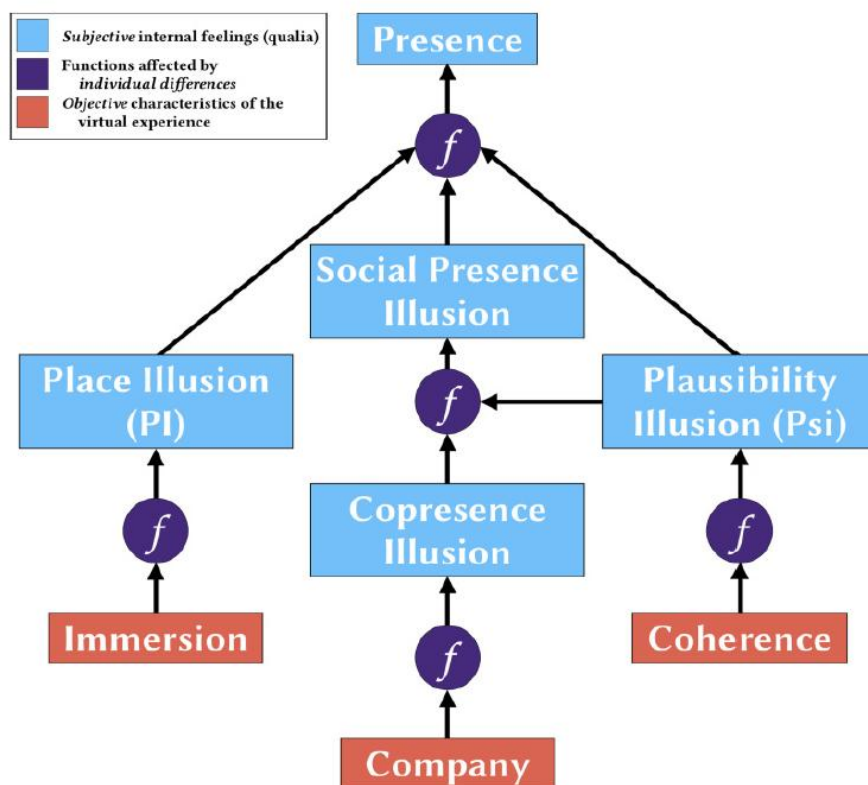
Η θεωρία του Slater για την παρουσία περιλαμβάνει δύο διακριτές αλλά εξίσου σημαντικές συνιστώσες: την Ψευδαίσθηση του Χώρου (Place Illusion, PI) και την Ψευδαίσθηση αληθοφάνειας – αξιοπιστίας (Plausibility Illusion, Psi).

Η Ψευδαίσθηση του Χώρου (PI) ορίζεται ως «η ψευδαίσθηση του να βρίσκεσαι σε έναν τόπο, παρόλο που γνωρίζεις με βεβαιότητα ότι δεν είσαι εκεί». Η PI αντιστοιχεί στην παραδοσιακή έννοια της χωρικής ή τοπικής παρουσίας, δηλαδή στην αίσθηση του «να βρίσκεσαι εκεί». Για παράδειγμα, αν κάποιος βρίσκεται σε ένα εικονικό περιβάλλον που αναπαριστά μια

βιβλιοθήκη, η αίσθηση της παρουσίας ενισχύεται όταν ο χρήστης βλέπει ράφια γεμάτα βιβλία και αισθάνεται ότι βρίσκεται σε μια πραγματική βιβλιοθήκη.

Η Ψευδαίσθηση αληθοφάνειας (Psi) ορίζεται ως «η ψευδαίσθηση ότι αυτό που φαίνεται να συμβαίνει είναι πράγματι αληθινό, παρόλο που γνωρίζεις με βεβαιότητα ότι δεν είναι». Αυτή η συνιστώσα αφορά την αξιοπιστία και την πειστικότητα των γεγονότων και της συμπεριφοράς στο εικονικό περιβάλλον. Στο ίδιο παράδειγμα της βιβλιοθήκης, η Psi ενισχύεται αν οι χρήστες συμπεριφέρονται όπως θα έκαναν σε μια πραγματική βιβλιοθήκη, δηλαδή είναι ήσυχοι. Αντίθετα, αν κάποιοι φωνάζουν δυνατά, αυτό διασπά την Psi.

Στο μοντέλο των Skarbez et al. (1997), οι προτεινόμενες σχέσεις μεταξύ των εννοιών της παρουσίας, όπως η Place Illusion (PI), η Plausibility Illusion (Psi), η συνοχή (coherence) και η εμβύθιση (immersion), περιγράφονται ως διασυνδεδεμένες αλλά ανεξάρτητες έννοιες που μαζί συνεισφέρουν στη συνολική εμπειρία παρουσίας (Εικόνα 19). Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές σχέσεις:



Εικόνα 19: Το μοντέλο για την παρουσία του Scarbez

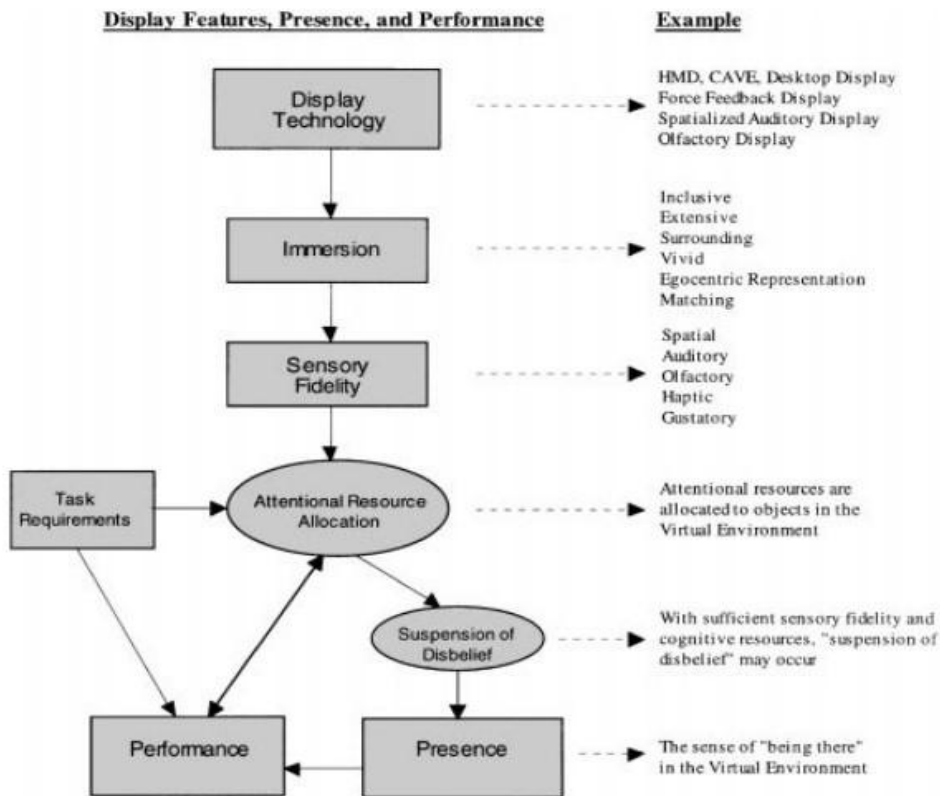
https://www.researchgate.net/figure/Relationships-between-presence-concepts-as-proposed-by-Skarbez-et-al-2017-9623_fig1_350834994

Το μοντέλο Εμβύθιση, Παρουσία, Απόδοση

Το μοντέλο Εμβύθιση, Παρουσία, Απόδοση (IPP, Immersion, Presence, Performance) που προτάθηκε από τους Bystrom et al. (1999) αποτελεί ένα ολοκληρωμένο θεωρητικό πλαίσιο για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης χρηστών με εικονικά περιβάλλοντα. Στόχος του είναι να εξετάσει πώς η εμβύθιση και η αισθητηριακή πιστότητα επηρεάζουν την αίσθηση παρουσίας, αλλά και τη σχέση τους με την απόδοση του χρήστη. Το μοντέλο προτείνει ότι η τεχνολογία απεικόνισης παίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτίωση της εμπειρίας, επιτρέποντας στους χρήστες να επιτυγχάνουν μεγαλύτερη εμβύθιση, ισχυρότερη αίσθηση παρουσίας και αυξημένη απόδοση στις εκάστοτε εργασίες.

Η ροή του μοντέλου ξεκινά από την τεχνολογία απεικόνισης, η οποία επηρεάζει την εμβύθιση, προσφέροντας χαρακτηριστικά όπως πολυαισθητηριακή υποστήριξη και παρακολούθηση κίνησης. Αυτό ενισχύει την αισθητηριακή πιστότητα, δηλαδή την ακρίβεια των αισθητηριακών δεδομένων, που με τη σειρά της επηρεάζει την κατανομή προσοχής του χρήστη. Η καλύτερη κατανομή προσοχής οδηγεί σε ισχυρότερη αίσθηση παρουσίας, η οποία ενισχύεται περαιτέρω από το ενδιαφέρον ή τις απαιτήσεις της εργασίας. Η αίσθηση παρουσίας συμβάλλει στην καλύτερη απόδοση, ιδιαίτερα σε σενάρια όπου η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον είναι κρίσιμη.

Το μοντέλο περιλαμβάνει έναν δυναμικό μηχανισμό ανατροφοδότησης, όπου η φύση της εργασίας και η απόδοση του χρήστη μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω την αίσθηση παρουσίας και την κατανομή προσοχής, δημιουργώντας έναν κύκλο που βελτιώνει τη συνολική εμπειρία. Αυτή η διαδραστική προσέγγιση καθιστά το IPP ένα χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση και τον σχεδιασμό πιο αποτελεσματικών εικονικών περιβαλλόντων σε διάφορους τομείς, όπως η εκπαίδευση, η ψυχαγωγία και η έρευνα (Εικόνα 20).



Εικόνα 20: Διάγραμμα πλαισίου της εμβύθισης, της παρουσίας και της απόδοσης Bystrom et al., 1999

Μέτρηση της παρουσίας

Η μέτρηση της παρουσίας είναι μια σύνθετη και αμφιλεγόμενη διαδικασία λόγω της υποκειμενικής φύσης της εμπειρίας και των προκλήσεων που παρουσιάζονται στην αξιολόγησή της. Οι ερευνητές χρησιμοποιούν διάφορες προσεγγίσεις – υποκειμενικές, συμπεριφορικές, φυσιολογικές και νευρολογικές – αλλά καθεμία έχει πλεονεκτήματα και περιορισμούς.

Υποκειμενικά Μέτρα (subjective measures)

Βασίζονται κυρίως σε αυτοαναφορές, με χρήση ερωτηματολογίων. Οι συμμετέχοντες καλούνται να αξιολογήσουν την αίσθηση παρουσίας που είχαν, χρησιμοποιώντας κλίμακες Likert, μετά την έκθεσή τους σε ένα περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας (Van Baren & Ijsselstein, 2004) ή και κατά τη διάρκεια της έκθεσης στο εικονικό περιβάλλον.

Η διεξαγωγή τους είναι εύκολη και οικονομική, δεν απαιτούν ειδική προετοιμασία ή εξοπλισμό – ικανότητες και εφαρμόζονται ανεξάρτητα από το εικονικό περιβάλλον (Grassini & Laumann, 2020). Ταιριάζουν με την υποκειμενική φύση της εικονικής παρουσίας και πολλοί ερευνητές τα θεωρούν απαραίτητα αφού μόνο έτσι αποτυπώνεται η προσωπική ματιά του συμμετέχοντα (Sheridan, 1992a; Witmer & Singer, 1998), ενώ έχουν μη παρεμβατική φύση. Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται οι ανακρίβειες που σχετίζονται με το ότι μεσολαβεί χρόνος μεταξύ της εμπειρίας και της συμπλήρωσης του ερωτηματολογίου, οπότε κάποιος αναφέρει περισσότερο τις τελευταίες του εντυπώσεις (σφάλματα ανάκλησης), εξαρτώνται από την εξοικείωση που έχει κάποιος με τα εικονικά περιβάλλοντα, υπάρχει αδυναμία καταγραφής της χρονικής διακύμανσης της παρουσίας, η έννοια της παρουσίας διαπραγματεύεται δύσκολες έννοιες τις οποίες δεν γνωρίζουν οι περισσότεροι, με αποτέλεσμα να μην τους είναι ξεκάθαρο σε τι απαντάνε. Το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι όμως πως υπάρχουν πολλά διαφορετικά ερωτηματολόγια, που διαφέρουν μεταξύ τους τόσο στο θεωρητικό πλαίσιο που στηρίζονται, ή τις διαστάσεις, όσο και στις κλίμακες μέτρησης, έτσι όχι μόνο δεν είναι εύκολη η σύγκριση των ερευνών μεταξύ τους, αλλά τίθεται σε αμφισβήτηση ακόμη και εγκυρότητά τους, ιδίως όταν προσθαφαιρούνται ερωτήματα κατά βούληση. Αποτελούν πάντως την πιο συχνή μέθοδο μέτρησης της παρουσίας (Hein et al., 2018).

Το SUS, το IPQ και το PQ είναι τρία από τα πιο γνωστά ερωτηματολόγια που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της αίσθησης της παρουσίας σε εικονικά περιβάλλοντα (VE).

Το Slater-Usch-Steed Questionnaire (SUS) βασίζεται σε τρεις κύριες διαστάσεις για την αξιολόγηση της παρουσίας: (1) την αίσθηση του «είμαι εκεί» στο εικονικό περιβάλλον, (2) την έκταση στην οποία το VE γίνεται η κυρίαρχη πραγματικότητα, και (3) την έκταση στην οποία το VE αποτυπώνεται στη μνήμη ως ένας «τόπος» που κάποιος έχει βρεθεί παρά πως παρατηρεί από κάπου. Το SUS περιλαμβάνει παραλλαγές ερωτήσεων που εστιάζουν στην ψυχολογική εμβάθυνση και την προσοχή (Slater et. al., 1994).

Το IPQ (Igroup Presence Questionnaire) είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα εργαλεία για τη μέτρηση της αίσθησης παρουσίας σε εικονικά περιβάλλοντα. Αναπτύχθηκε για να αξιολογήσει την υποκειμενική εμπειρία των χρηστών, εστιάζοντας σε βασικούς παράγοντες που σχετίζονται με το πόσο «πραγματικό» γίνεται αντιληπτό ένα εικονικό περιβάλλον. Αποτελείται από 14 ερωτήσεις που κατανέμονται σε τρεις βασικές διαστάσεις, ενώ περιλαμβάνει και μια γενική ερώτηση για την παρουσία. Καταγράφει την αίσθηση της χωρικής παρουσίας (Spatial Presence), το βαθμό συμμετοχής (involvement), την αξιολόγηση

του ρεαλισμού (Realism) και ένα γενικό δείκτη της παρουσίας που καταγράφει τη γενική αίσθηση της παρουσίας που ένιωσε κάποιος. Το IPQ χρησιμοποιεί κλίμακα Likert (π.χ., από 1 = καθόλου έως 7 = απόλυτα) για να βαθμολογηθούν οι απαντήσεις. Υπολογίζονται μεμονωμένοι δείκτες για κάθε διάσταση, καθώς και μια συνολική βαθμολογία παρουσίας (Schubert et. al., 2001).

Το Presence Questionnaire (PQ) μετρά την παρουσία μέσω τριών διαστάσεων που βασίζονται στη θεωρία για το πώς οι άνθρωποι αλληλεπιδρούν με τα VE: (1) την Συμμετοχή/Έλεγχο, που αξιολογεί την αίσθηση ελέγχου μέσα στο VE, (2) τη Φυσικότητα, που εξετάζει πόσο ρεαλιστικό και διαισθητικό φαίνεται το περιβάλλον, και (3) την Ποιότητα Διεπαφής, που επικεντρώνεται στο πώς η διεπαφή του συστήματος συμβάλλει ή μειώνει την αίσθηση της παρουσίας. Το PQ περιλαμβάνει στοιχεία που σχετίζονται με τη συμμετοχή, τη γνωστική εστίαση και την αισθητηριακή πιστότητα.

Συγκριτικά, το SUS επικεντρώνεται στη γνωστική κυριαρχία και τη μνημονική αποτύπωση του VE, προσφέροντας μια συνοπτική μέτρηση με λιγότερα στοιχεία αλλά ισχυρή θεωρητική βάση. Το IPQ διαχωρίζει τις συνιστώσες της παρουσίας σε χωριστές κατηγορίες, επιτρέποντας λεπτομερή κατανόηση της χωρικής, συναισθηματικής και ρεαλιστικής διάστασης. Το PQ ακολουθεί μια ευρύτερη προσέγγιση που περιλαμβάνει τον σχεδιασμό της διεπαφής και τη φυσικότητα μαζί με παράγοντες συμμετοχής, καθιστώντας το ευέλικτο για διάφορες εφαρμογές.

Συμπεριφορικές Μετρήσεις της Παρουσίας σε Εικονικά Περιβάλλοντα

Οι συμπεριφορικές μετρήσεις της παρουσίας βασίζονται στην καταγραφή των εξωτερικών αντιδράσεων και ενεργειών του χρήστη μέσα στο εικονικό περιβάλλον. Αυτές οι μετρήσεις περιλαμβάνουν είτε άμεση παρατήρηση από ερευνητές είτε χρήση τεχνολογιών καταγραφής για την ανάλυση της συμπεριφοράς. Οι υποστηρικτές αυτής της μεθόδου υποστηρίζουν ότι όταν ένας χρήστης βιώνει έντονη παρουσία, οι αντιδράσεις του στον εικονικό κόσμο είναι παρόμοιες με αυτές στον φυσικό (Slater et al., 1996; Van Baren & IJsselstein, 2004).

Οι βασικές συμπεριφορικές μετρήσεις παρουσιάζονται συνοπτικά.

Η ανάλυση της μετατόπισης του σώματος (postural stability) μετράται ως δείκτης φυσιολογικής απόκρισης του σώματος σε ρεαλιστικά ερεθίσματα στο εικονικό περιβάλλον (Freeman et al., 2000). Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις που ο χρήστης στέκεται σε έναν προσομοιωμένο γκρεμό, καταγράφονται αλλαγές στη στάση του σώματος.

Οι αντιδράσεις σε κοινωνικά περιβάλλοντα, όπως η τήρηση αποστάσεων ή η αποφυγή συγκρούσεων, αναδεικνύουν τη βιωμένη παρουσία στο εικονικό περιβάλλον (Bailenson et al., 2005).

Δείκτες όπως ο χρόνος ολοκλήρωσης ενός έργου, το ποσοστό σφαλμάτων, και η απόδοση σε δευτερεύουσες εργασίες αξιολογούν τη συμμετοχή του χρήστη στον εικονικό κόσμο (Van Baren & IJsselsteijn, 2004).

Οι αντιδράσεις, όπως η κατεύθυνση του βλέμματος ή οι γρήγορες κινήσεις προς έναν στόχο, καταγράφονται για να αξιολογηθεί η φυσικότητα της αντίδρασης σε ερεθίσματα του εικονικού περιβάλλοντος.

Οι συμπεριφορικές μετρήσεις της παρουσίας έχουν μια σειρά από προβλήματα αφού συχνά οι μετρήσεις αυτές δεν συσχετίζονται με υποκειμενικά μέτρα παρουσίας, θέτοντας ερωτήματα για την εγκυρότητά τους (Freeman et al., 2000). Ακόμη παράγοντες όπως η εργονομία του εξοπλισμού VR ή η ανάλυση της οθόνης μπορεί να επηρεάσουν τη συμπεριφορά ανεξάρτητα από την εμπειρία παρουσίας (Nichols, 1999). Επίσης ορισμένα μέτρα, όπως οι εκφράσεις προσώπου ή τα ανατακλαστικά, στερούνται εκτεταμένης εμπειρικής υποστήριξης (Van Baren & IJsselsteijn, 2004).

Νευροφυσιολογικές μετρήσεις της παρουσίας σε εικονικά περιβάλλοντα

Οι φυσιολογικές μετρήσεις της παρουσίας βασίζονται στην παρακολούθηση των αυτόνομων φυσιολογικών αντιδράσεων του χρήστη, όπως ο καρδιακός ρυθμός, η ηλεκτροδερμική δραστηριότητα (EDA), και οι αλλαγές στη διάταση της κόρης των ματιών (Slater et al., 1994; Meehan et al., 2002). Αυτές οι μετρήσεις αποσκοπούν στο να αντικατοπτρίζουν την ένταση της αίσθησης παρουσίας με βάση την υποτιθέμενη φυσιολογική αντίδραση του σώματος σε ερεθίσματα του εικονικού περιβάλλοντος.

Για παράδειγμα, όταν ο χρήστης βρίσκεται σε ένα εικονικό περιβάλλον που προκαλεί φόβο ή άγχος (π.χ., ένας προσομοιωμένος γκρεμός), οι φυσιολογικές αντιδράσεις αναμένεται να είναι παρόμοιες με αυτές που θα προκαλούνταν σε ένα ανάλογο πραγματικό περιβάλλον (Meehan et al., 2002).

Παρέχουν αντικειμενικά δεδομένα, που δεν επηρεάζονται από την προκατάληψη του χρήστη ή τις προσδοκίες του. Είναι ευαίσθητες στις διακυμάνσεις της παρουσίας σε πραγματικό χρόνο. Ενδείκνυνται για χρήση σε περιβάλλοντα με υψηλή συναισθηματική φόρτιση.

Από την άλλη απαιτούν ακριβό εξοπλισμό και ενίοτε επεμβατικές διαδικασίες. Η φυσιολογική απόκριση μπορεί να προκληθεί από εξωτερικούς παράγοντες, όπως η δυσφορία λόγω του εξοπλισμού VR, παρά από την παρουσία (Nichols, 1999). Η ερμηνεία των φυσιολογικών δεδομένων είναι περίπλοκη και συχνά απαιτεί περαιτέρω ανάλυση για την αποφυγή σύγχυσης από εξωγενείς παράγοντες (Van Baren & Ijsselsteijn, 2004). Δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογές που από τη φύση τους δεν προκαλούν ιδιαίτερα συναισθήματα.

Η μέτρηση της ηλεκτροδερμικής δραστηριότητας (γαλβανική απόκριση δέρματος - EDA) εξετάζει την αγωγιμότητα του δέρματος, η οποία αυξάνεται όταν ο χρήστης βιώνει στρες ή διέγερση. Οι αλλαγές στην EDA χρησιμοποιούνται συχνά για να μετρήσουν αντιδράσεις σε αγχώδη εικονικά περιβάλλοντα (Freeman et al., 2000). Έχει αποδειχθεί ότι αυξάνεται κατά τη διάρκεια υψηλών επιπέδων παρουσίας (Meehan et al., 2002).

Οι μεταβολές στον καρδιακό ρυθμό (HRV) (π.χ., αύξηση ή επιβράδυνση) αντανακλούν την φυσιολογική ανταπόκριση σε έντονα ερεθίσματα στο εικονικό περιβάλλον και χρησιμοποιείται ως δείκτης συναισθηματικής συμμετοχής και παρουσίας. Για παράδειγμα, σε καταστάσεις φόβου, ο καρδιακός ρυθμός τείνει να αυξάνεται (Meehan et al., 2002). Μετρήσεις του HRV έχουν δείξει συσχέτιση με αλλαγές στην αντίληψη της παρουσίας (Riva et al., 2007).

Η μέτρηση της διάτασης της κόρης συσχετίζεται με τη γνωστική φόρτιση και τη συναισθηματική διέγερση του χρήστη. Μεγαλύτερη διάταση της κόρης έχει συσχετιστεί με την αυξημένη παρουσία (Slater et al., 1994).

Οι αλλαγές στα μοτίβα των εγκεφαλικών κυμάτων, όπως αυτές που καταγράφονται μέσω ηλεκτροεγκεφαλογραφίας (EEG), έχουν επίσης προταθεί ως δείκτες παρουσίας (Baumgartner et al., 2008). Η αύξηση της ισχύος στις ζώνες συχνοτήτων άλφα και βήτα έχει συνδεθεί με την εμπειρία της παρουσίας σε εικονικά περιβάλλοντα (Slater et al., 2009).

Η λειτουργική Μαγνητική Τομογραφία (fMRI) ανιχνεύει μεταβολές στη ροή αίματος στον εγκέφαλο που σχετίζονται με τη δραστηριότητα των νευρώνων. Έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των περιοχών του εγκεφάλου που ενεργοποιούνται όταν ο χρήστης αισθάνεται παρών στο εικονικό περιβάλλον, όπως ο προμετωπιαίος φλοιός (Baumgartner et al., 2008).

Παράγοντες που επηρεάζουν την παρουσία

Η παρουσία καθορίζεται από παράγοντες που είναι είτε εξωτερικοί είτε εσωτερικοί σε σχέση με τον χρήστη. Η παρακάτω ταξινόμηση συνδυάζει παράγοντες από διαφορετικά πλαίσια της εικονικής παρουσίας που έχουν προταθεί και υπάρχουν στη βιβλιογραφία από τους Lombard (2015), Sheridan (1992), Slater & Usoh (1994), Witmer & Singer (1998).

Η φύση της εργασίας μέσα στο εικονικό περιβάλλον μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την αίσθηση παρουσίας του χρήστη. Περιλαμβάνει τη δυσκολία, τον βαθμό αυτοματοποίησης, τις απαιτήσεις σε προσοχή, τα κίνητρα και τη διάρκεια της εργασίας. Ο Sheridan (1992) τόνισε ότι η δυσκολία εργασίας μπορεί να επηρεάσει τα επίπεδα παρουσίας. Πιο απαιτητικές εργασίες αυξάνουν τη συμμετοχή, οδηγώντας σε υψηλότερα επίπεδα παρουσίας, ενώ υπερβολικά πολύπλοκες εργασίες μπορεί να μειώσουν την αίσθηση παρουσίας. Παράλληλα, η αυτοματοποίηση, όταν επιτρέπει στο χρήστη μεγαλύτερο έλεγχο, ενισχύει την παρουσία, ενώ η υπερβολική αυτοματοποίηση μπορεί να μειώσει τη συμμετοχή. Οι εργασίες που απαιτούν σημαντική προσοχή τείνουν να ενισχύουν την παρουσία, ενώ το κίνητρο και η διάρκεια της εργασίας σχετίζονται επίσης άμεσα με την εμπύθιση. Η παρατεταμένη ενασχόληση μπορεί να αυξήσει την παρουσία μέσω εξοικείωσης, αλλά και να την μειώσει λόγω κόπωσης ή αποπροσανατολισμού (Stanney et al., 1998). Οι αισθητηριακοί παράγοντες, όπως ο πλούτος του εικονικού περιβάλλοντος, η οπτική εμπύθιση, η ανάλυση της οθόνης, το πεδίο προβολής (FOV), η αντίληψη βάθους, η παρακολούθηση κίνησης του κεφαλιού (Head-Tracking), ο ρυθμός καρέ, τα ακουστικά, απτικά, γευστικά και οσφρητικά σήματα παίζουν κρίσιμο ρόλο στην ενίσχυση της παρουσίας. Ένα ευρύτερο FOV και υψηλότερη ανάλυση ενισχύουν την εμπύθιση, ενώ η ακριβής παρακολούθηση κίνησης αποτρέπει τις διακοπές στην παρουσία. Τα απτικά σήματα, παρόλο που είναι λιγότερο συνηθισμένα, ενισχύουν την αίσθηση αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον. Οι γευστικές και οσφρητικές ενδείξεις είναι τεχνολογικά πιο περιορισμένες, αλλά μπορούν να συμβάλουν στην αύξηση της παρουσίας. Ακόμη επηρεάζουν παράγοντες που σχετίζονται με το περιεχόμενο, όπως η αφήγηση, ο ρεαλισμός του περιβάλλοντος, η εμφάνιση του εικονικού εαυτού (avatars) και η κοινωνική αλληλεπίδραση αποτελούν βασικούς παράγοντες. Μια συνεκτική αφήγηση ενισχύει τη συναισθηματική σύνδεση με το περιβάλλον, ενώ ο ρεαλισμός της σκηνής και των αντικειμένων αυξάνει την αίσθηση της παρουσίας. Η εμφάνιση του avatar και η δυνατότητα αλληλεπίδρασης με άλλα άτομα ή αντικείμενα συμβάλλουν στην ενίσχυση της παρουσίας. Οι ρεαλιστικές αλληλεπιδράσεις σε κοινωνικό επίπεδο αυξάνουν τη δέσμευση στο περιβάλλον. Επίσης

συμβάλλουν ψυχολογικοί παράγοντες όπως η απορρόφηση, η αποσύνδεση από τον πραγματικό κόσμο, η εμπυθιστική τάση, η εστίαση του ελέγχου και τα χαρακτηριστικά της προσωπικότητας επηρεάζουν την ικανότητα εμπύθισης. Η προσοχή και η ικανότητα σχηματισμού νοητικών μοντέλων του περιβάλλοντος θεωρούνται επίσης σημαντικές για την αίσθηση παρουσίας. Η ηλικία συνδέεται συχνά με την εμπύθιση, ενώ οι άνδρες φαίνεται να έχουν μεγαλύτερη χωρική παρουσία σε ορισμένες περιπτώσεις. Η εξοικείωση με την τεχνολογία VR μπορεί επίσης να διαφοροποιεί την εμπειρία παρουσίας (Witmar και Singer 1998; Nash et al., 2000; Hein et al., 2018; Felton και Jackson, 2022).

Σε αντίθεση με την εικονική πραγματικότητα (VR), η οποία βυθίζει πλήρως τους χρήστες σε συνθετικούς κόσμους, η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) συνδυάζει το ψηφιακό περιεχόμενο με τον πραγματικό κόσμο, οδηγώντας σε μοναδικές δυναμικές παρουσίας που εκτείνονται σε πολλαπλές διαστάσεις, όπως η χωρική παρουσία, η κοινωνική παρουσία και η αυτο-παρουσία (Rauschnabel, Felix, Hinsch, Shahab, & Alt, 2022). Η χωρική παρουσία επηρεάζεται από την απρόσκοπτη ενσωμάτωση των εικονικών αντικειμένων στους φυσικούς χώρους, η οποία ενισχύεται από ρεαλιστική τρισδιάστατη καταγραφή και αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο. Γραφικά υψηλής ποιότητας στην AR και αποκρίσιμες διεπαφές βελτιώνουν σημαντικά την αίσθηση εμπύθισης των χρηστών, όπως έδειξαν οι Grubert, Langlotz, Zollmann και Regenbrecht (2016), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι η χωρική αγκύρωση και η οπτική πιστότητα είναι κρίσιμες για τη διατήρηση της αντίληψης του βάθους και των εφέ απόκρυψης. Η κοινωνική παρουσία στην AR είναι ιδιαίτερα σημαντική σε συνεργατικά περιβάλλοντα όπου οι χρήστες αλληλεπιδρούν με εικονικούς πράκτορες ή άλλους συμμετέχοντες. Έρευνα των Steptoe, Steed και Slater (2014) έδειξε ότι τα εικονικά άβαταρ και οι κοινόχρηστοι επαυξημένοι χώροι ενισχύουν τη συν-παρουσία, βελτιώνοντας την αίσθηση φυσικής αλληλεπίδρασης. Προγενέστερη εργασία των Kiyokawa et al. (2002) αποκάλυψε ότι περιβάλλοντα πολλαπλών χρηστών στην AR βελτιώνουν την ομαδική εργασία ενισχύοντας την αμοιβαία παρουσία, επιτρέποντας στους συμμετέχοντες να αισθάνονται πιο συνδεδεμένοι. Οι επιπτώσεις της παρουσίας στην AR εκτείνονται σε διάφορους τομείς, όπως η εκπαίδευση και η κατάρτιση, το λιανικό εμπόριο και το μάρκετινγκ, καθώς και η υγειονομική περίθαλψη και θεραπεία. Στο εκπαιδευτικό περιβάλλον, έχει αποδειχθεί ότι η AR ενισχύει τη διατήρηση της γνώσης και την εμπλοκή των μαθητών, παρέχοντας εμπυθιστικές και διαδραστικές εμπειρίες (Billingham, Kato, & Poupyrev, 2015). Στο λιανικό εμπόριο, οι εφαρμογές AR επιτρέπουν στους καταναλωτές να "δοκιμάζουν" εικονικά προϊόντα, αυξάνοντας σημαντικά την αλληλεπίδραση και την πρόθεση αγοράς (Hilken, de Ruyter, Chylinski, Mahr, & Keeling,

2017). Στον τομέα της υγείας, οι εφαρμογές AR αξιοποιούν την ικανότητα δημιουργίας ρεαλιστικών αλλά ελεγχόμενων περιβαλλόντων, όπως στη θεραπεία έκθεσης για την αντιμετώπιση φοβιών, όπου η σταδιακή εισαγωγή αγχωτικών ερεθισμάτων πραγματοποιείται μέσα σε ένα ασφαλές, επαυξημένο περιβάλλον (Rauschnabel et al., 2022). Για την ποσοτικοποίηση της παρουσίας στην AR, οι ερευνητές έχουν αναπτύξει συγκεκριμένες κλίμακες όπως η Κλίμακα Παρουσίας Επαυξημένης Πραγματικότητας (Augmented Reality Presence Scale - APS), η οποία μετρά τη χωρική, κοινωνική και αυτο-παρουσία (Wirth et al., 2020). Επιπλέον, φυσιολογικά μέτρα (π.χ. καρδιακός ρυθμός, αγωγιμότητα του δέρματος) και συμπεριφορικές παρατηρήσεις συμπληρώνουν τα αυτοαναφερόμενα δεδομένα, παρέχοντας μια πολυδιάστατη κατανόηση της παρουσίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Εγκεφαλογραφία και εμβυθιστικά περιβάλλοντα

Βιβλιογραφική ανασκόπηση της χρήσης EEG στην διερεύνηση της παρουσίας σε εμβυθιστικά περιβάλλοντα

Μια σειρά από πειράματα εξετάζουν την υπόθεση πως η αυξημένη αίσθηση παρουσίας σχετίζεται με αυξημένη προσοχή στο εικονικό περιβάλλον, με συνέπεια την ελάττωση της διαθέσιμης προσοχής για επεξεργασία άσχετων ερεθισμάτων προς αυτό. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα ακουστικό παράδειγμα τύπου oddball όπου οι συμμετέχοντες ακούνε μια σειρά από ήχους και καλούνται να ανιχνεύσουν τους σπάνιους τόνους που παρεμβάλλονται ανάμεσα στους συνηθισμένους. Όταν ο συμμετέχων αντιδρά πιο έντονα ή ταχύτερα στον τόνο oddball, αυτό δείχνει ότι το σύστημα ανίχνευσης προσοχής του είναι ενεργό.

Στις περισσότερες από αυτές τις μελέτες οι συμμετέχοντες χωρίζονται σε ομάδες ανάλογα με την υποκειμενική αξιολόγηση της αίσθησης της παρουσίας με συμπλήρωση ερωτηματολογίων. Σε άλλες η ομαδοποίηση είναι τυχαιοποιημένη.

Σαν εικονικά περιβάλλοντα για τις μελέτες χρησιμοποιούνται συχνά εμπορικά παιχνίδια ή εφαρμογές που έχουν κατασκευάσει οι ίδιοι οι ερευνητές. Το μέσο προβολής μπορεί να είναι μια τυπική LCD οθόνη υπολογιστή, ένας τρισδιάστατος προβολέας ή μια συσκευή HMD.

Η ανάλυση γίνεται είτε με τη βοήθεια προκλητών δυναμικών είτε με ανάλυση της ισχύος σε συγκεκριμένες ζώνες συχνότητων.

Στη συνέχεια παρατίθεται ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας γύρω από τη χρήση των εγκεφαλογραφημάτων στη διερεύνηση της παρουσίας στα εμβυθιστικά περιβάλλοντα. Η έρευνα σε αυτό τον τομέα προσπαθεί προσδιορίσει κατά πόσο είναι εφικτό μέσα από χαρακτηριστικές παραμέτρους ενός εγκεφαλογραφήματος είναι δυνατό να προσδιοριστεί ο βαθμός παρουσίας σε ένα εμβυθιστικό περιβάλλον. Ακόμη γίνεται προσπάθεια να καθοριστεί πως οι μεταβολές στις παραμέτρους ενός εμβυθιστικού περιβάλλοντος έχει επιπτώσεις στην παρουσία και πως αυτές αποτυπώνονται σε ένα εγκεφαλογράφημα.

Η μελέτη των Kober και Neuper (2012) χρησιμοποίησε ακουστικά προκλητά δυναμικά. Οι συμμετέχοντες εκτέλεσαν μια εργασία πλοήγησης σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας (Cube3D2) ενώ ταυτόχρονα λάμβαναν ηχητικούς τόνους μέσω ενός ακουστικού oddball παραδείγματος. Αναλύθηκαν τα προκλητά δυναμικά (N1, SW1, SW2, MMN). Τα πρώιμα

δυναμικά που σχετίζονται με την αυτόματη επεξεργασία των ερεθισμάτων δεν εμφάνισαν συσχέτιση με την υποκειμενική αίσθηση της παρουσίας, που μετρήθηκε μέσω αυτοαναφορικών ερωτηματολογίων. Αντίθετα η ομάδα με υψηλή παρουσία εμφάνισε μειωμένα πλάτη στα αρνητικά αργά δυναμικά (SW1, SW2) ιδιαίτερα στις μπροστινές εγκεφαλικές περιοχές (Fz) που σχετίζονται με την κεντρική επεξεργασία, τη νοηματοδότηση των ερεθισμάτων και την ανάθεση πόρων προσοχής, επιβεβαιώνοντας την υπόθεση.

Στη μελέτη των Burns and Fairclough (2015), οι συμμετέχοντες, χωρισμένοι τυχαία σε δύο ομάδες, χρησιμοποίησαν ένα εμπορικό παιχνίδι. Μελετήθηκε η επίδραση του μέσου προβολής (HDM-LCD) και του επιπέδου δυσκολίας του παιχνιδιού (εύκολο, δύσκολο, αδύνατο) στην εμπύθιση, χρησιμοποιώντας ένα τυπικό ακουστικό παράδειγμα oddball. Το ερωτηματολόγιο εμπειρίας εμπύθισης (IEQ) χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή υποκειμενικών δεικτών εμπύθισης. Έγινε ανάλυση σε συγκεκριμένες θέσεις ηλεκτροδίων (Fz, Cz, C3, C4, Pz) των προκλητών δυναμικών (P3 - 315–460 ms, SW - 461–720 ms, LN - 721–933 ms). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι τα πλάτη των αργών κυμάτων (SW) στο σημείο Fz μειώθηκαν σημαντικά καθώς η δυσκολία του παιχνιδιού αυξανόταν από το εύκολο στο δύσκολο και από το εύκολο στο αδύνατο. Δεν παρατηρήθηκε διαφορά στα στοιχεία SW μεταξύ του δύσκολου και του αδύνατου επιπέδου. Δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στις τιμές των ERP ή στις υποκειμενικές βαθμολογίες εμπύθισης μεταξύ της HMD και της LCD οθόνης.

Οι Terkildsen και Makransky (2019) μελέτησαν τη σχέση μεταξύ της αίσθησης της παρουσίας και της προσοχής. Χρησιμοποίησαν ένα παιχνίδι τρόμου, με τους συμμετέχοντες να εξερευνούν ένα στοιχειωμένο σπίτι αναζητώντας έναν χαρακτήρα του παιχνιδιού, ενώ εκτυλίσσονταν διάφορα τρομακτικά γεγονότα. Κατά τη διάρκεια του παιχνιδιού, άσχετοι με το παιχνίδι ήχοι ακούγονταν, ακολουθώντας το τυπικό παράδειγμα ηχητικού oddball. Οι φυσιολογικές αντιδράσεις των συμμετεχόντων μετρήθηκαν και η αίσθηση παρουσίας τους αξιολογήθηκε μέσω ενός ερωτηματολογίου αυτοαναφοράς (The Multimodal Presence Scale – MPS), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να τους κατανείμει σε μία από τις δύο πειραματικές ομάδες. Τα προκλητά δυναμικά από τους αποκλίνοντες τόνους αναλύθηκαν συγκρίνοντας τα μέσα πλάτη των N1, MMN, SW1 και SW2, που μετρήθηκαν στα μεσαία ηλεκτρόδια (Fz, Cz και POz), μεταξύ των ομάδων χαμηλής και υψηλής παρουσίας. Τα πλάτη του N1 που προκλήθηκαν από αποκλίνοντες τόνους ήταν σημαντικά χαμηλότερα στην ομάδα υψηλής παρουσίας σε σύγκριση με την ομάδα χαμηλής παρουσίας σε όλα τα μεσαία ηλεκτρόδια (Fz, Cz, POz). Η ομάδα υψηλής παρουσίας παρουσίασε επίσης σημαντικά χαμηλότερα πλάτη στο

MMN. Τοπογραφικά τα πλάτη των N1 και MMN ήταν πιο μεγάλα πάνω από τα μετωποκεντρικά ηλεκτρόδια (Fz, Cz), αλλά οι μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των ομάδων παρατηρήθηκαν απροσδόκητα στη θέση του οπίσθιου ηλεκτροδίου (POz). Δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων χαμηλής και υψηλής παρουσίας για τα στοιχεία SW1 και SW2.

Οι Grassini et al. (2021) χρησιμοποίησαν ένα βιντεοπαιχνίδι για να αξιολογήσουν την αίσθηση παρουσίας στα εικονικά περιβάλλοντα. Η σκηνή VR παρουσίαζε μια εμπειρία πρώτου προσώπου σε ένα τρενάκι του λούνα παρκ και παράλληλα εφαρμόστηκε η διαδικασία ενός τυπικού ακουστικού oddball. Το περιβάλλον VR παρέχονταν μέσω μίας συσκευής HMD (Oculus GO). Οι συμμετέχοντες δεν είχαν κάποια συγκεκριμένη αποστολή, πέρα από το να εξερευνούν το περιβάλλον. Το υποκειμενικό επίπεδο της αίσθησης παρουσίας που βιώθηκε αξιολογήθηκε μέσω ερωτηματολογίων μετά την εμπειρία (PQ, SUS, MPS(sp), MPS(se)), και οι διάμεσοι των βαθμολογιών αυτών χρησιμοποιήθηκαν για την κατανομή των συμμετεχόντων σε ομάδες. Η μελέτη ανέλυσε τα δυναμικά (ERPs) που προκλήθηκαν από μη συχνούς ήχους, για να διερευνήσει εάν διαφορετικές ERP συνιστώσες θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως δείκτες της υποκειμενικής αίσθησης παρουσίας. Οι συμμετέχοντες με χαμηλή αίσθηση παρουσίας παρουσίαζαν σχετικά υψηλότερα πλάτη στις ERP συνιστώσες ενδιαφέροντος (N1, MMN, SW1, SW2). Οι πρώιμες συνιστώσες (N1, MMN) ήταν πιο έντονες στις μετωπιαίες περιοχές του εγκεφάλου, ενώ οι μεταγενέστερες συνιστώσες (SW1, SW2) παρατηρήθηκαν στις κεντρικές περιοχές. Ωστόσο, καμία αλληλεπίδραση μεταξύ της ομάδας συμμετεχόντων και της θέσης των ηλεκτροδίων δεν ήταν στατιστικά σημαντική. Οι μεταγενέστερες ERP συνιστώσες (SW1, SW2) έδειξαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων υψηλής και χαμηλής παρουσίας μεταξύ των δύο ομάδων.

Η μελέτη των Savalle et al. (2024) διερεύνησε την αίσθηση της παρουσίας σε ένα εικονικό περιβάλλον. Η παρουσία αξιολογήθηκε με ανάλυση της εγκεφαλικής απόκρισης P300 σε ακουστικά ερεθίσματα oddball. Οι παραδοσιακές μέθοδοι, όπως τα ερωτηματολόγια αυτοαναφοράς, συμπληρώθηκαν με EEG για να ξεπεραστούν οι υποκειμενικοί και διαταρακτικοί περιορισμοί τους. Οι συμμετέχοντες συμμετείχαν σε δύο συνθήκες σε ένα εικονικό δασικό περιβάλλον. Η πρώτη ήταν αυτή χωρίς διακοπές στην παρουσία (WITHOUT_BIP) όπου περιηγούνταν σε ένα εικονικό δάσος. Η δεύτερη με διακοπές στην παρουσία (WITH_BIP) όπου η περιήγηση στο δάσος διακόπτονταν περιοδικά από εικόνες που έδειχναν το πραγματικό περιβάλλον μέσω της εξωτερικής κάμερας του συστήματος VR. Το πείραμα στόχευε στη μέτρηση των αλλαγών της προσοχής μέσω του P300. Οι αντιδράσεις των

συμμετεχόντων καταγράφηκαν μέσω EEG, ενώ η αυτοαναφερόμενη παρουσία αξιολογήθηκε με το ερωτηματολόγιο iGroup Presence Questionnaire. Τα πλάτη P300 ήταν σημαντικά υψηλότερες στη συνθήκη WITH_BIP, όπου οι συμμετέχοντες βίωσαν χαμηλότερη παρουσία, αντανακλώντας αυξημένη προσοχή στα πραγματικά ερεθίσματα κατά τη διάρκεια των διακοπών στην παρουσία. Αντίθετα, τα πλάτη του P300 ήταν χαμηλότερα στη συνθήκη WITHOUT_BIP, υποδεικνύοντας συνεχή προσοχή στο εικονικό περιβάλλον. Η συνθήκη WITHOUT_BIP απέφερε υψηλότερες βαθμολογίες παρουσίας στο ερωτηματολόγιο. Βρέθηκε αρνητική συσχέτιση μεταξύ του πλάτους P300 και της αυτοαναφερόμενης παρουσίας, δείχνοντας ότι η αυξημένη προσοχή σε πραγματικά ερεθίσματα σχετίζεται με μειωμένη συμμετοχή στην εικονική πραγματικότητα. Η απόκριση P300 εντοπίστηκε κυρίως κατά μήκος του μετωπο-βρεγματικού άξονα, ειδικά γύρω από τα ηλεκτρόδια Cz (κεντρικό), FC1 (μετωποκεντρικό) και CP2 (κεντροβρεγματικό). Παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στο χρονικό παράθυρο 250–400 ms μετά την έναρξη του ερεθίσματος, με τη συνθήκη WITH_BIP να παρουσιάζει αυξημένες τιμές P300, αντικατοπτρίζοντας αυξημένη προσοχή στα πραγματικά ερεθίσματα κατά τη διάρκεια των διακοπών στην παρουσία. Οι τοπογραφικοί χάρτες έδειξαν αυξημένη ενεργοποίηση στις κεντροβρεγματικές περιοχές, επιβεβαιώνοντας τη μετατόπιση της προσοχής μακριά από την εικονική πραγματικότητα κατά τις διακοπές. Αυτά τα ευρήματα αποδεικνύουν ότι το πλάτος και η χωρική κατανομή του P300 λειτουργούν ως αξιόπιστοι νευροφυσιολογικοί δείκτες παρουσίας, με τις μετωπο-βρεγματικές περιοχές να διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην κατανομή της προσοχής μεταξύ του εικονικού και του πραγματικού περιβάλλοντος.

Η μελέτη των Marucci et al. (2021) αξιολόγησε την επίδραση της πολυαισθητηριακής διέγερσης και του αντιληπτικού φόρτου στην αίσθηση παρουσίας σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας (VR) μέσω ανάλυσης προκλητών δυναμικών P300. Χρησιμοποιώντας το HMD Oculus Rift DK2, οι συμμετέχοντες οδηγούσαν ένα αυτοκίνητο σε εικονικές συνθήκες χαμηλού (ηλιόλουστος καιρός) και υψηλού φόρτου (ομίχλη και βροχή) και εκτέλεσαν εργασίες εντοπισμού στόχων. Παρουσιάστηκαν μονοαισθητηριακά (οπτικά), διαισθητηριακά (οπτικά-ακουστικά, οπτικά-δονητικά) και τριαισθητηριακά (οπτικά-ακουστικά-δονητικά) ερεθίσματα. Η τριαισθητηριακή διέγερση ενίσχυσε σημαντικά την αίσθηση παρουσίας, με την ακουστική είσοδο να παίζει καθοριστικό ρόλο. Οι συνθήκες υψηλού φόρτου αύξησαν την αίσθηση παρουσίας και τα πλάτη του P300, ενώ οι πολυαισθητηριακές συνθήκες με ακουστικά ερεθίσματα προκάλεσαν μεγαλύτερα πλάτη και ταχύτερη επεξεργασία στόχων, όπως φάνηκε από τη μικρότερη χρονική καθυστέρηση του P300. Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν τη

σημασία της πολυαισθητηριακής συμμετοχής και της πολυπλοκότητας του περιβάλλοντος για την ενίσχυση της παρουσίας και της γνωστικής απόδοσης στην VR.

Η μελέτη των Pappalettera *et. al* (2024) διερεύνησε πώς οι διαδικασίες της προσοχής επηρεάζονται από την εικονική πραγματικότητα και την παρουσία περισπασμών, χρησιμοποιώντας μια ακουστική δοκιμασία oddball σε συνδυασμό με ηλεκτροεγκεφαλογράφημα. Στόχος ήταν να εξεταστούν οι νευρολογικές συσχετίσεις της προσοχής, με χρήση προκλητών δυναμικών και συγκεκριμένα των N100 και P300, υπό τρεις διαφορετικές πειραματικές συνθήκες: χωρίς VR (No-VR), VR χωρίς περισπασμούς (VR-Empty) και VR με υψηλό επίπεδο περισπασμών (VR-Full). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πλάτος του N100 ήταν μεγαλύτερο στην κατάσταση χωρίς VR και μειωνόταν στις καταστάσεις VR, με το χαμηλότερο πλάτος να καταγράφεται στην κατάσταση VR-Full. Αντίστοιχα, το πλάτος του P300 ήταν υψηλότερο στην κατάσταση No-VR και μειωνόταν στις συνθήκες VR. Όσον αφορά την καθυστέρηση, δεν υπήρξαν σημαντικές αλλαγές για το N100, ενώ για το P300 παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση της καθυστέρησης από την κατάσταση No-VR στην VR-Full, γεγονός που υποδηλώνει καθυστέρηση στη γνωστική επεξεργασία λόγω της αυξημένης απόσπασης προσοχής. Η τοπογραφική ανάλυση έδειξε ότι το N100 δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές μεταξύ των συχνών και σπάνιων ερεθισμάτων στις καταστάσεις No-VR και VR-Empty, αλλά εμφανίστηκαν διαφορές στην κατάσταση VR-Full. Το P300 παρουσίασε σημαντικές διαφορές μεταξύ των συχνών και σπάνιων ερεθισμάτων σε όλες τις συνθήκες, αλλά η ένταση αυτών των διαφορών μειώθηκε σταδιακά στις συνθήκες VR. Τα συμπεριφορικά δεδομένα έδειξαν ότι οι συμμετέχοντες έκαναν περισσότερα λάθη στην καταμέτρηση των σπάνιων τόνων στην κατάσταση VR-Full, ενώ η αυξημένη κίνηση στις συνθήκες VR δεν φάνηκε να σχετίζεται σημαντικά με τα ποσοστά λαθών, γεγονός που υποδηλώνει ανεξάρτητες επιδράσεις στην προσοχή και την κίνηση.

Αυτά τα ευρήματα υπογραμμίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των απαιτήσεων προσοχής και της πολυπλοκότητας του περιβάλλοντος, δείχνοντας ότι η VR και οι περισπασμοί τροποποιούν τόσο τους νευρικούς όσο και τους συμπεριφορικούς δείκτες της προσοχής.

Η μελέτη των Athif *et al* (2020) διερεύνησε τη χρήση βιοσημάτων (EEG, ECG και EDA) ως αντικειμενικών μετρήσεων της παρουσίας στην εικονική πραγματικότητα. Στόχευε στην ταυτοποίηση νευρωνικών (neural) και φυσιολογικών (physiological) συσχετίσεων με την αίσθηση της παρουσίας μεταβάλλοντας παράγοντες που την επηρεάζουν. Το εικονικό περιβάλλον παρείχε ένα HMD -Oculus Rift DK2 ή μια 24' οθόνη LCD ανάλογα με το σενάριο

και η πλοήγηση γινόταν με ένα ελεγκτή ps4-ds4. Δημιουργήθηκαν έξι σενάρια. Το βασικό σενάριο εκτυλίσσονταν σε ένα δάσος στο οποίο περιηγούνταν οι συμμετέχοντες και περιλάμβανε ακουστικά και οπτικά ερεθίσματα υψηλής πιστότητας, ενώ στα άλλα σενάρια υποβαθμίζονταν κάποιος επιδραστικός παράγοντας όπως ο έλεγχος της κίνησης (με την εισαγωγή καθυστέρησης στην αμεσότητα της πλοήγησης), ο ρεαλισμός (αφαίρεση σκιών – ανέμου), η ακουστική ανατροφοδότηση, ο βαθμός απόσπασης από το περιβάλλον (LCD ή HMD). Τα σενάρια διαρκούσαν 1,5 λεπτό στο καθένα και τα βιοσήματα καταγράφονταν καθώς οι συμμετέχοντες ακολουθούσαν την πορεία που υποδεικνυόταν με τυχαία εμφάνιση μανιταριών. Από τα εγκεφαλογραφήματα υπολογίστηκαν μια σειρά από παραμέτρους (η μέση ισχύς του σήματος, η ισχύς του σε διάφορες περιοχές συχνοτήτων, η εντροπία, η ασυμμετρία, ο συντονισμός σε επιλεγμένες ομάδες ηλεκτροδίων). Παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στην ισχύ (power) και το συντονισμό (coherence) του EEG. Η καταστολή της αποσπαστικότητας αύξησε τη συνοχή στις κροταφικές και οπτικές περιοχές για τις συχνότητες βήτα και γάμα, τονίζοντας τον ενισχυμένο αισθητηριακό συγχρονισμό. Η καταστολή του ρεαλισμού οδήγησε σε μείωση της συνοχής στην ζώνη θήτα μεταξύ των περιοχών της δεξιάς και της αριστεράς παραρρητικής, υποδεικνύοντας διαταραγμένη αναπαράσταση του χώρου. Η περιοχή του κροτάφου παρουσίασε συνέπεια σε διάφορα σενάρια, με αυξημένη δραστηριότητα στις ζώνες βήτα και γάμα κατά τη διάρκεια της καταστολής της αποσπαστικότητας και της συμμετοχής. Αυτό υποδηλώνει έναν πιθανό ρόλο της νήσου του Ράιλ (insula) στην εμπειρία της παρουσίας. Η περιοχή της παραρρητικής παρουσίασε αλλαγές στην ισχύ των ζωνών θήτα και άλφα που υποδεικνύουν διαταραγμένη επεξεργασία χώρου και αισθητηριακή κατάτμηση κατά τη διάρκεια της καταστολής του ρεαλισμού. Η μετωπιαία περιοχή παρουσίασε σημαντικές αλλαγές στη συνοχή των ζωνών βήτα και θήτα κατά τη διάρκεια της καταστολής του ελέγχου, τονίζοντας τον ρόλο του μετωπιαίου λοβού στον γνωστικό έλεγχο και την αισθητηριακή ολοκλήρωση. Η περιοχή του κροτάφου αναδείχθηκε ως κρίσιμος κόμβος για την παρουσία, πιθανώς αντανακλώντας την προσπάθεια του εγκεφάλου να ενσωματώσει τα αισθητηριακά ερεθίσματα και να παρακολουθεί τις προσπάθειες της προσοχής στον πραγματικό κόσμο. Οι μεταβολές στην ισχύ και τη συνοχή του EEG συσχετίστηκαν με την καταστολή συγκεκριμένων παραγόντων (π.χ., ρεαλισμός, ακουστική ανατροφοδότηση), δείχνοντας ότι η νευρωνική δραστηριότητα μετατοπίζεται καθώς αλλάζουν τα επίπεδα παρουσίας.

Η μελέτη των Saha et al. (2024) διερεύνησε την ανίχνευση της παρουσίας στην εικονική πραγματικότητα μέσω μηχανικής μάθησης και ψυχοφυσιολογικών δεδομένων (EEG, EDA) σε

συνδυασμό με αυτοαναφορές. Δημιουργήθηκαν τρία σενάρια (Χαμηλής, Μέτριας, Υψηλής Παρουσίας) με διαφοροποιήσεις σε γραφικά, ήχο, διαδραστικότητα και φυσική συμμετοχή. Οι συμμετέχοντες βίωσαν διαδοχικά τα τρία περιβάλλοντα και αξιολόγησαν την αίσθηση παρουσίας μέσω του ερωτηματολογίου iPQ55. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η Υψηλή Παρουσία συνδέθηκε με αυξημένη δραστηριότητα θ και β κυμάτων στην προμετωπιαία περιοχή, η Μέτρια Παρουσία με υψηλότερη β δραστηριότητα στις μετωπιαίες περιοχές, ενώ η Χαμηλή Παρουσία παρουσίασε μειωμένη θ δραστηριότητα, υποδηλώνοντας χαμηλότερη συμμετοχή. Η μελέτη κατέδειξε ότι οι δείκτες EEG μπορούν να ανιχνεύσουν αντικειμενικά τα επίπεδα παρουσίας στην VR.

Οι Kober et al. (2012) διερεύνησαν τις νευρωνικές βάσεις της χωρικής παρουσίας χρησιμοποιώντας πολυκαναλικό EEG σε διαδραστικό περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας. Συγκρίθηκαν δύο συστήματα VR: ένα υψηλής εμβύθισης (Single-Wall-VR, τρισδιάστατη προβολή, μεγάλη οθόνη) και ένα χαμηλότερης εμβύθισης (Desktop-VR, δισδιάστατη προβολή, μικρή οθόνη). Οι συμμετέχοντες εκτέλεσαν εργασία πλοήγησης σε έναν εικονικό λαβύρινθο και αξιολόγησαν την αίσθηση παρουσίας τους σε κλίμακα 5 βαθμίδων. Αναλύθηκαν η μείωση/αύξηση ισχύος στην μπάντα α (8–12 Hz) και η λειτουργική συνδεσιμότητα σε διάφορες συχνότητες. Το Single-Wall-VR συσχετίστηκε με αυξημένη αίσθηση παρουσίας, συνοδευόμενη από μεγαλύτερη μείωση ισχύος στην περιοχή του βρεγματικού λοβού, που υποδηλώνει ενεργοποίηση του φλοιού. Αντίθετα, η χαμηλότερη αίσθηση παρουσίας στο Desktop-VR συνδέθηκε με ισχυρότερη λειτουργική συνδεσιμότητα μεταξύ μετωπιαίων και βρεγματικών περιοχών, επισημαίνοντας τη σημασία της επικοινωνίας μεταξύ αυτών των περιοχών για την αίσθηση παρουσίας. Τα ευρήματα υποδεικνύουν θετική σχέση μεταξύ παρουσίας και ενεργοποίησης του βρεγματικού λοβού και αρνητική σχέση με την ενεργοποίηση του μετωπιαίου λοβού, επιβεβαιώνοντας αποτελέσματα παθητικών μη διαδραστικών μελετών VR.

Η μελέτη των Safikhani et al. (2024) εξέτασε την επίδραση του οπτικού ρεαλισμού σε εικονικά περιβάλλοντα (VEs) στη δραστηριότητα του εγκεφάλου και την αίσθηση παρουσίας. Συμμετέχοντες εκτέλεσαν την ίδια εργασία σε δύο VEs: ένα υψηλού ρεαλισμού και ένα χαμηλού ρεαλισμού. Οι υψηλότερες δραστηριότητες άλφα και γάμα στον μετωπιαίο και βρεγματικό λοβό, καθώς και η βελτιωμένη αισθητηριακή ενσωμάτωση, συνδέθηκαν με το περιβάλλον HP, υποδεικνύοντας μειωμένο γνωστικό φορτίο και αυξημένη προσοχή. Αντίθετα, το LP απαιτούσε μεγαλύτερη γνωστική προσπάθεια (αυξημένη δραστηριότητα βήτα). Οι

μεταβάσεις μεταξύ των περιβαλλόντων είχαν ταχύτερη προσαρμογή από το LP στο HP, υποδεικνύοντας ότι ο εγκέφαλος προσαρμόζεται γρηγορότερα σε ένα πιο ρεαλιστικό περιβάλλον. Η αίσθηση παρουσίας ενισχύθηκε από το HP, καθώς αυξήθηκαν η προσοχή, η αισθητηριακή ενσωμάτωση και η οπτική επεξεργασία, ενώ το LP οδήγησε σε μειωμένη συμμετοχή λόγω μεγαλύτερης γνωστικής προσπάθειας.

Η μελέτη των Bahavan et al. (2023) προσπάθησε να προσδιορίσει ένα τρόπο αντικειμενικής μέτρησης της παρουσίας, της ψευδαίσθησης τόπου (PI) και της ψευδαίσθησης πειστικότητας (PSI) σε εικονικά περιβάλλοντα (VR) μέσω ενός εγκεφαλογραφήματος. Οι ερευνητές αξιολόγησαν τις επιδράσεις των παραμέτρων εμβύθισης (Immersion) και συνοχής (Coherence) μέσω τεσσάρων σεναρίων VR που συνδύαζαν τα επίπεδα εμβύθισης και συνοχής και ανάλυσης του EEG. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παρουσία επηρεάστηκε από την εμβύθιση και τη συνοχή, με το σενάριο υψηλής εμβύθισης και υψηλής συνοχής (HCHI) να σχετίζεται με τις υψηλότερες βαθμολογίες παρουσίας. Η PI επηρεάστηκε κυρίως από την εμβύθιση, ενώ η PSI επηρεάστηκε από τη συνοχή. Οι αναλύσεις EEG αποκάλυψαν ότι η παρουσία σχετίζεται με αυξημένη δραστηριότητα θ και β , η PI με αυξημένη συνοχή α και δ , και η PSI με αυξημένη εντροπία δείγματος και υψηλότερη ισχύ γ . Τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι τα χαρακτηριστικά EEG, όπως η φασματική συνοχή και η εντροπία (ένα μέτρο που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση του πόσο προβλέψιμο ή μη είναι κάποια δεδομένα ή εκτίμησης της πολυπλοκότητας μιας χρονοσειράς δεδομένων), μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αντικειμενική μέτρηση της παρουσίας και να συμβάλλουν στον σχεδιασμό καλύτερων VR εμπειριών, ενσωματώνοντας ανατροφοδότηση EEG σε πραγματικό χρόνο.

Η μελέτη των Dey et al. (2020) διερεύνησε τις νευροφυσιολογικές επιδράσεις της παρουσίας σε ένα εικονικό περιβάλλον, συγκρίνοντας υψηλά και χαμηλά επίπεδα παρουσίας μέσω EEG και φυσιολογικών μετρήσεων. Οι συμμετέχοντες βίωσαν δύο περιβάλλοντα, ένα υψηλής παρουσίας (ΥΠ) και ένα χαμηλής παρουσίας (ΧΠ). Στο υψηλής παρουσίας, οι συμμετέχοντες αντιμετώπισαν υψηλή οπτική πιστότητα, αλληλεπίδραση με ζώα και έλεγχο της κίνησης του μέσου μεταφοράς, ενώ στο χαμηλής υπήρχε περιορισμένη οπτική πιστότητα και περιορισμένη αλληλεπίδραση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ΥΠ προκάλεσε υψηλότερη νευρική δραστηριότητα και καταστολή άλφα στον βρεγματικό λοβό, υποδεικνύοντας αυξημένη γνωστική συμμετοχή και εμπειρία παρουσίας. Αντίθετα, το ΧΠ προκάλεσε μεγαλύτερη δραστηριότητα στον ινιακό λοβό, αντικατοπτρίζοντας αυξημένο οπτικό φορτίο και προσπάθεια επεξεργασίας του λιγότερο εμβυθιστικού περιβάλλοντος. Τα υποκειμενικά

ερωτηματολόγια επιβεβαίωσαν ότι οι συμμετέχοντες στο ΥΠ ανέφεραν σημαντικά υψηλότερη αίσθηση παρουσίας.

Η μελέτη των Christofi et al. (2018) επικεντρώθηκε στη διερεύνηση της αίσθησης παρουσίας σε ένα σύστημα VR που σχεδιάστηκε για την εκπαίδευση εκπαιδευτικών σε θέματα χρήσης ουσιών στα σχολεία. Εξετάστηκε επίσης αν η εμπειρία του σεναρίου VR από διαφορετικές οπτικές γωνίες (εκπαιδευτικός, μαθητής-χρήστης ή υγιής μαθητής) επηρεάζει το επίπεδο παρουσίας. Συμμετείχαν 25 άτομα (κυρίως εκπαιδευτικοί), οι οποίοι χωρίστηκαν σε δύο ομάδες, βιώνοντας την προοπτική είτε του εκπαιδευτικού και του μαθητή-χρήστη είτε του εκπαιδευτικού και του υγιούς μαθητή. Η αίσθηση παρουσίας μετρήθηκε μέσω ερωτηματολογίων, EEG και παρακολούθησης του καρδιακού παλμού. Τα αποτελέσματα έδειξαν μέτρια αίσθηση παρουσίας, με ισχυρότερη συμμετοχή στις οπτικές των μαθητών, και αυξημένη δραστηριότητα στον βρεγματικό λοβό για τους μαθητές. Η ανάλυση καρδιακού παλμού έδειξε αυξημένη διέγερση κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η εκπαίδευση μέσω VR μπορεί να ενισχύσει την αίσθηση παρουσίας και ενσυναίσθησης, αν και η εξοικείωση με την τεχνολογία είναι κρίσιμος παράγοντας.

Η μελέτη των Magosso et al. (2019) διερεύνησε πώς οι άλφα ρυθμοί (alpha power) επηρεάζονται από την κατεύθυνση της προσοχής (εξωτερική ή εσωτερική) και την πολυπλοκότητα της εργασίας, συνδυάζοντας πειράματα εκτός και εντός εικονικής πραγματικότητας (VR). Στο πρώτο ερευνητικό ερώτημα (πείραμα 1), δύο καθήκοντα που απαιτούσαν εσωτερική και εξωτερική προσοχή (αριθμητική και ανάγνωση) έδειξαν ότι η εξωτερική οπτική προσοχή μειώνει τους άλφα ρυθμούς, με μεγαλύτερη μείωση σε πιο απαιτητικά καθήκοντα. Στο δεύτερο ερευνητικό ερώτημα (πείραμα 2), εντός VR, η εξωτερική προσοχή προκάλεσε επίσης μείωση των άλφα ρυθμών, ενώ μια εσωτερική αριθμητική εργασία αύξησε δραματικά την άλφα ισχύ, απομονώνοντας τους συμμετέχοντες από το περιβάλλον. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η άλφα ισχύς ρυθμίζει τη μετάβαση προσοχής μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών ερεθισμάτων και υπογραμμίζουν τη χρησιμότητα του συνδυασμού VR και EEG στη μελέτη των εγκεφαλικών ρυθμών και στην ανάπτυξη τεχνητών συστημάτων.

Η μελέτη των Vortmann et al. (2019) αντιμετωπίζει την πρόκληση που παρουσιάζεται στις εφαρμογές Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR), όπου τα εικονικά αντικείμενα μπορούν να διαταράξουν την εσωτερική προσοχή του χρήστη. Οι ερευνητές σχεδίασαν ένα πείραμα με μια εργασία ευθυγράμμισης σε δύο συνθήκες: εξωτερικά κατευθυνόμενη και εσωτερικά κατευθυνόμενη προσοχή. Κατά τη διάρκεια της εργασίας, καταγράφηκε EEG με 16 κανάλια και χρησιμοποιήθηκε για ένα έργο δυαδικής ταξινόμησης. Με βάση τα χαρακτηριστικά ισχύος

σε συχνοτικές ζώνες, εκπαιδεύτηκε ένας ταξινομητής Linear Discriminant Analysis με ακρίβεια ~85.37% στο test data ($\pm 11.27\%$, 6 συμμετέχοντες $> 90\%$, 3 = 100%). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι εφικτή η διάκριση των δύο καταστάσεων με απλές μεθόδους μηχανικής μάθησης, ανεξάρτητα από την ταχύτητα κίνησης ή τον φόρτο εργασίας. Συμπερασματικά, η εκτίμηση σε πραγματικό χρόνο της εσωτερικής και εξωτερικής προσοχής σε περιβάλλον AR φαίνεται εφικτή.

Η μελέτη των Benedek et al. (2014) χρησιμοποίησε δύο δοκιμασίες αποκλίνουσας σκέψης, μέσω μια απλής εφαρμογής σε υπολογιστή, και διερεύνησε τη λειτουργική σημασία της αύξησης της ισχύος των άλφα κυμάτων στο EEG, ένα εύρημα που συχνά παρατηρείται σε καθήκοντα μνήμης και αποκλίνουσας σκέψης. Συγκρίθηκαν δύο καθήκοντα αποκλίνουσας σκέψης: ένα που βασίζεται σε διαδικασίες «bottom-up» (σύνδεση με αισθητηριακά ερεθίσματα) και ένα που δεν εξαρτάται από αυτές. Οι συνθήκες με υψηλές απαιτήσεις εσωτερικής επεξεργασίας αύξησαν την άλφα ισχύ μόνο στο αισθητηριακό καθήκον, ενώ το καθήκον ανεξαρτησίας από αισθητηριακά ερεθίσματα έδειξε υψηλή άλφα ισχύ ανεξάρτητα από τη συνθήκη. Επιπλέον, η εστιασμένη εσωτερική προσοχή προκάλεσε αύξηση της άλφα ισχύος στις δεξιές βρεγματικές περιοχές, υποδηλώνοντας πιθανή αναστολή της κοιλιακής προσοχιακής δικτύωσης, η οποία ενισχύει την εκτελεστική λειτουργία και προλαμβάνει τη διάσπαση από μη σχετική διέγερση σε απαιτητικά γνωστικά καθήκοντα.

Η μελέτη των Cooper et al. (2014) εξέτασε τη λειτουργική σημασία του α ρυθμού (8.1–12 Hz) στο EEG, συσχετίζοντάς τον με διαδικασίες προσοχής. Παρότι ο α -ρυθμός παραδοσιακά συνδέεται με «αδράνεια του φλοιού» (cortical idling), προτάθηκε ότι υποδεικνύει ενεργή αναστολή αισθητηριακής πληροφορίας κατά την εσωτερική κατεύθυνση της προσοχής, όπως στη νοητική απεικόνιση. Νεότερες θεωρίες επεκτείνουν αυτήν την ιδέα, προτείνοντας ότι ο α -ρυθμός αναστέλλει μη σχετικές περιοχές του φλοιού, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της προσοχής. Με δύο πειράματα, μέσω της προβολής οπτικών ερεθισμάτων στην οθόνη ενός υπολογιστή, εξετάστηκε η σχέση του α -ρυθμού με την εσωτερική και εξωτερική προσοχή μέσω παραδειγμάτων νοητικής απεικόνισης και αισθητηριακής πρόσληψης. Τα αποτελέσματα έδειξαν μεγαλύτερες α -συχνότητες κατά την εσωτερική προσοχή και αυξημένο γνωστικό φορτίο, υποστηρίζοντας τη θεωρία της ενεργής αναστολής και όχι την έννοια της φλοιώδους αδράνειας.

Η μελέτη των Wimmer et al. (2025) εξετάζει τη δυναμική του εγκεφάλου κατά την επεξεργασία ασυνεπούς πληροφορίας σε περιβάλλον επαυξημένης πραγματικότητας (AR), όπου οι ασυνέπειες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την εμπειρία του χρήστη.

Χρησιμοποιώντας ένα διαδραστικό παράδειγμα με κύβο του Ρούμπικ, παρουσιάστηκαν στους συμμετέχοντες σύμφωνες και ασύμφωνες πληροφορίες σχετικά με την κατάστασή του, μέσω συμβολικών (αριθμοί) και μη συμβολικών (διαγράμματα) αναπαραστάσεων. Η ανάλυση των εγκεφαλικών σημάτων (EEG) από 19 συμμετέχοντες αποκάλυψε την εμφάνιση των N400 και P600 συνιστωσών στα κεντρο-βρεγματικά κανάλια κατά την επεξεργασία ασύμφωνης πληροφορίας, με αυξημένες καθυστερήσεις για μη συμβολικά ερεθίσματα. Επιπλέον, εξετάστηκε η δυνατότητα αξιοποίησης αυτών των επιδράσεων για διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή (BCIs), με τη χρήση γραμμικής διακριτικής ανάλυσης, υποστηρικτικών μηχανών διανυσμάτων (SVM) και EEGNet, επιτυγχάνοντας συγκρίσιμες αποδόσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ανίχνευση ασυμφωνιών μέσω φυσιολογικών σημάτων είναι εφικτή, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τη δημιουργία προσαρμοστικών και πιο συνεκτικών συστημάτων AR.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αναδεικνύει την αξία των εγκεφαλικών μετρήσεων σε περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας με στόχο τη μελέτη της παρουσίας και άλλων γνωστικών διεργασιών όπως η προσοχή, ο γνωστικός φόρτος, κ.α. Οι μελέτες σε περιβάλλοντα επαυξημένης πραγματικότητας είναι ελάχιστες. Αυτό το έλλειμα της βιβλιογραφίας οδήγησε στην παρούσα μελέτη.

ΜΕΡΟΣ Β' – ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Εισαγωγή

Η διασταύρωση των επιστημών της νευροεπιστήμης και της εκπαίδευσης έχει οδηγήσει στην ανάδυση του διεπιστημονικού πεδίου της εκπαιδευτικής νευροεπιστήμης, το οποίο ενσωματώνει ευρήματα από τη νευροεπιστήμη, την ψυχολογία και την παιδαγωγική, προκειμένου να κατανοήσει πώς μαθαίνει ο εγκέφαλος και πώς αυτή η γνώση μπορεί να βελτιώσει τη διδακτική πράξη (Ansari et al., 2012). Το πεδίο αυτό γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ των βιολογικών μηχανισμών μάθησης και του παιδαγωγικού σχεδιασμού, αξιοποιώντας εμπειρικά δεδομένα για τη βελτίωση θεωριών μάθησης, τον εντοπισμό πρώιμων μαθησιακών δυσκολιών και την υποστήριξη τεκμηριωμένων παρεμβάσεων. Οι εφαρμογές καλύπτουν ευρύ φάσμα περιοχών, όπως η ανάγνωση (Maurer et al., 2009), η μαθηματική σκέψη, ο έλεγχος της προσοχής (Dikker et al., 2017), η μνήμη και νευροαναπτυξιακές διαταραχές όπως η ΔΕΠΥ.

Παρότι η νευροεπιστήμη δεν παρέχει ακόμα άμεσες διδακτικές στρατηγικές, προσφέρει θεμελιώδεις γνώσεις για τους μηχανισμούς μάθησης, όπως η συναπτική πλαστικότητα, οι ευαίσθητες περίοδοι και οι εμπειριοεξαρτώμενες αλλαγές (Goswami, 2004).

Η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει διάφορες πτυχές της μαθησιακής απόδοσης των μαθητών (Akçayır & Akçayır, 2017), συμπεριλαμβανομένης της επίδοσης, της κινητοποίησης και της στάσης τους απέναντι στη μάθηση. Μελέτες δείχνουν ότι η AR ενισχύει την εκπαιδευτική απόδοση παρέχοντας διαδραστικές και ελκυστικές εμπειρίες (Chang et al., 2014). Οι μαθητές συχνά αναπτύσσουν θετική στάση απέναντι στις δραστηριότητες μάθησης μέσω AR, καθώς μαθαίνουν με παιγνιώδη τρόπο (Lu & Liu, 2014). Η AR έχει βρεθεί ότι ενσωματώνοντας κατάλληλο πολυμεσικό περιεχόμενο μειώνει το περιττό γνωστικό φορτίο και διευκολύνει την κατανόηση των μαθητών (Chiang et al., 2014a).

Η AR επίσης αυξάνει την κινητοποίηση και τη δέσμευση των μαθητών, παρέχοντας άμεσες και σχετικές πληροφορίες, μειώνοντας την ανάγκη αναζήτησης εκπαιδευτικού υλικού. Η ενσωμάτωση βίντεο και τρισδιάστατων εικόνων κάνει τη μάθηση πιο διαδραστική και κατανοητή. Επιπλέον, οι μαθητές βρίσκουν τη χρήση της AR πιο ικανοποιητική από τη συμβατική διδασκαλία στην τάξη. Μελέτες υποστηρίζουν ότι η AR μπορεί να μειώσει το γνωστικό φορτίο και να ενισχύσει τη χωρική ικανότητα, αν και αυτά τα ευρήματα χρειάζονται περαιτέρω έρευνα.

Όσον αφορά την παιδαγωγική συνεισφορά, η AR έχει βρεθεί ότι αυξάνει την απόλαυση και τη δέσμευση στη μάθηση (Sánchez & Vázquez., 2023). Η ενσωμάτωση παιχνιδιών AR καθιστά τη μάθηση πιο διασκεδαστική και διαδραστική (Ibáñez et al., 2014; Lu & Liu, 2014). Η καθοδήγηση μέσω κινητής AR βοηθά τους μαθητές να αποδίδουν καλύτερα και να αναλαμβάνουν μεγαλύτερη ευθύνη για τη μάθησή τους (Chang et al., 2014). Ορισμένες μελέτες προτείνουν επίσης ότι η AR μπορεί να ενισχύσει το ενδιαφέρον για μάθηση και τη συνεργατική μάθηση, ειδικά σε υβριδικά περιβάλλοντα που συνδυάζουν ψηφιακά και φυσικά στοιχεία (Garzón et al., 2019).

Η AR επίσης διευκολύνει την αλληλεπίδραση μεταξύ μαθητών, δασκάλων και εκπαιδευτικού υλικού. Η AR βοηθά τους μαθητές να οπτικοποιήσουν πολύπλοκες ή αφηρημένες έννοιες, επιτρέποντάς τους να κατανοήσουν ευκολότερα δύσκολες επιστημονικές ιδέες, όπως η κίνηση των ηλεκτρονίων ή τα μαγνητικά πεδία.

Ωστόσο, η πολυπλοκότητα των περιβαλλόντων επαυξημένης πραγματικότητας (AR) μπορεί να εισάγει προκλήσεις που επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση των χρηστών. Η πληθώρα εικονικών πληροφοριών σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον AR μπορεί να οδηγήσει σε γνωστική υπερφόρτωση, δυσκολεύοντας την επεξεργασία και την αποθήκευση σημαντικών δεδομένων (Gebhardt et al., 2019). Επιπλέον, οι αλληλεπιδράσεις στην AR είναι ευάλωτες στο φαινόμενο της προσοχής σε σήραγγα (attention tunneling) όπου οι χρήστες εστιάζουν υπερβολικά σε συγκεκριμένα στοιχεία του εκάστοτε έργου, παραμελώντας άλλες σημαντικές πληροφορίες ή συμβάντα του περιβάλλοντος (Syiem et al., 2020, 2021). Ως εκ τούτου, ενώ η AR προσφέρει πλούσιες αλληλεπιδράσεις και προηγμένες απεικονίσεις δεδομένων που διευκολύνουν τη διαδικασία κατανόησης, οι περιορισμοί στην προσοχή μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη συνολική απόδοση των χρηστών.

Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές δισδιάστατες διεπαφές, η επαυξημένη πραγματικότητα επιτρέπει την παρουσίαση ερεθισμάτων με χωρικά και χρονικά δυναμικό τρόπο, καθιστώντας την ιδιαίτερα κατάλληλη για τη μελέτη της εννοιολογικής μάθησης σε φυσικά περιβάλλοντα (Billingham et al., 2015). Όταν συνδυάζεται με ηλεκτροεγκεφαλογραφία, η επαυξημένη πραγματικότητα ανοίγει νέους δρόμους για την κατανόηση των νευρωνικών μηχανισμών που διέπουν την αντίληψη, την προσοχή και τη μάθηση.

Η παραδοσιακή έρευνα με χρήση εγκεφαλογραφημάτων διεξάγεται κυρίως σε εργαστηριακά περιβάλλοντα. Με σκοπό τη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ εργαστηρίου και πραγματικών εκπαιδευτικών συνθηκών, προτείνεται η χρήση φορητών νευροαπεικονιστικών τεχνολογιών

όπως το φορητό EEG (Janssen et al., 2021). Οι φορητές EEG συσκευές επιτρέπουν την καταγραφή της εγκεφαλικής δραστηριότητας σε φυσικά περιβάλλοντα αν και περιορίζονται από παράγοντες όπως η μειωμένη κάλυψη της επιφάνειας του κρανίου, οι παρεμβολές από την κίνηση ή τον ιδρώτα, ενώ περιορισμένη έως ανύπαρκτη είναι και η δυνατότητα καθαρισμού των σημάτων λόγω των περιορισμένων περιοχών που συλλέγονται δεδομένα. Μελέτες πάντως έχουν δείξει ότι υπό προϋποθέσεις παρέχουν ποιότητα σήματος συγκρίσιμη με τα παραδοσιακά συστήματα (Edwards & Trujillo, 2021). Με χρήση τέτοιων συσκευών έρευνες συνδέουν την αύξηση στη βήτα (~13–30 Hz) και στη θήτα (~3–8 Hz) δραστηριότητα, καθώς και μείωση στην άλφα (~8–12 Hz), με αυξημένη προσοχή (Engel & Fries, 2010; Fiebelkorn & Kastner, 2019). Στο χρονικό επίπεδο, ERP όπως τα N2 (200–300 ms) και P300 (300–500 ms) σχετίζονται με επιλεκτική προσοχή και λήψη αποφάσεων (Luck et al., 2000).

Σκοπός της έρευνας

Σκοπός της μελέτης είναι να διερευνήσουμε αν η επαυξημένη πραγματικότητα δημιουργεί ένα περιβάλλον παρουσίασης μαθησιακών αντικειμένων που οδηγεί τους μαθητές σε ενεργητική συμμετοχή.

Να διερευνήσουμε πώς ο εγκέφαλος κάθε μαθητή αποκρίνεται σε απρόσμενα συμβάντα κατά τη μελέτη φυσικών φαινομένων. Η παρούσα μελέτη αξιοποιεί την υψηλή χρονική ανάλυση του εγκεφαλογραφήματος και ιδιαίτερα των προκλητών δυναμικών. Συγκεκριμένα μελετάται το νευρολογικό αποτύπωμα της γνωστικής επεξεργασίας των μαθητών κατά τη διάρκεια εντοπισμού παραβιάσεων νόμων της φυσικής, όπως η παραβίαση του νόμου της βαρύτητας. Τέτοια σενάρια προκαλούν σφάλματα πρόβλεψης στον εγκέφαλο, αντανakλώντας την ασυμφωνία μεταξύ αισθητηριακής εισόδου και εσωτερικών μοντέλων αναπαράστασης των φυσικών νόμων. Τα δυναμικά C1, P100/N100, αντανakλούν την πρώιμη αισθητηριακή καταγραφή που μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την ένταση της αναπάντεχης κίνησης (Näätänen & Picton, 1987). Αντίστοιχα, τα δυναμικά P200/P300 αποτελούν καθιερωμένους δείκτες γνωστικής αξιολόγησης και κατανομής της προσοχής, με το πλάτος τους να αυξάνεται όταν οι συμμετέχοντες εντοπίζουν σημαντικά ή νέα ερεθίσματα (Polich, 2007). Θα εξετάσουμε λοιπόν πως διαφοροποιούνται τα τυπικά χαρακτηριστικά αυτών των δυναμικών (πλάτος, λανθάνων χρόνος) σε κάθε μαθητή για να εξετάσουμε πως εξελίσσεται η γνωστική επεξεργασία σε καθέναν από αυτούς και πως αυτά δικαιολογούν και σχετίζονται με την ταχύτητα και την ακρίβεια της απόκρισης.

Να διερευνήσουμε πώς ο εγκέφαλος επηρεάζεται και προσαρμόζει τη λειτουργία του όταν κατά τη διάρκεια μιας εργασίας στα μαθηματικά, στο περιβάλλον υπάρχουν περισπασμοί και ποιες οι επιπτώσεις των περισπασμών αυτών στην απόδοση και την ταχύτητα απόκρισης των μαθητών. Η επίλυση εξισώσεων απαιτεί παρατεταμένη προσοχή και λειτουργική μνήμη — γνωστικοί πόροι που είναι ευάλωτοι σε παρεμβολές. Οι περισπασμοί μπορεί να περιλαμβάνουν κινούμενα αντικείμενα, περιβαλλοντικούς ήχους ή εικονικούς πράκτορες άσχετους με το έργο. Το εγκεφαλογράφημα μπορεί να ανιχνεύσει πώς αυτοί οι περισπασμοί επηρεάζουν την προσοχή, μέσω φασματικής ανάλυσης των εγκεφαλικών ρυθμών και κυρίως της ζώνης άλφα (8–12 Hz), η οποία μειώνεται — ή αποσυγχρονίζεται — όταν αυξάνεται η γνωστική συμμετοχή και η προσοχή (Klimesch, 1999; Foxe & Snyder, 2011).

Με τη μελέτη προκλητών δυναμικών και της φασματικής ανάλυσης, η παρούσα εργασία προσφέρει μια ολοκληρωμένη ηλεκτροεγκεφαλική απεικόνιση του πώς τα περιβάλλοντα επαυξημένης πραγματικότητας επηρεάζουν την κατανόηση εννοιών και την εκτέλεση γνωστικών έργων. Πέρα από τις θεωρητικές προεκτάσεις, τα ευρήματα έχουν πρακτική σημασία για τον σχεδιασμό νευροπροσαρμοστικών εκπαιδευτικών συστημάτων, στα οποία οι δείκτες EEG σε πραγματικό χρόνο (π.χ. απουσία του P300 ή μειωμένος αποσυγχρονισμός στην άλφα) μπορούν να ενεργοποιούν παιδαγωγική υποστήριξη ή προσαρμογές στο περιβάλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

7.1 Μεθοδολογία

7.1.1 Ερευνητικοί άξονες και ερωτήματα

Η διασταύρωση της νευροεπιστήμης και της εκπαίδευσης έχει δώσει ώθηση στον διεπιστημονικό τομέα της νευροεκπαίδευσης, ή εκπαιδευτικής νευροεπιστήμης, ο οποίος επιδιώκει να συγκεντρώσει γνώσεις από τη νευροεπιστήμη, την ψυχολογία και την παιδαγωγική για να κατανοήσει καλύτερα πώς ο εγκέφαλος μαθαίνει και πώς αυτή η κατανόηση μπορεί να ενημερώσει την εκπαιδευτική πρακτική (Ansari et al., 2012). Αυτή η αναδυόμενη επιστήμη γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ των βιολογικών διαδικασιών μάθησης και του σχεδιασμού της διδασκαλίας, αξιοποιώντας εμπειρικά δεδομένα του εγκεφάλου για να βελτιώσει τις εκπαιδευτικές θεωρίες, να εντοπίσει δυσκολίες μάθησης σε πρώιμο στάδιο και να υποστηρίξει παρεμβάσεις που βασίζονται σε αποδείξεις. Οι εφαρμογές της εκτείνονται σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της ανάγνωσης (Maurer et al., 2009), της μαθηματικής συλλογιστικής, του ελέγχου της προσοχής (Dikker et al., 2017), της μνήμης και νευροαναπτυξιακών καταστάσεων όπως η ΔΕΠΥ.

Η νευροεπιστήμη δεν παρέχει ακόμη άμεσες στρατηγικές διδασκαλίας. Ένα από τα εργαλεία της όμως, η ηλεκτροεγκεφαλογραφία, προσφέρει ένα μη επεμβατικό παράθυρο στα στάδια της γνωστικής επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο, ιδιαίτερα με τη χρήση δυναμικών που σχετίζονται με γεγονότα (ERPs) — καταγράφοντας τις νευρικές αντιδράσεις που συγχρονίζονται χρονικά με ερεθίσματα. Η νευροεπιστήμη παρέχει θεμελιώδεις γνώσεις για αυτήν την εξέλιξη, βασισμένες σε μηχανισμούς όπως η συναπτική πλαστικότητα, οι ευαίσθητες περίοδοι και οι αλλαγές που εξαρτώνται από την εμπειρία (Goswami, 2004). Δυναμικά όπως τα C1, N100, P200 και P300 έχουν μελετηθεί ευρέως σε σχέση με την πρώιμη οπτική επεξεργασία, τη αισθητηριακή διάκριση, την αντίληψη και τη γνωστική ενημέρωση (Luck, 2014; Polich, 2007). Για παράδειγμα, το P300 έχει συνδεθεί με την κατανομή της προσοχής και τη σημασία του ερεθίσματος, ενώ το N100 αντανακλά τον πρώιμο φιλτράρισμα της αίσθησης και της προσοχής (Kok, 2001; Gevins & Smith, 2000). Αυτοί οι νευρικοί δείκτες έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμοι για τη μελέτη της προσοχής, του φόρτου εργασίας, της

εμπλοκής και της παρακολούθησης σφαλμάτων κατά τη διάρκεια εργασιών μάθησης (Brouwer et al., 2014).

Η ιεραρχική φύση της επεξεργασίας πληροφοριών στον εγκέφαλο περιγράφει πώς ο εγκέφαλος μετασχηματίζει τις ακατέργαστες αισθητηριακές πληροφορίες σε όλο και πιο αφηρημένες και σημαντικές αναπαραστάσεις μέσω μιας ακολουθίας διασυνδεδεμένων σταδίων.

Το πρώτο στάδιο, γνωστό ως στάδιο φυσικής επεξεργασίας, περιλαμβάνει την πρώιμη αισθητηριακή κωδικοποίηση βασικών χαρακτηριστικών του ερεθίσματος, όπως η φωτεινότητα, η αντίθεση, η χωρική συχνότητα στην όραση και ο τόνος ή ο χρόνος ανόδου στην ακοή. Στοιχεία ERP όπως τα C1, P1 και N1 αντανakλούν αυτό το στάδιο. Το C1 (40–90 ms), που προέρχεται από τον πρωτογενή οπτικό φλοιό (V1), ιστορικά θεωρήθηκε αναίσθητο στην διαμόρφωση μέσω της προσοχής (Anllo-Vento & Hillyard, 1996; Clark & Hillyard, 1996), αλλά πρόσφατα στοιχεία δείχνουν επιδράσεις της προσοχής υπό συγκεκριμένες συνθήκες, όπως υψηλός φόρτος αντίληψης ή εργασίες που βασίζονται σε χαρακτηριστικά (Kelly et al., 2008; Fu et al., 2009; Prasad et al., 2023). Μια μετα-ανάλυση από τους Qin et al. (2022) επιβεβαίωσε μέτρια διαμόρφωση της προσοχής στο C1, υποδηλώνοντας ότι η πρώιμη αισθητηριακή επεξεργασία δεν είναι αυστηρά προώθηση. Ομοίως, το N1 (50–150 ms) σηματοδοτεί την πρώιμη διάκριση και την επιλογή της προσοχής, επηρεαζόμενη από χαρακτηριστικά όπως ο χρόνος ανόδου του ήχου και το διάστημα μεταξύ ερεθισμάτων (Thomson et al., 2009; Rosburg & Mager, 2021) και διαμορφώνεται από αλλαγές στο περιβάλλον (Varghese et al., 2017). Μελέτες για την αισθητηριακή μάθηση έχουν δείξει μειώσεις στο πλάτος του C1 και του N1 μετά την εκπαίδευση, υποδεικνύοντας νευρική πλαστικότητα (Ahmadi et al., 2018).

Το δεύτερο στάδιο, το δομικό ή στοιχειακό στάδιο επεξεργασίας, περιλαμβάνει την ενσωμάτωση αυτών των χαμηλού επιπέδου χαρακτηριστικών σε συνεκτικές αισθητηριακές αναπαραστάσεις, όπως σχήματα, ρυθμούς ή υφές. Αυτό το στάδιο αντιπροσωπεύεται από τα στοιχεία ERP N2, P200, P3 και P3b. Το στοιχείο N2 αντανakλά την ανίχνευση ανομοιομορφιών στα μοτίβα και την αισθητηριακή ενσωμάτωση, με μεγαλύτερα πλάτη για πιο πολύπλοκα ερεθίσματα (Courchesne et al., 1975; Ragazzoni et al., 2019). Το P200 (180–280 ms) σχετίζεται με την κατανομή της προσοχής και την πρώιμη αξιολόγηση, με το πλάτος του να διαμορφώνεται από τη δυσκολία της αντίληψης και τις απαιτήσεις προσοχής (Rozyński et al., 2015; Mizrahi et al., 2024; Portella et al., 2012). Έχει επίσης συνδεθεί με την ευφυΐα και τη γνωστική ευελιξία (Morris et al., 1995; Wongupparaj et al., 2018). Το στοιχείο P3/P3b (300–600 ms), κεντρικό για τη γνωστική αξιολόγηση και την ενημέρωση της εργαζόμενης

μνήμης, αντανακλά την κατανομή των νοητικών πόρων και την ενημέρωση της σημασίας του ερεθίσματος (Polich, 2007; Picton, 1992; Duncan et al., 1982; Ullsperger et al., 1988). Το πλάτος του αυξάνεται με την πολυπλοκότητα της εργασίας και τη μάθηση (Ahmadi et al., 2018), και έχει συνδεθεί με την επιτυχή ανάκτηση της μνήμης, την επίλυση προβλημάτων και την εκτελεστική λειτουργία (Qiu et al., 2008; Paynter et al., 2009; Wongupparaj et al., 2018).

Το τρίτο στάδιο, το στάδιο επεξεργασίας πληροφοριών, περιλαμβάνει τη σημασιολογική ερμηνεία, τη σχετικότητα της εργασίας και την αφηρημένη γνωστική λειτουργία. Εμπλέκει ευρείες νευρικές δικτυώσεις, συμπεριλαμβανομένου του προμετωπιαίου και του κροταφικο-βρεγματικού φλοιού, και αντιπροσωπεύεται από το στοιχείο ERP N400.

Συνολικά, αυτά τα προκλητά δυναμικά αντανακλούν ένα στρωματοποιημένο, ιεραρχικό πλαίσιο για την κατανόηση της εγκεφαλικής λειτουργίας, από την πρώιμη αισθητηριακή εγγραφή (C1/N1) έως τη δομική ενσωμάτωση (N2/P2/P3), έως τη σημασιολογική κατανόηση (N400). Αυτό το μοντέλο δείχνει επίσης την αλληλεπίδραση μεταξύ των διεργασιών από κάτω προς τα πάνω και από πάνω προς τα κάτω, όπως φαίνεται στη διαμόρφωση της προσοχής στο C1 και τις αλλαγές που πραγματοποιούνται μέσω εκπαίδευσης στο N1 και το P3 (Fu et al., 2009; Ahmadi et al., 2018).

Σε εκπαιδευτικά πλαίσια, οι δείκτες ERP έχουν δείξει χρησιμότητα στον εντοπισμό και την παρακολούθηση των διαδικασιών μάθησης και των δυσκολιών. Για παράδειγμα, μεταβολές στα πλάτη N170/N250 έχουν παρατηρηθεί σε παιδιά με δυσλεξία κατά τη διάρκεια εργασιών οπτικής αναγνώρισης λέξεων, ενώ η λανθάνουσα χρονική διάρκεια του P3 έχει χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του γνωστικού φόρτου σε εργασίες μαθηματικών που βασίζονται στην Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) (Mesárošová et al., 2017). Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά των ERP προσφέρουν πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα της αντίληψης, τη συμμετοχή της προσοχής και την εκτελεστική λειτουργία, υποστηρίζοντας την εφαρμογή τους στην αξιολόγηση και την προσαρμογή των εκπαιδευτικών παρεμβάσεων (Brouwer et al., 2012; Kok, 2001; Gevins & Smith, 2000).

Ιστορικά, οι μελέτες EEG και ERP περιορίζονταν σε ελεγχόμενα εργαστηριακά περιβάλλοντα, περιορίζοντας την οικολογική τους εγκυρότητα. Ωστόσο, πρόσφατες εξελίξεις στην κινητή τεχνολογία εγκεφαλογράφων επιτρέπουν τώρα την παρακολούθηση των γνωστικών και συναισθηματικών καταστάσεων σε φυσιολογικά περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων των σχολικών τάξεων και των περιβαλλόντων μάθησης που ενισχύονται με AR (Janssen et al., 2021). Ασύρματα, φορητά συστήματα επιτρέπουν τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό

χρόνο, χωρίς παρεμβολές, κατά τη διάρκεια της μάθησης, διευκολύνοντας δυναμικές αξιολογήσεις του νοητικού φόρτου, της προσοχής και του συναισθήματος. Σε συνδυασμό με νέες μεθόδους αυτά τα εργαλεία γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ της νευροεπιστήμης και της πραγματικής εκπαίδευσης, ανοίγοντας το δρόμο για προσαρμοστικές, νευρο-ενημερωμένες τεχνολογίες μάθησης που είναι και καθηλωτικές και εξατομικευμένες.

Ταυτόχρονα, η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) έχει αναδειχθεί ως ένα μετασχηματιστικό εκπαιδευτικό εργαλείο, που επιτρέπει πολυτροπικές και καθηλωτικές εμπειρίες μάθησης που βελτιώνουν την συμμετοχή, την επίδοση και την εννοιολογική κατανόηση των μαθητών (Akçayır & Akçayır, 2017; Chang et al., 2014). Κάνοντας υπέρθεση διαδραστικών ψηφιακών στοιχείων στο φυσικό περιβάλλον, η AR συμβάλλει στην απεικόνιση αφηρημένων ιδεών και στην παιγνιοποίηση της μάθησης, ενισχύοντας τόσο την ατομική εμπλοκή όσο και τη συνεργατική επίλυση προβλημάτων (Ibáñez et al., 2014; Garzón et al., 2019). Ωστόσο, ο πλούτος των περιβαλλόντων AR εισάγει γνωστικές προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένου του γνωστικού υπερφόρτου, του φαινομένου της σήραγγας της προσοχής και της δυσκολίας στο φιλτράρισμα των σχετικών με την εργασία ερεθισμάτων (Gebhardt et al., 2019; Syiem et al., 2021).

Οι τεχνολογίες AR και Εικονικής Πραγματικότητας (VR) όλο και περισσότερο αποδεικνύουν την αξία τους ως διαδραστικά εργαλεία για την εκπαίδευση, ειδικά λόγω της οικονομικής πλέον πρόσβασης σε εμβυθιστικές συσκευές. Συνδυάζοντας αυτές τις τεχνολογίες με ανατροφοδότηση από τα εγκεφαλογραφήματα σε πραγματικό χρόνο, μελέτες όπως το έργο "AR Constructor" δείχνουν πώς μια τέτοια ολοκλήρωση μπορεί να ενισχύσει την ψηφιακή μάθηση, ιδιαίτερα σε τεχνικούς τομείς όπως η κατασκευή (Mesárošová et al., 2017). Η προσοχή, ως βασικός γνωστικός παράγοντας, παίζει κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση πληροφοριών και τη μάθηση. Bos et al. (2019) έδειξαν ότι η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR), σε σύγκριση με τις παραδοσιακές εκπαιδευτικές διεπαφές, μπορεί να ενισχύσει τη συγκέντρωση των μαθητών, όπως καταδεικνύεται μέσω της παρακολούθησης της προσοχής με βάση την ηλεκτροεγκεφαλογραφία, υποδεικνύοντας υψηλότερη γνωστική εμπλοκή.

Η τεχνολογική υποδομή των μαθησιακών περιβαλλόντων AR είναι επίσης σημαντική. Herpich et al. (2017) πραγματοποίησαν μια συγκριτική ανάλυση έντεκα πλαισίων AR, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι τα Wikitude και Vuforia ήταν τα πιο κατάλληλα για εκπαιδευτικούς σκοπούς, λόγω της υποστήριξής τους σε χαρακτηριστικά όπως η παρακολούθηση χωρίς δείκτες (markerless tracking), ο γεωεντοπισμός (geolocation) και οι φιλικές προς τον χρήστη πλατφόρμες δημιουργίας περιεχομένου. Παρά τις υποσχέσεις της AR,

οι Wu και συν. (2013) και Akçayır και συν. (2017) επισημαίνουν τους περιορισμούς της, όπως η τεχνική πολυπλοκότητα, η εξάρτηση από συσκευές και η ανεπαρκής παιδαγωγική ενσωμάτωση. Παρόλα αυτά, τα εκπαιδευτικά οφέλη της AR—ιδιαίτερα όσον αφορά την εμπλοκή, την κατανόηση του χώρου και τη διαδραστικότητα—παραμένουν ισχυρά. Συγκεκριμένες εφαρμογές περιλαμβάνουν την οπτικοποίηση της μοριακής δομής στη χημεία (Cai και συν., 2014), την εκμάθηση ανατομίας μέσω αλληλεπίδρασης με 3D όργανα (Jamali και συν., 2015) και την καλλιέργεια της χωρικής σκέψης στη γεωμετρία με εργαλεία AR όπως το Construct3D (Kaufmann, 2006).

Από τη σκοπιά της γνωστικής νευροεπιστήμης, η κατανόηση των ταχέων νευρικών μηχανισμών στη μάθηση είναι κρίσιμη. Τα Προκλητά Δυναμικά (ERPs) προσφέρουν χρονικά ακριβείς γνώσεις για τις γνωστικές διεργασίες που δεν είναι προσβάσιμες μέσω συμπεριφορικών μετρήσεων (Paradis & Mercier, 2021). Ιεραρχικά μοντέλα νευρικής επεξεργασίας—που εκτείνονται από στοιχειώδη έως προχωρημένα στάδια—βοηθούν στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι μαθητές αντιλαμβάνονται, ερμηνεύουν και αποκρίνονται σε ερεθίσματα σε περιβάλλοντα AR. Παρά τα παραπάνω, η ενσωμάτωση των ERPs με την AR στην εκπαίδευση παραμένει ανεξερεύνητη, παρουσιάζοντας μια πολύτιμη ευκαιρία για μελλοντική έρευνα.

Στο πλαίσιο της εκπαίδευσης K–12, ο εκπαιδευτικός αντίκτυπος της AR έχει μελετηθεί εκτενώς. Οι Maas και Hughes (2020) παρέχουν μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των εφαρμογών της σε επιστήμες, μαθηματικά, εκμάθηση γλωσσών και πολιτισμικές σπουδές. Στις επιστήμες, η AR υποστηρίζει την οπτικοποίηση πολύπλοκων φαινομένων, όπως οι μοριακές αλληλεπιδράσεις και τα ανατομικά συστήματα (Cheng & Tsai, 2013; Küçük και συν., 2016; Lin και συν., 2016). Στα μαθηματικά, η AR ενισχύει τη χωρική σκέψη και βελτιώνει την επίλυση προβλημάτων επιτρέποντας τη χειραγώγηση εικονικών γεωμετρικών αντικειμένων (Ferrer-Torregrosa και συν., 2015; Ibáñez και συν., 2014). Η ανάπτυξη γλωσσικών δεξιοτήτων και γραμματισμού επίσης ευνοείται από την AR μέσω διαδραστικής αφήγησης και ενίσχυσης του λεξιλογίου (Liu & Tsai, 2013; Bacca και συν., 2014), ενώ η πολιτισμική μάθηση εμπλουτίζεται μέσω ψηφιακών αναπαραστάσεων ιστορικών και πολιτιστικών χώρων, αυξάνοντας την ενσυναίσθηση των μαθητών και την κατανόηση καταστάσεων (Wojciechowski & Cellary, 2013).

Επιπλέον, η AR υποστηρίζει ποικίλους μαθησιακούς τύπους—οπτικούς, ακουστικούς, κιναισθητικούς—και προάγει την ενσωμάτωση μαθητών με ειδικές ανάγκες (Radu, 2014; Sirakaya & Cakmak, 2018). Παρ' όλα αυτά, εμπόδια όπως η ανεπαρκής εκπαίδευση των

εκπαιδευτικών, οι τεχνολογικοί περιορισμοί των συσκευών και ο κίνδυνος γνωστικής υπερφόρτωσης συνεχίζουν να επηρεάζουν τη μαζική υιοθέτηση της AR στην εκπαίδευση (Akçayır & Akçayır, 2017; Radu, 2014).

Για να κατανοήσουν καλύτερα τις γνωστικές και συναισθηματικές αντιδράσεις των μαθητών σε καθηλωτικά περιβάλλοντα, οι ερευνητές έχουν ενσωματώσει την Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) με την ηλεκτροεγκεφαλογραφία (EEG). Οι ζώνες συχνότητας της EEG προσφέρουν μετρήσιμους δείκτες των νοητικών καταστάσεων: η καταστολή των α-ρυθμών (alpha suppression) συνδέεται με εξωτερικά κατευθυνόμενη προσοχή, ενώ η αύξηση της δραστηριότητας στις θήτα (theta) και βήτα (beta) συχνότητες αντικατοπτρίζει αυξημένη γνωστική προσπάθεια και νοητικό φόρτο εργασίας (Engel & Fries, 2010; Fiebelkorn & Kastner, 2019; Magosso και συν., 2019). Για παράδειγμα, οι Vortmann και συν. (2019) χρησιμοποίησαν φασματική ανάλυση EEG για να ταξινομήσουν την εσωτερική έναντι της εξωτερικής προσοχής κατά τη διάρκεια ενός έργου ευθυγράμμισης σε περιβάλλον AR, επιτυγχάνοντας υψηλή ακρίβεια και αποκαλύπτοντας δυναμικές μεταβολές της προσοχής. Παρομοίως, οι Wimmer και συν. (2025) χρησιμοποίησαν δείκτες ERP, όπως το N400 και το P600, για να ανιχνεύσουν σημασιολογικές συγκρούσεις κατά τη συμβολική μάθηση σε περιβάλλον AR, δείχνοντας πώς τα νευρικά σήματα μπορούν να αποτυπώσουν στιγμές γνωστικής σύγκρουσης και επανερμηνείας σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον, η τεχνολογία φορητών EEG επιτρέπει την αξιολόγηση των συναισθηματικών καταστάσεων των μαθητών σε πραγματικό χρόνο, οι οποίες είναι κρίσιμες για το κίνητρο και την αποτελεσματικότητα της μάθησης. Η ασυμμετρία των α-ρυθμών στο μετωπιαίο λοβό (frontal alpha asymmetry) αποτελεί έναν καλά τεκμηριωμένο δείκτη συναισθηματικής διάθεσης, με την αυξημένη δραστηριότητα στο αριστερό μετωπιαίο ημισφαίριο να αντιστοιχεί σε θετικό συναίσθημα και υψηλότερο κίνητρο (Davidson, 2004; Dornhege και συν., 2016). Αυτό ανοίγει τον δρόμο για προσαρμοστικά μαθησιακά συστήματα που προσωποποιούν τη διδασκαλία με βάση τόσο τη γνωστική εμπλοκή όσο και την συναισθηματική ανατροφοδότηση.

Η σύζευξη της EEG με τις τεχνολογίες Διεπαφής Εγκεφάλου-Υπολογιστή (BCI) επιτρέπει περαιτέρω την εξατομίκευση των μαθησιακών παρεμβάσεων. Οι BCI μπορούν να παρέχουν νευροανάδραση (neurofeedback) για να εκπαιδεύσουν τους μαθητές να αυτορυθμίζουν την προσοχή τους. Για παράδειγμα, οι παρεμβάσεις που βασίζονται σε BCI έχουν αποδειχθεί ότι βοηθούν μαθητές με ΔΕΠΥ (ADHD) να αυξήσουν τη δραστηριότητα στη βήτα (beta) συχνότητα και να μειώσουν τη δραστηριότητα στη θήτα (theta), οδηγώντας σε βελτίωση της

προσοχής και των ακαδημαϊκών επιδόσεων (López και συν., 2019). Άλλες προσεγγίσεις νευροανάδρασης που στοχεύουν στη ρύθμιση των α- και β-ρυθμών έχουν συσχετιστεί με βελτιωμένη απόδοση σε εργασίες και μείωση του άγχους (Hegarty και συν., 2018).

Παρ' όλα αυτά, απαιτείται προσοχή στην εφαρμογή των ευρημάτων της νευροεπιστήμης στην εκπαίδευση. Ακαδημαϊκοί όπως οι Bruer (1997) και Bowers (2016) έχουν προειδοποιήσει για την ύπαρξη "νευρο-μύθων" και αναγωγιστικών ερμηνειών που υπεραπλουστεύουν τις πολύπλοκες γνωστικές διαδικασίες. Οι Thomas και Ansari (2019) υποστηρίζουν ένα διεπιστημονικό, αμφίδρομο μοντέλο, στο οποίο οι εκπαιδευτικές προκλήσεις πληροφορούν την έρευνα στη νευροεπιστήμη και το αντίστροφο. Αυτό το ολοκληρωμένο πλαίσιο υποστηρίζεται περαιτέρω από τον Mayer (2017), ο οποίος τονίζει τον διαμεσολαβητικό ρόλο της εκπαιδευτικής ψυχολογίας στη μετάφραση των ευρημάτων της νευροεπιστήμης σε αποτελεσματικές πρακτικές διδασκαλίας. Μια τέτοια ισορροπημένη προσέγγιση είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη τεχνολογιών και μεθόδων εκπαίδευσης που είναι ταυτόχρονα επιστημονικά τεκμηριωμένες και παιδαγωγικά ορθές.

Η σχέση μεταξύ της αίσθησης παρουσίας σε εικονικά περιβάλλοντα (VEs) και της κατανομής της προσοχής έχει διερευνηθεί εκτενώς μέσω νευροφυσιολογικών μεθόδων, ιδιαίτερα με τη χρήση της ηλεκτροεγκεφαλογραφίας (EEG), συχνά με τη χρήση ακουστικών oddball παραδειγμάτων για την αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο κατανέμονται οι γνωστικοί πόροι. Μία κεντρική υπόθεση υποστηρίζει ότι η αυξημένη παρουσία συσχετίζεται με αυξημένη προσοχή στο εικονικό περιβάλλον, μειώνοντας τους διαθέσιμους πόρους για την επεξεργασία εξωτερικών ερεθισμάτων, όπως καταδεικνύεται από την εξασθένιση των συνιστωσών των προκλητών δυναμικών (ERP) και τις τροποποιήσεις της φασματικής ισχύος (Kober & Neuper, 2012; Burns & Fairclough, 2015; Savalle et al., 2024). Οι μελέτες που χρησιμοποιούν oddball έργα παρατηρούν συχνά μειωμένα πλάτη των καθυστερημένων ERP συνιστωσών, όπως τα αργά κύματα (SW1, SW2) και το P300, σε συνθήκες υψηλής παρουσίας, ιδιαίτερα στις μετωπιαίες-κεντρικές περιοχές (Fz, Cz), υποδηλώνοντας μειωμένη προσοχή σε εξωτερικά ερεθίσματα (Kober & Neuper, 2012; Terkildsen & Makrasky, 2019; Grassini et al., 2021). Για παράδειγμα, οι Savalle και συν. (2024) έδειξαν ότι οι διακοπές στην αίσθηση παρουσίας προκάλεσαν υψηλότερα πλάτη του P300 στα κεντρο-βρεγματικά ηλεκτρόδια (Cz, FC1, CP2), αντικατοπτρίζοντας αυξημένη προσοχή σε πραγματικά ερεθίσματα, ενώ η αδιάκοπη παρουσία συσχετίστηκε με χαμηλότερα πλάτη P300 και υψηλότερα αυτοαναφερόμενα επίπεδα παρουσίας. Παρομοίως, η εξασθένιση των συνιστωσών N1 και MMN σε ομάδες υψηλής

παρουσίας ενισχύει την άποψη της καταστολής της αυτόματης επεξεργασίας εξωτερικών ακουστικών ερεθισμάτων (Terkildsen & Makrinsky, 2019; Grassini et al., 2021).

Οι φασματικές αναλύσεις αποκαλύπτουν διακριτά μοτίβα ταλαντώσεων που σχετίζονται με την αίσθηση παρουσίας. Οι συνθήκες υψηλής παρουσίας συχνά συσχετίζονται με καταστολή των α -ρυθμών (8–12 Hz) στις βρεγματικές περιοχές, γεγονός που υποδηλώνει ενεργοποίηση του φλοιού και αισθητηριακή εμπλοκή, όπως παρατηρείται σε καθηλωτικά περιβάλλοντα VR όπως το Single-Wall-VR (Kober et al., 2012; Dey et al., 2020). Αντίθετα, περιβάλλοντα χαμηλής παρουσίας, όπως τα desktop-based VR, παρουσιάζουν ισχυρότερη λειτουργική συνδεσιμότητα μεταξύ μετωπιαίων και βρεγματικών περιοχών, υποδεικνύοντας αντισταθμιστικούς μηχανισμούς για τη μειωμένη εμπύθιση (Kober et al., 2012). Η αυξημένη συνοχή στις βήτα (13–30 Hz) και γάμμα (>30 Hz) συχνότητες σε κροταφικές και οπτικές περιοχές κατά τη διάρκεια συνθηκών υψηλής παρουσίας υπογραμμίζει τον ρόλο της πολυαισθητηριακής ενσωμάτωσης, ενώ η μειωμένη συνοχή των θήτα (4–7 Hz) συχνοτήτων στις βρεγματικές περιοχές κατά την καταστολή του ρεαλισμού υποδεικνύει διαταραχές στην επεξεργασία του χώρου (M. Athif et al., 2020; Safikhani et al., 2024). Η ισχύς των θήτα και βήτα ρυθμών στις προμετωπιαίες περιοχές λειτουργεί επίσης ως διακριτικός δείκτης των επιπέδων παρουσίας, με τις καταστάσεις υψηλής παρουσίας να συνδέονται με αυξημένη δραστηριότητα θήτα και πολυαισθητηριακή συνοχή (Saha et al., 2024; Bahavan et al., 2023).

Η πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος και η πιστότητα των αισθητηριακών ερεθισμάτων επηρεάζουν κρίσιμα την αίσθηση παρουσίας. Η πολυαισθητηριακή διέγερση (π.χ., οπτικοακουστικά και απτικά ερεθίσματα) ενισχύει την παρουσία και ενδυναμώνει τις αποκρίσεις P300, ιδιαίτερα υπό συνθήκες υψηλού γνωστικού φόρτου, όπως παρατηρείται σε προσομοιώσεις οδήγησης με ομίχλη και βροχή (Marucci et al., 2021). Παρομοίως, περιβάλλοντα υψηλού ρεαλισμού (HP) μειώνουν τη γνωστική προσπάθεια (χαμηλότερη ισχύς βήτα) και βελτιώνουν την κατανομή της προσοχής σε σχέση με περιβάλλοντα χαμηλού ρεαλισμού (LP), τα οποία απαιτούν μεγαλύτερη ενεργοποίηση του φλοιού (Safikhani et al., 2024). Η δυσκολία της εργασίας και το αντιληπτικό φορτίο επηρεάζουν περαιτέρω την παρουσία, με πιο δύσκολες εργασίες να μειώνουν τα πλάτη των αργών κυμάτων (SW) στις μετωπιαίες περιοχές, αν και τα HMDs και τα LCDs παρουσιάζουν συγκρίσιμα αποτελέσματα στα ERP, υπογραμμίζοντας τη σημασία του περιεχομένου σε σχέση με τον τύπο απεικόνισης (Burns & Fairclough, 2015).

Οι α -ρυθμοί (8–12 Hz) συνδέονται με τη ρύθμιση της προσοχής, όπου η εσωτερική εστίαση (π.χ., νοητική αριθμητική) αυξάνει την ισχύ των α -ρυθμών, απομονώνοντας τους χρήστες από

το εικονικό περιβάλλον, ενώ η εξωτερική εστίαση την καταστέλλει, διευκολύνοντας την αισθητηριακή ενσωμάτωση (Magosso et al., 2019; Cooper et al., 2014). Αυτή η τροποποίηση μπορεί να αξιοποιηθεί σε συστήματα επαυξημένης πραγματικότητας (AR), όπου οι ταξινομητές μηχανικής μάθησης διακρίνουν τις καταστάσεις εσωτερικής/εξωτερικής προσοχής μέσω της ισχύος των α -ρυθμών με ακρίβεια ~85% (Vortmann et al., 2019). Επιπλέον, η ασυμφωνία πληροφοριών σε περιβάλλοντα AR προκαλεί τις συνιστώσες N400/P600 στις κεντρο-βρεγματικές περιοχές, αντικατοπτρίζοντας τη νευρωνική ανίχνευση ασυνεπειών (Wimmer et al., 2025).

Παραδοσιακά, η έρευνα στα ERP επικεντρώνεται στην απομόνωση συγκεκριμένων συνιστωσών για τη μελέτη επιμέρους νευρικών μηχανισμών. Ωστόσο, υποστηρίζουμε μια μεθοδολογική στροφή που αναγνωρίζει τα εγγενώς διαδοχικά στάδια επεξεργασίας του εγκεφάλου και την ανάγκη κατανόησης των αλληλεπιδράσεων στον χρόνο. Αυτή η έρευνα υιοθετεί ένα ιεραρχικό, πολυ-συνιστωσιακό πλαίσιο για τη χαρτογράφηση της δυναμικής προόδου της νευρικής επεξεργασίας – από την πρώιμη αισθητηριακή κωδικοποίηση (π.χ., C1/N1) έως τις ανώτερες γνωστικές διεργασίες (P300).

Η παρούσα μελέτη συνδυάζει την υψηλή χρονική ανάλυση της EEG με τις καθηλωτικές δυνατότητες της AR για να εξετάσει πώς οι μαθητές επεξεργάζονται απρόβλεπτα γεγονότα. Μέσα από την ανάλυση των ERP συνιστωσών της εγκεφαλικής δραστηριότητας κατά τη μάθηση με AR, αυτή η έρευνα στοχεύει στην εμβάθυνση της κατανόησης της κατανομής προσοχής, του γνωστικού φόρτου και της εμπλοκής σε φυσικά εκπαιδευτικά περιβάλλοντα. Τα ευρήματα αυτά θα συμβάλουν στον ευρύτερο στόχο της νευροεκπαίδευσης, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη προσαρμοστικών, τεκμηριωμένων εκπαιδευτικών εργαλείων που ανταποκρίνονται δυναμικά στις γνωστικές και συναισθηματικές καταστάσεις των μαθητών.

Το πρώτο ερευνητικό ερώτημα έχει ως εξής:

«Με ποια σειρά από γνωστικές και νευρολογικές αντιδράσεις ο εγκέφαλος προσπαθεί να επεξεργαστεί και να κατανοήσει μια μη φυσιολογική ή μη αναμενόμενη συμπεριφορά του περιβάλλοντος πριν αντιδράσει;»

Για να τις εντοπίσουμε θα αξιοποιήσουμε τη χωροχρονική δυναμική των προκλητών δυναμικών μέσω ενός πειράματος τύπου oddball σε περιβάλλον επαυξημένης πραγματικότητας (AR) και σχετίζεται με την μη αναμενόμενη συμπεριφορά κατά την πτώση σφαιρών.

Στη βιβλιογραφία που προαναφέραμε υπάρχουν σχετικές μελέτες, αλλά αυτές είναι περιορισμένες και μάλιστα ακόμη περισσότερο περιορισμένες σε περιβάλλοντα επαυξημένης πραγματικότητας σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα. Ακόμη οι περισσότερες εστιάζουν σε ένα μόνο μέρος της γνωστικής επεξεργασίας, συνήθως σε αυτό πριν την αντίδραση, ενώ η έρευνά μας επιδιώκει μια ολιστική προσέγγιση που ξεκινά από την αρχική σύλληψη και διαπερνώντας όλα τα στάδια, καταλήγει στην αντίδραση. Το πρώτο ερώτημα υλοποιείται με το πείραμα 1.

Το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα έχει ως εξής:

"Σε μια γνωστική εργασία μικρής δυσκολίας, όπως ο υπολογισμός του αποτελέσματος μιας μαθηματικής έκφρασης, ποια είναι η επίδραση, άσχετων με την εργασία, οπτικών ερεθισμάτων – περισπασμών στον περιβάλλοντα χώρο στην γνωστική κατάσταση, αλλά και στην ταχύτητα και ακρίβεια της εκτέλεσης της εργασίας;"

Η αξιολόγηση θα γίνει με ανάλυση και σύγκριση της ισχύος των εγκεφαλικών ρυθμών στις ζώνες συχνοτήτων (δέλτα, θήτα, άλφα, βήτα, γάμμα) μεταξύ των μαθητών που εκτελούν το ίδιο καθήκον χωρίς και με αποσπάσεις προσοχής.

Όταν υπάρχουν οπτικοί περισπασμοί γύρω από ένα άτομο που προσπαθεί να εκτελέσει μια γνωστική εργασία, όπως η επίλυση μαθηματικών εκφράσεων, ο εγκέφαλος εμπλέκεται σε μια σειρά από πολύπλοκες διεργασίες. Οι οπτικοί περισπασμοί ενεργοποιούν περιοχές όπως ο οπίσθιος βρεγματικός φλοιός (posterior parietal cortex) και ο προμετωπιαίος φλοιός (prefrontal cortex), οι οποίες εμπλέκονται στην κατανομή της προσοχής. Ανταγωνίζονται για γνωστικούς πόρους, μειώνοντας την ικανότητα συγκέντρωσης στην κύρια εργασία. Η παράλληλη επεξεργασία της κεντρικής εργασίας και των περισπασμών αυξάνει το γνωστικό φόρτο. Αυτό οδηγεί σε μείωση των διαθέσιμων πόρων εργασιακής μνήμης (working memory), καθιστώντας πιο δύσκολη την επεξεργασία πληροφοριών και τη διατήρηση αριθμητικών τιμών στο μυαλό. Το δεύτερο ερώτημα υλοποιείται με το πείραμα 2.

7.1.2 Δείγμα

Οι συμμετέχοντες στην έρευνα ήταν 25 μαθητές των τριών τάξεων του Λυκείου Πεδινής Ιωαννίνων (22 αγόρια και 3 κορίτσια). Αρχικά έγινε ενημέρωση των μαθητών για τη μορφή των πειραμάτων και ζητήθηκε από τους κηδεμόνες των παιδιών να υπογράψουν σχετικό έντυπο συγκατάθεσης συμμετοχής στην έρευνα. Κανένας από τους συμμετέχοντες δεν είχε

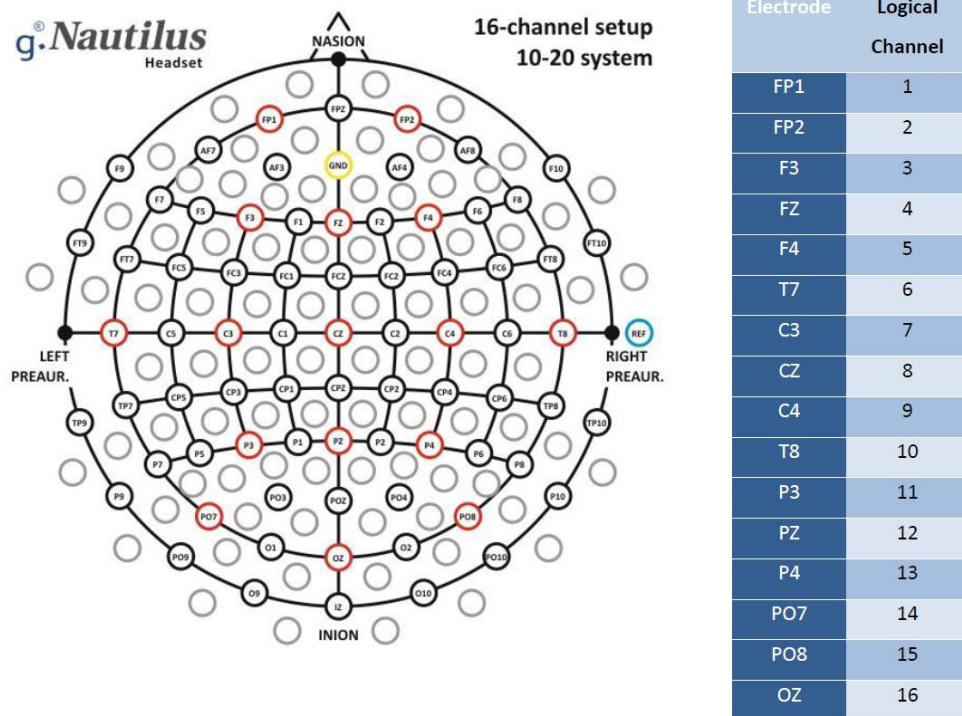
προηγούμενο ιστορικό ψυχικών διαταραχών. Όλοι είχαν κανονική ή κατάλληλα διορθωμένη όραση.

7.1.3 Πειραματική διάταξη

Για την καταγραφή των νευροφυσιολογικών σημάτων των συμμετεχόντων χρησιμοποιήθηκε ένα ασύρματο σύστημα καταγραφής EEG, το g. Nautilus Research, κατασκευασμένο από την g.tec Medical Engineering GmbH (Εικόνα 21). Το σύστημα αποτελείται από ένα κάλυμμα κεφαλής με δεκαέξι (16) ξηρά (dry) ηλεκτρόδια ['Fp1', 'Fp2', 'F3', 'Fz', 'F4', 'C3', 'Cz', 'C4', 'T7', 'T8', 'P3', 'Pz', 'P4', 'PO7', 'PO8', 'Oz'] που ήταν ομοιόμορφα κατανομημένα με βάση το σύστημα 10–20. Το σημείο αναφοράς ήταν το δεξιό μαστοειδές οστό και σαν γείωση το αριστερό μαστοειδές οστό (Εικόνα 22). Τα σήματα EEG ψηφιοποιήθηκαν με ανάλυση 24-bit και ρυθμό δειγματοληψίας στα 250 Hz. Κατά την εγγραφή των σημάτων εφαρμόστηκε φίλτρο διέλευσης 0.5-30Hz και notch filter 48-52Hz. Για κάθε συμμετέχοντα έγινε καταγραφή και απεικόνιση του εγκεφαλογραφήματος με το Simulink (Matlab) και αποθήκευσή του σε αρχείο τύπου Matlab για περαιτέρω επεξεργασία. Για κάθε συμμετέχοντα βρέθηκε το σημείο που αντιστοιχεί η θέση Cz, τοποθετήθηκε το καπέλο με τα προσαρτημένα ηλεκτρόδια, και προσδέθηκε σταθερά με κατάλληλο ιμάντα στο πηγούνι. Η επιλογή των θέσεων των ηλεκτροδίων έγινε σε μια προσπάθεια να καλύψουμε όσο το δυνατό μεγαλύτερη έκταση του εγκεφάλου.



Εικόνα 21: Ξηρά (dry) ηλεκτρόδια

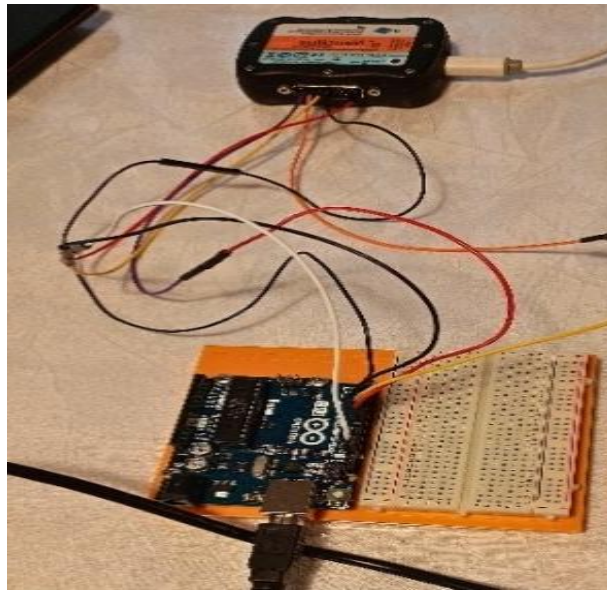


Εικόνα 22: Σημεία κάλυψης

Το σύστημα περιλαμβάνει επίσης μια ξεχωριστή βάση που λαμβάνει τα ψηφιοποιημένα σήματα μέσω ασύρματης μετάδοσης 2,4 GHz και τα αποστέλλει σε υπολογιστή μέσω θύρας USB (Εικόνα 23). Τα δεδομένα EEG που αποκτώνται από το g.Nautilus απεικονίζονται και επεξεργάζονται με το Simulink, ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται συχνά για δυναμική προσομοίωση.



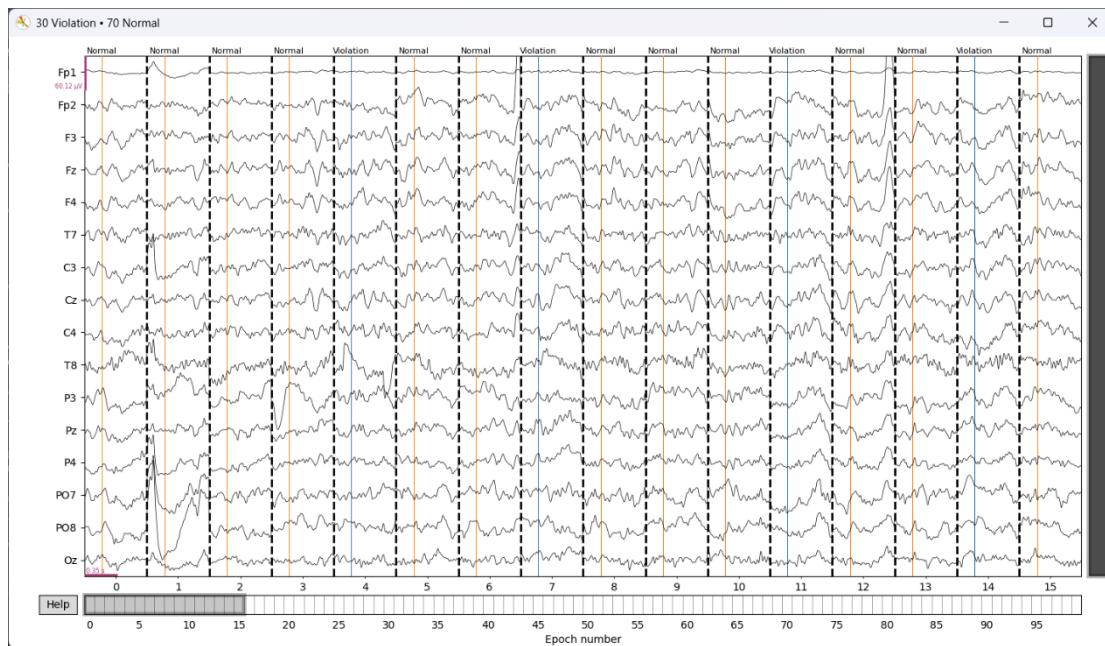
Εικόνα 23: g.tec nautilus research



Εικόνα 24: Συσκευή συγχρονισμού

Στα πειράματα που έχουν να κάνουν με προκλητά δυναμικά είναι απαραίτητο να υπάρχουν κατάλληλες υψηλού κόστους συσκευές για την παροχή/συγχρονισμό ερεθισμάτων. Είναι ειδικά σχεδιασμένες για να διασφαλίζουν τον συγχρονισμό των εξωτερικών ερεθισμάτων με τις καταγραφές εγκεφαλικής δραστηριότητας, διευκολύνοντας την ακριβή ανάλυση των δεδομένων. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε με χρήση κατάλληλου μικροελεγκτή (Arduino) συσκευή (Εικόνα 24) που συνδεόταν στον σταθμό βάσης στα κατάλληλα pin με καλώδια και μέσω λογισμικού που αναπτύξαμε είχαμε τη δυνατότητα με κατάλληλη κωδικοποίηση να καταγράφουμε γεγονότα (Εικόνα 25). Η αποστολή τους γινόταν μέσω της σειριακής θύρας.

Τα πειράματα παρουσιάστηκαν μέσω εφαρμογής επανυξημένης πραγματικότητας (AR) που αναπτύξαμε για αυτό το σκοπό με χρήση του λογισμικού Unity. Η android εφαρμογή παρουσιαζόταν μέσω μιας ταμπλέτας (Samsung Tab 7) εξαλείφοντας κάθε περιορισμό στο χώρο εφαρμογής έχοντας σαν φόντο την εικόνα του περιβάλλοντος χώρου και πραγματοποιήθηκε μέσα σε μια τάξη στην οποία σε πραγματικό χρόνο άλλοι μαθητές πραγματοποιούσαν εργασίες σε υπολογιστές.

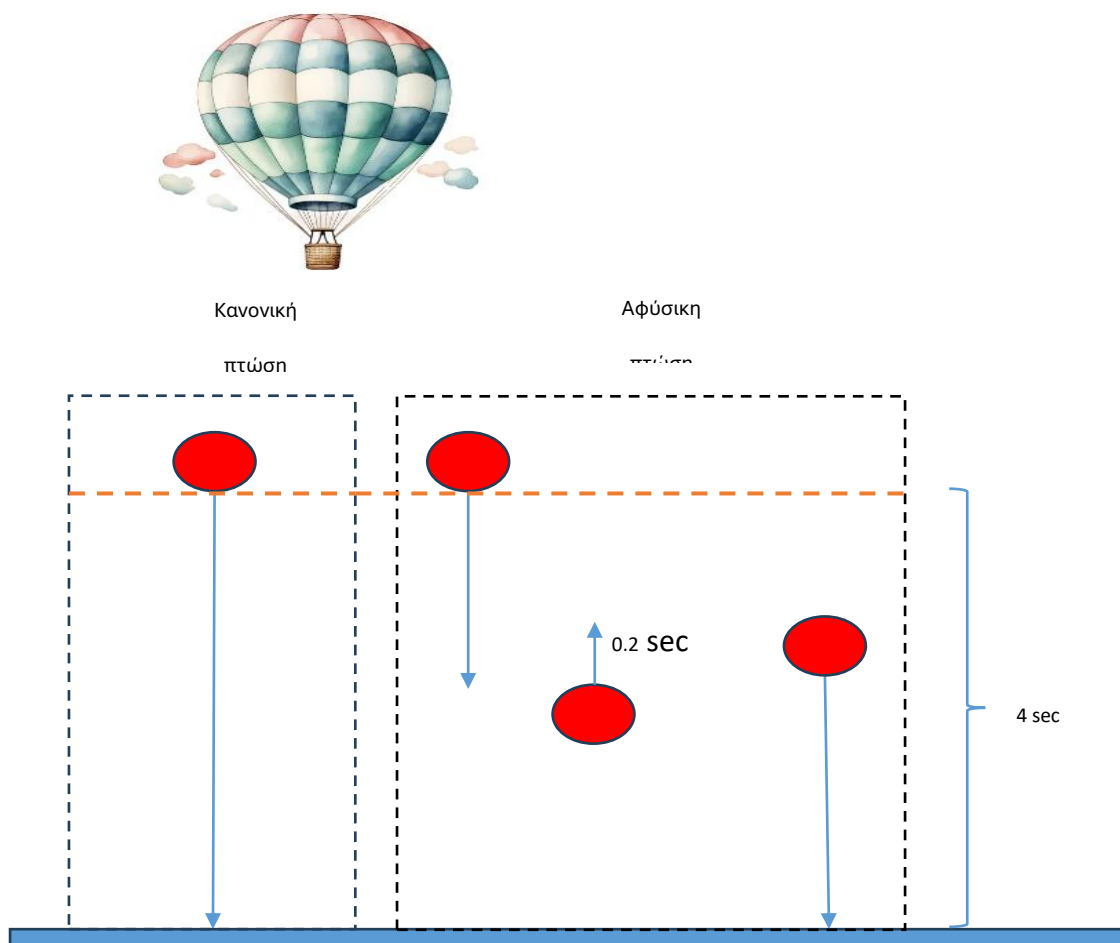


Εικόνα 25: Καταγραφή εγκεφαλογραφήματος με σήμανση σημαντικών γεγονότων

7.1.4 Διαδικασία

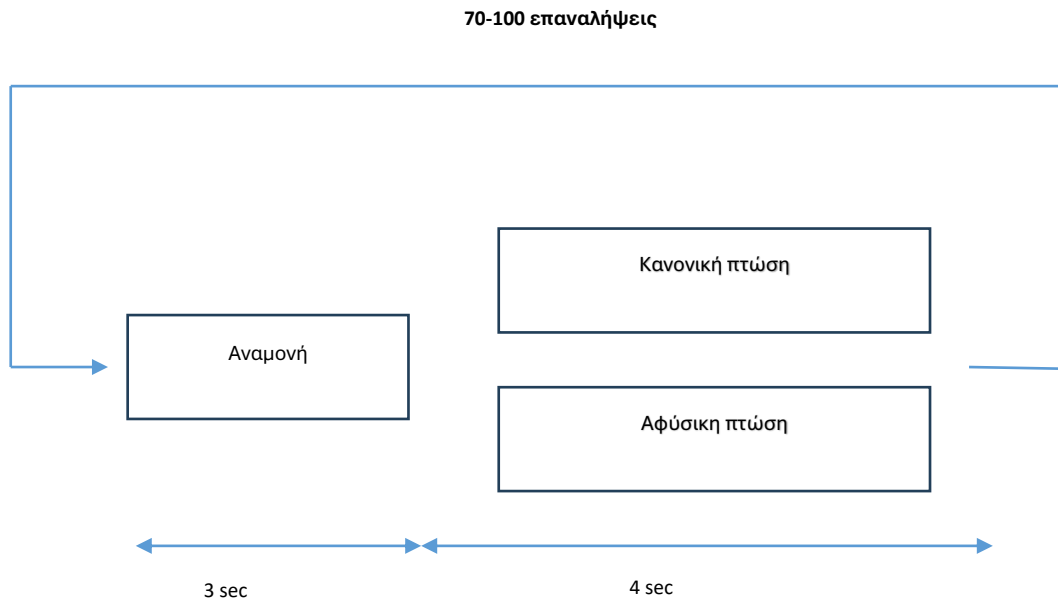
Πρώτο ερευνητικό ερώτημα (πείραμα 1)

Μέσω μιας εφαρμογής επαυξημένης πραγματικότητας που κατασκευάσαμε και παρουσιάστηκε σε ταμπλέτα, ένα ψηφιακά τοποθετημένο αερόστατο εμφανίζονταν μέσα στην τάξη, το οποίο καθώς έκανε μικρές κινήσεις απελευθέρωνε μπάλες. Η θέση που γινόταν η ρίψη όπως και η χρονική στιγμή ήταν τυχαίες (μέσα σε ένα εύρος). Οι μπάλες που έπεφταν ήταν δύο ειδών. Μπάλες που έπεφταν κανονικά υπό την επίδραση της βαρύτητας και μπάλες που σε κάποια στιγμή της πτώσης τους παραβίαζαν τους νόμους της φυσικής και για ένα μικρό χρονικό διάστημα (0.2 δευτερόλεπτα) κινούνταν προς τα πάνω πριν συνεχίσουν την πτώση τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Κάθε μαθητής καλούνταν σε αυτές και μόνο τις στιγμές που εντόπιζαν αυτή την ασυνέπεια να πατάνε ένα κουμπί στο πληκτρολόγιο. Το 70% των σφαιρών έπεφταν ομαλά και το 30% των σφαιρών παραβίαζαν τους νόμους της φυσικής κινούμενες αδικαιολόγητα προς τα πάνω. Η σειρά με την οποία εμφανίζονταν οι δύο τύποι σφαιρών ήταν τυχαία και είχε εξασφαλιστεί πως δεν θα υπήρχαν συνεχόμενα σφαίρες που παραβίαζαν την κίνηση.



Σχήμα 1 : Απεικόνιση του πρώτου πειράματος

Σε αυτό το πείραμα καταγράφονταν μέσω χρονοσφραγίδας, με ακρίβεια χιλιοστού του δευτερολέπτου, τόσο η χρονική στιγμή που συνέβαινε η παραβίαση και η κίνηση προς τα πάνω όσο και η χρονική στιγμή που ο μαθητής μέσω του πληκτρολογίου κατέγραφε την μεταβολή αυτή. Κάθε μαθητής συμμετείχε σε τουλάχιστον 70 δοκιμές πτώσης σφαιρών, με το πείραμα να εξελίσσεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 .



Σχήμα 2: Σχεδιάγραμμα εξέλιξης του πρώτου πειράματος

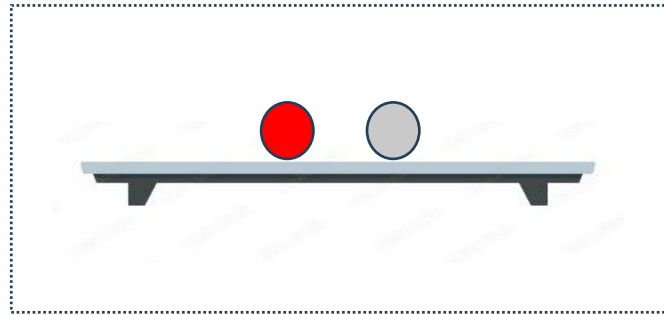
Δεύτερο ερευνητικό ερώτημα (πείραμα 2)

Δεύτερο ερευνητικό ερώτημα (πείραμα 2) Στο δεύτερο πείραμα πάλι με εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας (Unity – AR), με φόντο το χώρο της τάξης υπό την παρουσία άλλων μαθητών, οι μαθητές καλούνταν να υπολογίσουν το αποτέλεσμα μιας απλής μαθηματικής έκφρασης, τυχαία δημιουργημένης από το σύστημα, που περιελάμβανε τρεις ακέραιους μονοψήφιους αριθμούς και δύο τελεστές (έναν πολλαπλασιασμό και μία πρόσθεση ή αφαίρεση).

Η προβολή της έκφρασης γινόταν σε ένα ψηφιακά τοποθετημένο πίνακα (Σχήμα 3). Οι μαθητές σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που δεν μπορούσε να υπερβεί τα έξι δευτερόλεπτα επέλεξαν, μέσω του πληκτρολογίου, τη σωστή απάντηση μεταξύ τριών πιθανών απαντήσεων (1, 2, 3) που τους εμφάνιζε το σύστημα (Σχήμα 4). Μπορούσαν μέσα στο χρονικό διάστημα να διορθώσουν την επιλογή τους, με το σύστημα να καταγράφει σαν τελική απάντηση μόνο την τελευταία. Αν δεν απαντούσαν στο προκαθορισμένο διάστημα καταχωρούνταν το -1 που κωδικοποιήθηκε σαν μη απάντηση.

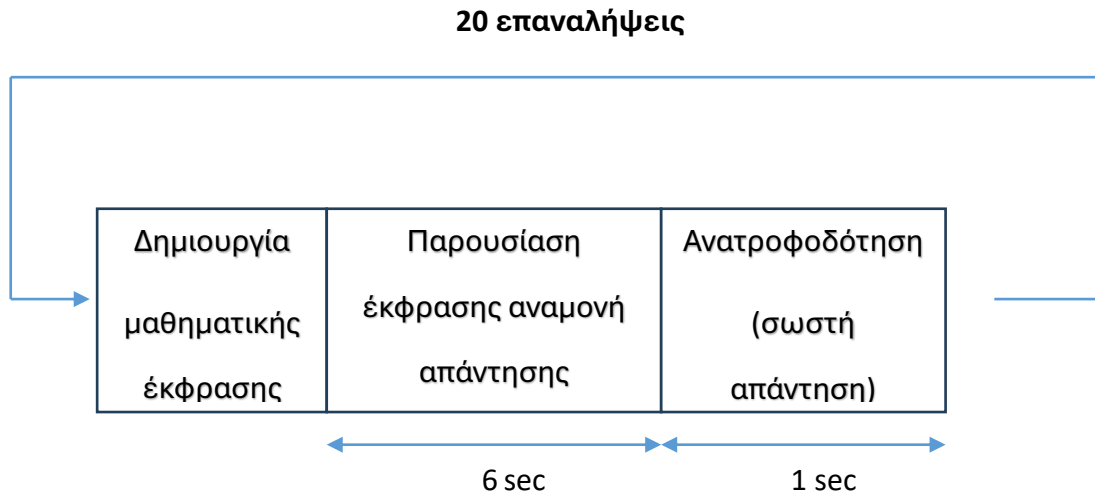
$$3 * 8 - 3$$

$$20 \quad 25 \quad 21$$



Σχήμα 3 : Απεικόνιση του δεύτερου πειράματος

Το πείραμα σχεδιάστηκε και πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση οι μαθητές έπρεπε να αποτιμήσουν σωστά την έκφραση, στη δεύτερη φάση επαναλαμβανόταν η ίδια διαδικασία, με διαφορετικές - ίδιας δυσκολίας εκφράσεις, αλλά αυτή τη φορά με σκοπό να αποσπαστεί η προσοχή τους, εμφανιζόταν κοντά στην έκφραση ένας ψηφιακά τοποθετημένος πάγκος πάνω στον οποίο συγκρούονταν σφαίρες που είχαν άλλοτε αναμενόμενη συμπεριφορά (συγκρούονταν και σταματούσαν) ή που παραβίαζαν τους νόμους της φυσικής και ανεξήγητα περνούσαν η μία μέσα από την άλλη ή άλλαζαν χρώμα μετά τη σύγκρουση. Οι συγκρούσεις εκτελούνταν αδιάκοπα χωρίς κάποιο συγχρονισμό με τις ερωτήσεις που έπρεπε πάλι να απαντηθούν στο ίδιο χρονικό όριο και με τον ίδιο τρόπο με την πρώτη φάση. Καταγράφονταν με ακρίβεια χιλιοστού του δευτερολέπτου η τυχαία παραγόμενη έκφραση και η στιγμή που εμφανιζόταν, αλλά και η απάντηση του μαθητή και το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε για να αντιδράσει και να δώσει μια απάντηση. Μετά την καταχώρηση της απάντησης ο μαθητής είχε ανατροφοδότηση για την ορθότητα ή όχι της απάντησής του.

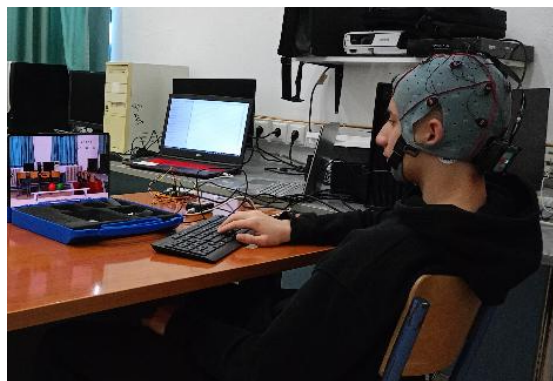


Σχήμα 4: Σχεδιάγραμμα εξέλιξης του δεύτερου πειράματος

Με αυτό τον τρόπο δημιουργήσαμε δύο πειραματικές καταστάσεις α) χωρίς περισπασμούς και β) με περισπασμούς, για να επηρεάσουμε το επίπεδο συγκέντρωσης των συμμετεχόντων, διατηρώντας το γνωστικό φόρτο ίδιο. Φυσικά και στις δύο καταστάσεις υπήρχαν επιπλέον οι συνήθεις περισπασμοί από τη δραστηριότητα των άλλων μαθητών μέσα στην τάξη. Σε κάθε κατάσταση οι μαθητές καλούνταν να αποτιμήσουν 20 εκφράσεις (συνολικά σε 40).

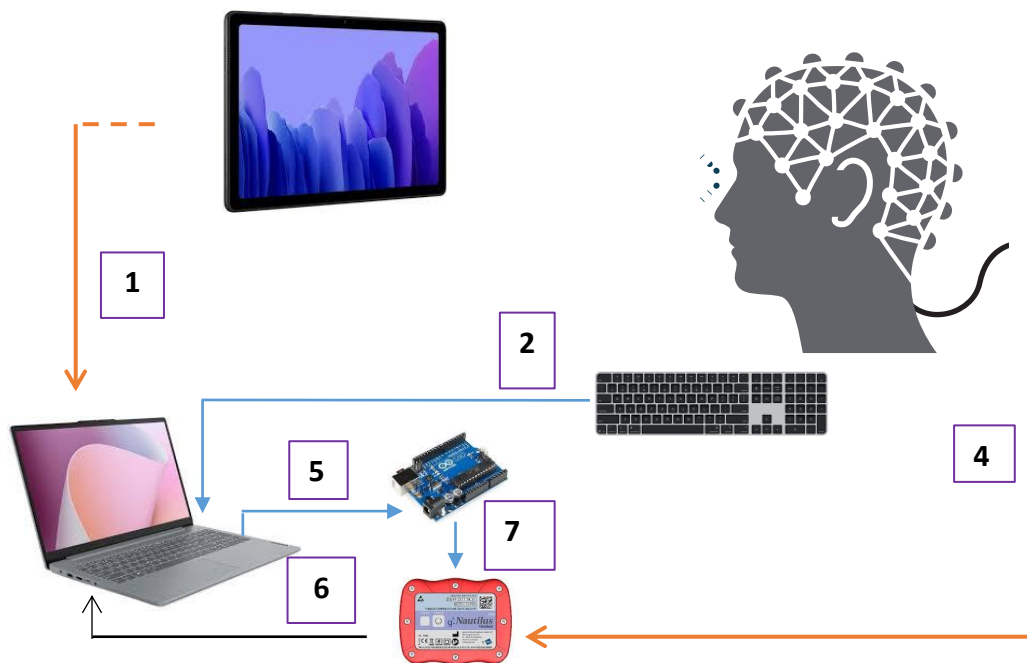
Κατά την πειραματική διαδικασία, αρχικά, ζητήθηκε από κάθε συμμετέχοντα να καθίσει άνετα, και στη συνέχεια, προσαρμόστηκε ο εξοπλισμός του εγκεφαλογράφου.

Τα πειράματα για κάθε μαθητή έγιναν σε μία συνεδρία που κράτησε 30 λεπτά για τον καθένα. Αρχικά οι μαθητές ενημερώθηκαν για το τι αφορούσαν τα δύο πειράματα, και πως έπρεπε να αντιδρούν σε αυτά. Τους ζητήθηκε να περιορίσουν όσο μπορούσαν τις κινήσεις του κεφαλιού και του σώματος για να περιοριστεί ο θόρυβος στα ηλεκτροεγκεφαλικά σήματα. Στη συνέχεια τοποθετούνταν στο κεφάλι το καπέλο με τα ηλεκτρόδια του εγκεφαλογράφου (Εικόνα 26).



Εικόνα 26 : Εξέλιξη του πειράματος

Κάθε μαθητής είχε την ευκαιρία μέσω δοκιμών να εξοικειωθεί με το κάθε πείραμα και τον τρόπο που έπρεπε να παρέχουν δεδομένα μέσω του πληκτρολογίου. Όταν επιβεβαίωναν ότι ήταν έτοιμοι άρχιζε η καταγραφή. Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης

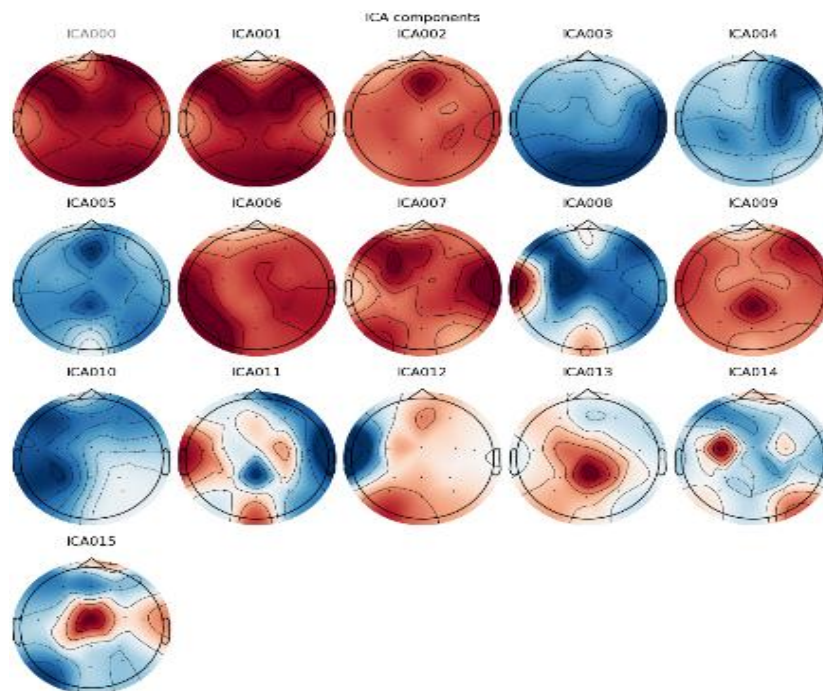
7.1.5 Συλλογή δεδομένων και ανάλυση

Προεπεξεργασία (preprocessing)

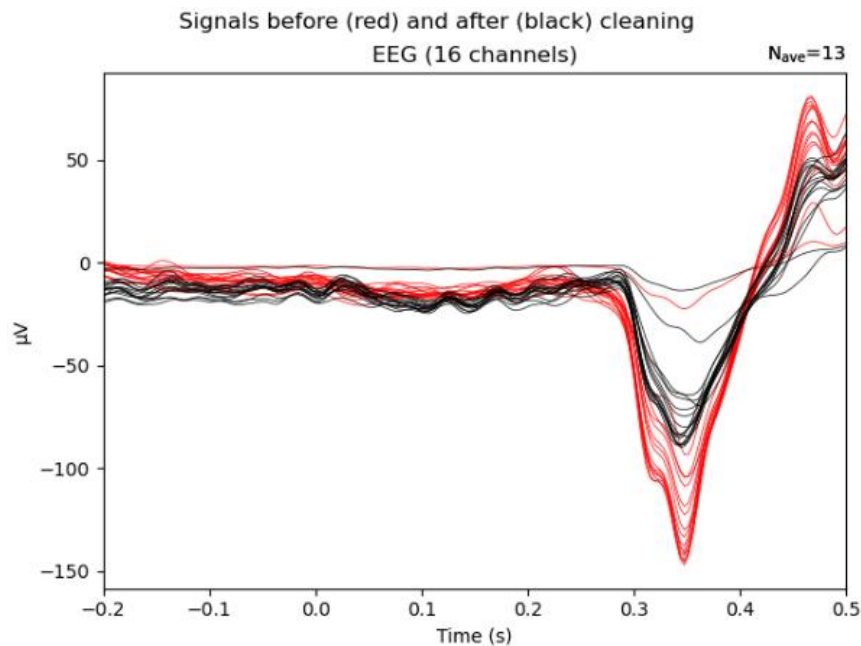
Τα εγκεφαλογραφήματα επεξεργάστηκαν με χρήση του MNE-Python. Αρχικά έγινε μετατροπή των αρχείων καταγραφής (*.mat) σε τύπου (*.fif). Ακολούθησε διαχωρισμός των δεδομένων των δύο πειραμάτων σε δύο διαφορετικά αρχεία, αφού η καταγραφή τους έγινε ενιαία. Στη συνέχεια έγινε καθαρισμός των σημάτων από τεχνουργήματα. Σε πρώτη φάση αποκλείστηκαν χειροκίνητα περιοχές που είχαν κακή ποιότητα δεδομένων. Στη συνέχεια έγινε περαιτέρω καθαρισμός με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης Autoreject. Το εργαλείο αυτό δεν

χρησιμοποιεί σταθερά όρια (π.χ., $\pm 100 \mu V$) για να απορρίψει περιοχές αλλά δυναμικά που τα προσαρμόζει με τη βοήθεια κατάλληλων αλγορίθμων (cross-validation) για να υπολογίσει βέλτιστα όρια απόρριψης προσαρμοσμένα στα δεδομένα. Στη συνέχεια επιχειρεί μέσω κριτηρίων να διορθώσει τα δεδομένα μέσω παρεμβολής (interpolation). Το εργαλείο χρησιμοποιήθηκε τόσο σε περιοχές (epochs) γύρω από συγκεκριμένα γεγονότα (1^ο πείραμα), όσο και σε συνεχή δεδομένα (2^ο πείραμα). Στη συνέχεια έγινε ανάλυση των σημάτων σε ανεξάρτητες συνιστώσες μέσω του ICA (Εικόνα 27). Είναι γνωστό ότι τεχνοουργήματα που οφείλονται σε μη εγκεφαλικές λειτουργίες, όπως το άνοιγμα και κλείσιμο των ματιών, οι μυϊκές συσπάσεις, οι χτύποι της καρδιάς κλπ. εμφανίζουν καλά καθορισμένα πρότυπα μπορούν να εντοπιστούν και να αφαιρεθούν. Εξαιτίας του μικρού αριθμού των καναλιών για κάθε συμμετέχοντα ήταν δυνατή η απομόνωση μέχρι και τριών τέτοιων συνιστωσών, η αφαίρεση των οποίων βελτίωσε σημαντικά την ποιότητα του σήματος (Εικόνα 28). Τα σήματα τμηματοποιήθηκαν σε περιοχές (epochs) σε ένα εύρος -200 έως 500 ms και διορθώθηκαν (baseline) σε μια περιοχή 200ms. Τελικά λόγω της παρουσίας εκτεταμένων τεχνοουργμάτων που δεν ήταν δυνατό να διορθωθούν αποκλείστηκαν πέντε μαθητές.

Η ανάλυση των δεδομένων εστίασε στην προσπάθεια να προσδιορίζουμε ποιο ήταν το νευροφυσιολογικό εγκεφαλικό αποτύπωμα των παραβιάσεων των νόμων της φυσικής, καθώς και στο χρόνο αντίδρασης σε αυτές των μαθητών.



Εικόνα 27: Ανάλυση και επεξεργασία ICA



Εικόνα 28: Διορθωμένο σήμα

Η ανάλυση συνεχών σημάτων εστιάζει στη μακροχρόνια δυναμική και στις φασματικές ιδιότητες της εγκεφαλικής δραστηριότητας, ενώ η ανάλυση μέσω τμηματοποίησης επικεντρώνεται σε συμβάντα-κλειδιά και τις προκλητές απαντήσεις του εγκεφάλου.

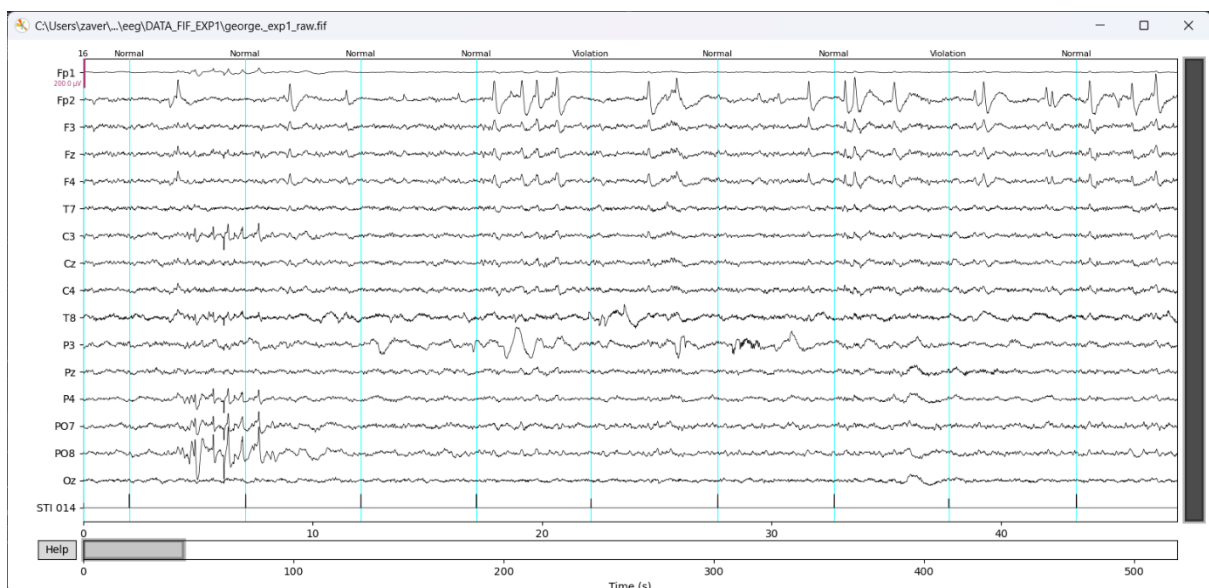
Αναλύθηκε η μέση αντίδραση των συμμετεχόντων κατά την ασυνήθιστη κίνηση των μπαλών για να προσδιορίσουμε τις χωρικές και χρονικές διαφορές στο σήμα μας.

Οι μετρήσεις χρόνου αντίδρασης έχουν διαδραματίσει ιστορικά σημαντικό ρόλο στην γνωστική ψυχολογία, βοηθώντας στην κατανόηση διαδικασιών όπως η αντίληψη, η μνήμη και η προγραμματισμένη κίνηση. Ωστόσο, οι σύγχρονες τεχνικές της γνωστικής νευροεπιστήμης, ιδιαίτερα τα προκλητά δυναμικά (ERPs) και η λειτουργική νευροαπεικόνιση, αντικαθιστούν πλέον τις μελέτες χρόνου αντίδρασης. Αυτές οι μέθοδοι προσφέρουν έναν άμεσο σύνδεσμο με τη νευροεπιστήμη, επιτρέπουν τη χωρική και χρονική ανάλυση των γνωστικών διεργασιών και καθιστούν δυνατή την παρατήρηση της επεξεργασίας των ερεθισμάτων μεταξύ ενός ερεθίσματος και μιας απόκρισης. Σε αντίθεση με τα πειράματα χρόνου αντίδρασης, τα ERPs καταγράφουν συνεχή ηλεκτροφυσιολογικά σήματα που αποτυπώνουν τη νευρική δραστηριότητα. Επιπλέον, οι τεχνικές αυτές επιτρέπουν τη μέτρηση της εγκεφαλικής δραστηριότητας ακόμη και χωρίς να απαιτείται απόκριση από τον συμμετέχοντα, γεγονός που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην έρευνα της προσοχής.

Η τεχνική των προκλητών δυναμικών (ERPs) μετά την επεξεργασία διατηρεί μόνο τη νευρική δραστηριότητα που συνδέεται με το εκάστοτε ερέθισμα. Το τελικό ERP κύμα περιλαμβάνει θετικές (P) και αρνητικές (N) κορυφές, οι οποίες προσδιορίζονται από τον χρόνο εμφάνισής τους (π.χ. P100, N200). Αυτά τα συστατικά των ERPs αντικατοπτρίζουν διαφορετικά στάδια της γνωστικής επεξεργασίας, ξεκινώντας από την πρώιμη αισθητηριακή απόκριση και καταλήγοντας στη λήψη αποφάσεων και τις κινητικές εντολές.

Η ανάλυση των ERP συνιστωσών παρέχει κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με το χρονικό και χωρικό προφίλ της γνωστικής λειτουργίας. Η μέτρηση της λανθάνουσας περιόδου (latency) και του εύρους (amplitude) των κορυφών επιτρέπει στους ερευνητές να εξετάσουν την ταχύτητα και την ένταση της επεξεργασίας των πληροφοριών. Επιπλέον, η κατανομή των δυναμικών στην επιφάνεια του κρανίου επιτρέπει τον εντοπισμό των εγκεφαλικών περιοχών που εμπλέκονται σε συγκεκριμένες γνωστικές λειτουργίες. Έτσι, τα ERPs αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη της αντίληψης, της μνήμης, της προσοχής και της λήψης αποφάσεων, προσφέροντας μια πιο άμεση και λεπτομερή ανάλυση των νευρικών μηχανισμών σε σύγκριση με τις κλασικές μετρήσεις χρόνου αντίδρασης.

Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε στο Unity είχε τη δυνατότητα να αποστέλλει στον εγκεφαλογράφο κατάλληλο σήμα χρονισμού που αντιστοιχούσε στη χρονική στιγμή που συνέβαινε η παραβίαση της ομαλής πτώσης και να καταγραφεί μέσα στον εγκεφαλογράφημα σαν γεγονός (event). Με αυτό τον τρόπο γνωρίζαμε ακριβώς ποιο σημείο του εγκεφαλογραφήματος έπρεπε να μελετήσουμε (Εικόνα 29).



Εικόνα 29: Εγκεφαλογράφημα μαθητή

Τρεις μαθητές αποκλείστηκαν αφού η αποσύνδεση από το διαδίκτυο κατά την εγγραφή, είχε σαν αποτέλεσμα να χαθούν τα δεδομένα συγχρονισμού των ερεθισμάτων. Δύο ακόμη μαθητές ένιωθαν δυσφορία από τα ξηρά ηλεκτρόδια και οι κινήσεις τους δημιουργούσαν τεχνουργήματα που δεν ήταν δυνατό να διορθωθούν. Η ανάλυση τελικά έγινε πάνω στα δεδομένα (τμήματα) όλων των μαθητών και από την ανάλυση αποκλείστηκαν τα ηλεκτρόδια Fp1, Fp2 λόγω αυξημένων τεχνουργημάτων και τα ηλεκτρόδια T7, T8 όταν λόγω των μαλλιών δεν υπήρχε καλή επαφή. Μετά τον καθαρισμό των σημάτων επιχειρήσαμε να απομονώσουμε τέσσερις συνιστώσες (C1, N100, P200, P300). Οι χρόνοι εμφάνισης και τα πλάτη των ERP υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές εντός προκαθορισμένων χρονικών παραθύρων που φαίνονται στον Πίνακα 1. Για το C1 το παράθυρο ορίστηκε στην περιοχή (0.03, 0.08), για το N100 το παράθυρο ορίστηκε στην περιοχή (0.08, 0.15), για το P200 στην περιοχή (0.15, 0.25) και για το P300 στην περιοχή (0.25, 0.35). Η μέθοδος αυτή (των μέσων τιμών) προσφέρει ανθεκτικότητα στον θόρυβο και τη μεταβλητότητα μεταξύ των δοκιμών, καθώς και σταθερότητα παρουσία ευρέων ή επικαλυπτόμενων συστατικών (Luck, 2014; Duncan et al., 2009). Παρόλο που αυτή η προσέγγιση παράγει αριθμητικά σταθερές εκτιμήσεις, οι χρόνοι λανθάνουσας απόκρισης που προκύπτουν μπορεί να διαφέρουν ελαφρώς από τις κορυφές που παρατηρούνται στα ολικά μέσα γραφήματα. Αυτή η απόκλιση οφείλεται σε μεγάλο βαθμό σε φαινόμενα μέσης τιμής, ασύμμετρη μορφολογία του σήματος και επικάλυψη των συνιστωσών, ιδιαίτερα εμφανή στο μεταγενέστερο P300 και το αργό κύμα (Polich, 2007).

Πίνακας 1: Συνιστώσες των προκλητών δυναμικών που μελετήθηκαν

Συνιστώσα	Χρονικό Παράθυρο (s)	Λειτουργική Σημασία
C1	0.030 – 0.080	Πρώιμη οπτική επεξεργασία στον πρωτοταγή οπτικό φλοιό
P200	0.150 – 0.250	Αντίληψη και διάκριση ερεθίσματος
P300	0.250 – 0.350	Συνειδητή αναγνώριση και λήψη απόφασης

Γ' ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο : Αποτελέσματα

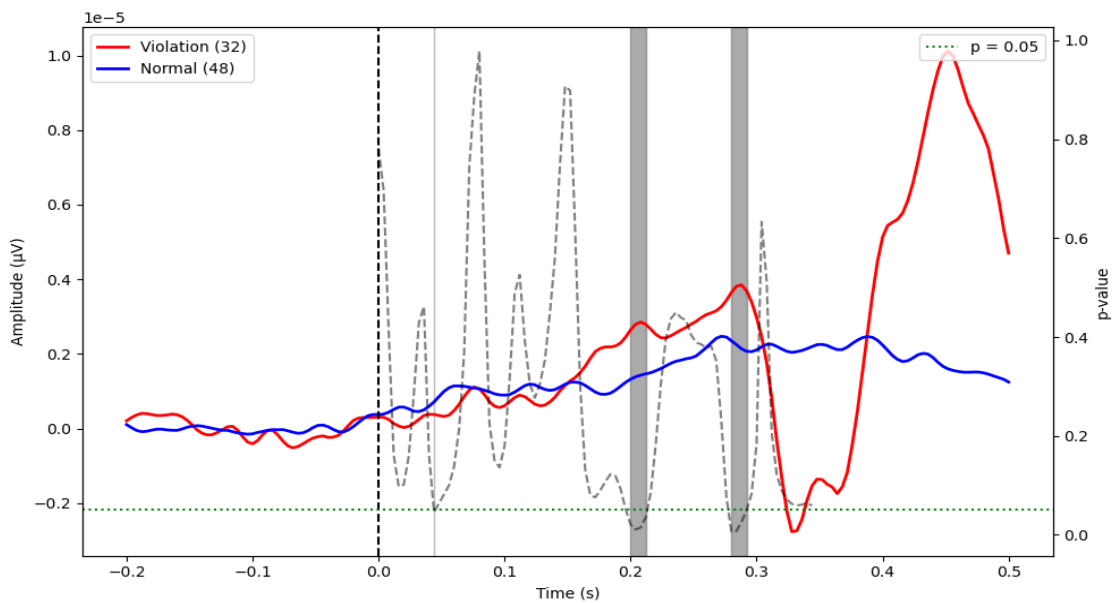
Πρώτο ερευνητικό ερώτημα

Σύγκριση μεταξύ των συνθηκών ελεύθερης πτώσης και παραβίασης νόμων φυσικής

Η πτώση των σφαιρών αντιστοιχίστηκε σε δύο συνθήκες, σε αυτή που η πτώση γινόταν ομαλά και σε αυτή που παραβιαζόταν πρόσκαιρα η βαρύτητα, οι οποίες διέφεραν μόνο κατά την σύντομη περίοδο παραβίασης της βαρύτητας. Ωστόσο, για να προσδιορίσουμε τις χρονικές περιόδους με σημαντικές διαφορές στις εγκεφαλικές αντιδράσεις (ERPs) μεταξύ των συνθηκών παράβασης και ομαλότητας, πραγματοποιήσαμε ανάλυση με κινούμενο παράθυρο χρησιμοποιώντας *t* τεστ για δείγματα ζευγών. Υπολογίστηκαν τα μέσα προκλητά δυναμικά για κάθε συμμετέχοντα ($N = 20$) σε τρία ηλεκτρόδια (Fz, Cz, Pz), και οι συγκρίσεις πραγματοποιήθηκαν σε διαδοχικά παράθυρα 70 ms, με βήματα 25 ms, από 0 έως 350 ms μετά την έναρξη του ερεθίσματος. Τα αποτελέσματα διορθώθηκαν για πολλαπλές συγκρίσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του ποσοστού ψευδών ανακαλύψεων (FDR) με επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$. Η εφαρμογή της διόρθωσης FDR μείωσε την πιθανότητα ψευδών θετικών στην ανάλυση, εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα των ευρημάτων. Τα σήματα μετά τα 350 ms λόγω οφθαλμικών τεχνουργημάτων που προκλήθηκαν από την παρακολούθηση της ανοδικής κίνησης των σφαιρών, δεν αναλύθηκαν, καθώς χρειάστηκε χρόνος για να σταθεροποιηθούν.

Η ανάλυση ανέδειξε δύο στατιστικά σημαντικά χρονικά παράθυρα με στατιστικά σημαντική διαφορά της δραστηριότητας μεταξύ των συνθηκών (Εικόνα 30). Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά μεταξύ 200 ms και 212 ms, $t(19) = 5.21$, $p = .035$. Ένα δεύτερο στατιστικά σημαντικό αποτέλεσμα βρέθηκε μεταξύ 280 ms και 292 ms, $t(19) = 6.06$, $p = .026$. Αυτά τα χρονικά διαστήματα συμπίπτουν με περιοχές που συνήθως συνδέονται με τα στοιχεία ERP P200 και P300, υποδηλώνοντας αυξημένη γνωστική αξιολόγηση και επεξεργασία προσοχής ως απάντηση σε φυσικά απροσδόκητα γεγονότα. Άλλα χρονικά παράθυρα δεν κατέληξαν σε στατιστική σημαντικότητα ($p > .05$), αν και αρκετά παρουσίασαν διαφορές σε επίπεδο τάσης (C1). Συνολικά, αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι απροσδόκητα γεγονότα, όπως οι παραβάσεις των φυσικών νόμων προκαλούν διακριτές

νευρικές αποκρίσεις που ξεκινούν γύρω από τα 200 ms, με την κορύφωση της διαφοροποίησης να συμβαίνει κοντά στα 290 ms μετά την παρουσίαση του ερεθίσματος.



Εικόνα 30: Μέσο προκλητό δυναμικό (Fz,Cz, Pz) σύγκριση μεταξύ ομαλής και ανώμαλης πτώσης

Πλάτη και λανθάνοντες χρόνοι των προκλητών δυναμικών

Στη συνέχεια επικεντρωθήκαμε στην συνθήκη παραβίασης της βαρύτητας και προσπαθήσαμε να απομονώσουμε τέσσερα στοιχεία (C1, N100/P100, P200, P300). Οι λανθάνοντες χρόνοι και τα πλάτη των ERPs υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας μέσες τιμές εντός προκαθορισμένων χρονικών παραθύρων, βασισμένων σε προηγούμενες έρευνες. Για το C1, ένα πρώιμο οπτικό στοιχείο που συνδέεται με την ενεργοποίηση του πρωτογενούς οπτικού φλοιού και αντανακλά την αρχική αισθητηριακή επεξεργασία, το χρονικό παράθυρο ορίστηκε από (0.03 – 0.08) δευτερόλεπτα. Για το P200, ένα θετικό κύμα που σχετίζεται με την αντιληπτική ανάλυση και την εξαγωγή χαρακτηριστικών, το χρονικό παράθυρο ορίστηκε από (0.15 – 0.25) δευτερόλεπτα. Για το P300, ένα μεταγενέστερο θετικό στοιχείο που αντανακλά γνωστικές διαδικασίες όπως η λήψη αποφάσεων, η ενημέρωση μνήμης και η κατανομή προσοχής, το χρονικό παράθυρο ορίστηκε από (0.25 – 0.35) δευτερόλεπτα. Η επιλεγμένη μέθοδος βασισμένη στη μέση τιμή προσφέρει σταθερότητα έναντι του θορύβου και της διακύμανσης μεταξύ των δοκιμών, καθώς και σταθερότητα στην παρουσία ευρέων ή επικαλυπτόμενων δυναμικών (Luck, 2014; Duncan et al., 2009). Αν και αυτή η προσέγγιση αποδίδει αριθμητικά σταθερές εκτιμήσεις, οι υπολογιζόμενες καθυστερήσεις απόκρισης ενδέχεται να διαφέρουν

ελαφρώς από τις κορυφές που παρατηρούνται στα κύματα του γενικού μέσου όρου. Αυτή η διαφορά οφείλεται κυρίως στις επιδράσεις του μέσου όρου, τη μη συμμετρική μορφολογία του σήματος και την επικάλυψη των στοιχείων. Η μέθοδός μας δίνει προτεραιότητα στη δυνατότητα να μπορούμε να αναπαράγουμε ξανά τα αποτελέσματα παρά στην ακριβή ανίχνευση κορυφών, κάτι που είναι αποδεκτό για μελέτες σε επίπεδο ομάδας, αλλά λιγότερο ιδανικό για αναλύσεις ανά δοκιμή.

Στον Πίνακα 2 αποτυπώνονται για το κάθε δυναμικό οι μέσοι όροι του πλάτους και του λανθάνοντα χρόνου για κάθε συμμετέχοντα μαθητή κατά τις ρίψεις σφαιρών που κατά τη διάρκεια της πτώσης παραβίαζαν τους νόμους της βαρύτητας.

Πίνακας 2: Λανθάνοντες χρόνοι και πλάτη των δυναμικών ανά μαθητή κατά την ανώμαλη πτώση

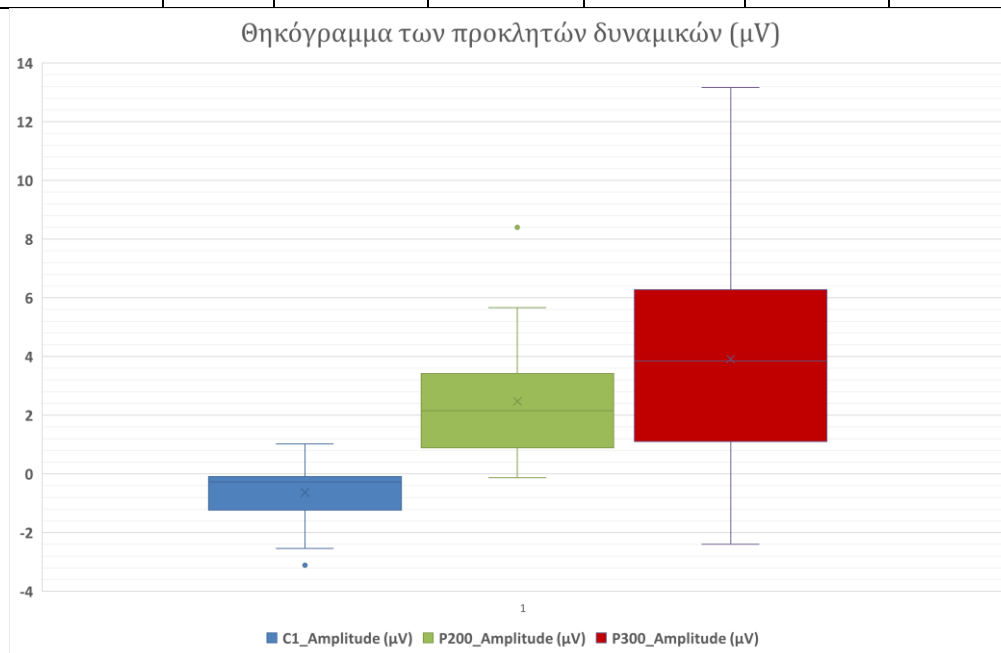
Subject	C1 Lat (s)	C1 Amp (μV)	P200 Lat (s)	P200 Amp (μV)	P300 Lat (s)	P300 Amp (μV)
sub_1	0,038	-3,11	0,197	0,12	0,276	-0,09
sub_2	0,051	-0,13	0,223	4,84	0,293	6,19
sub_3	0,051	0,01	0,219	2,34	0,326	4,45
sub_4	0,065	-0,44	0,209	0,45	0,299	3,51
sub_5	0,032	-2,3	0,191	-0,13	0,264	-2,4
sub_6	0,067	-0,14	0,202	2,83	0,314	2,63
sub_7	0,034	-2,54	0,214	0,94	0,258	-0,22
sub_8	0,045	-0,26	0,219	2,59	0,332	6,2
sub_9	0,037	-0,39	0,201	1,26	0,272	0,89
sub_10	0,058	-0,28	0,216	1,97	0,318	6,3
sub_11	0,038	-0,2	0,224	1,67	0,272	1,81
sub_12	0,056	-0,09	0,194	0,27	0,309	0,38
sub_13	0,059	-1,78	0,186	1,12	0,299	2,11
sub_14	0,054	0,53	0,21	4,88	0,344	6,78
sub_15	0,043	-0,68	0,248	5,67	0,289	8,64
sub_16	0,047	0,18	0,202	2,89	0,29	7,7
sub_17	0,036	-1,42	0,216	3,55	0,266	4,34
sub_18	0,039	1,02	0,223	8,4	0,317	13,17
sub_19	0,039	-0,43	0,224	3,04	0,29	4,19
sub_20	0,054	-0,1	0,195	0,87	0,323	1,76

Υπολογίστηκαν από τα δεδομένα όλων των μαθητών τα περιγραφικά στατιστικά για τον λανθάνοντα χρόνο και πλάτος για κάθε δυναμικό για τις δοκιμές που σχετίζονταν με ανώμαλη πτώση (Πίνακας 3). Ο λανθάνων χρόνος του C1 των δεδομένων μας εμφανίζεται με πολύ μικρή διαφορά μεταξύ των συμμετεχόντων. Το πλάτος του C1 αντικατοπτρίζει σημαντική ατομική διακύμανση. Η καθυστέρηση του P200 αντικατοπτρίζει συνέπεια. Το πλάτος του P200 δείχνει

σημαντική διακύμανση. Ο λανθάνων χρόνος του P300 δείχνει υψηλή αξιοπιστία. Το πλάτος του P300 αντικατοπτρίζει σημαντική ατομική διακύμανση.

Πίνακας 3: Περιγραφικά στατιστικά των δυναμικών που μελετήθηκαν κατά την ανώμαλη πτώση (δεδομένα μαθητών)

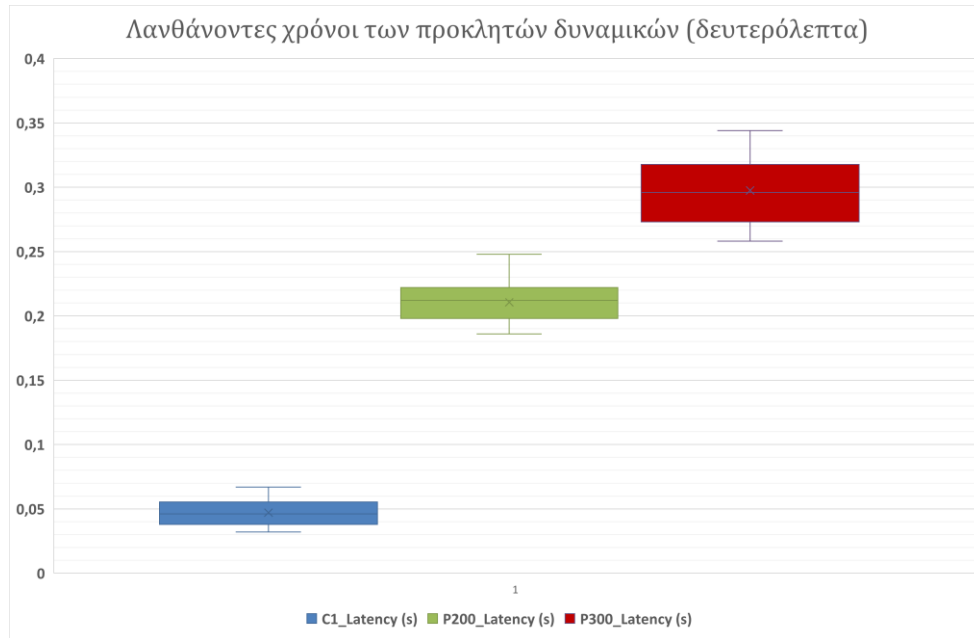
	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	95% CIM	Mean $\pm$ Std.
C1_Latency (s)	0,047	0,011	0,032	0,067	0,042 - 0,052	0,047 $\pm$ 0,011
C1_Amplitude (μV)	-0,627	1,059	-3,11	1,02	-1,123 - -0,132	-0,627 $\pm$ 1,059
P200_Latency (s)	0,211	0,015	0,186	0,248	0,204 - 0,218	0,211 $\pm$ 0,015
P200_Amplitude (μV)	2,479	2,164	-0,13	8,4	1,466 - 3,491	2,479 $\pm$ 2,164
P300_Latency (s)	0,298	0,025	0,258	0,344	0,286 - 0,309	0,298 $\pm$ 0,025
P300_Amplitude (μV)	3,917	3,67	-2,4	13,17	2,199 - 5,635	3,917 $\pm$ 3,67



Γράφημα 1: Θηκόγραμμα του πλάτους των προκλητών δυναμικών (δεδομένα μαθητών κατά την ανώμαλη πτώση)

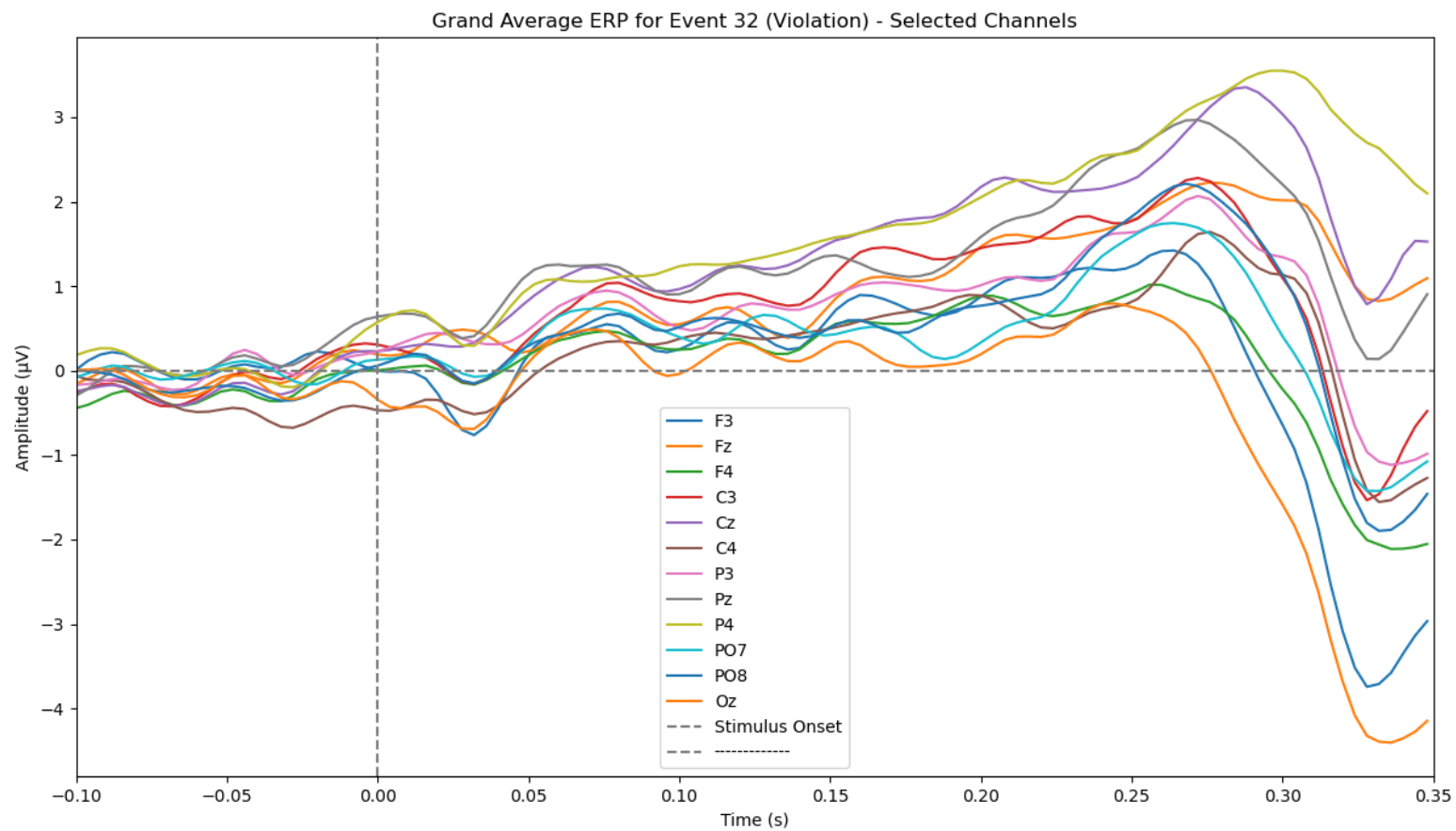
Από όλα τα προκλητά δυναμικά που μελετήσαμε τη μεγαλύτερη διακύμανση έχει το P300 τόσο σε επίπεδο πλάτους (Γράφημα 1) όσο και σε επίπεδο λανθάνοντα χρόνου εμφάνισης

(Γράφημα 2). Αυτό μπορεί να αποτελέσει και τον κυριότερο παράγοντα διαφοροποίησης μεταξύ των μαθητών.

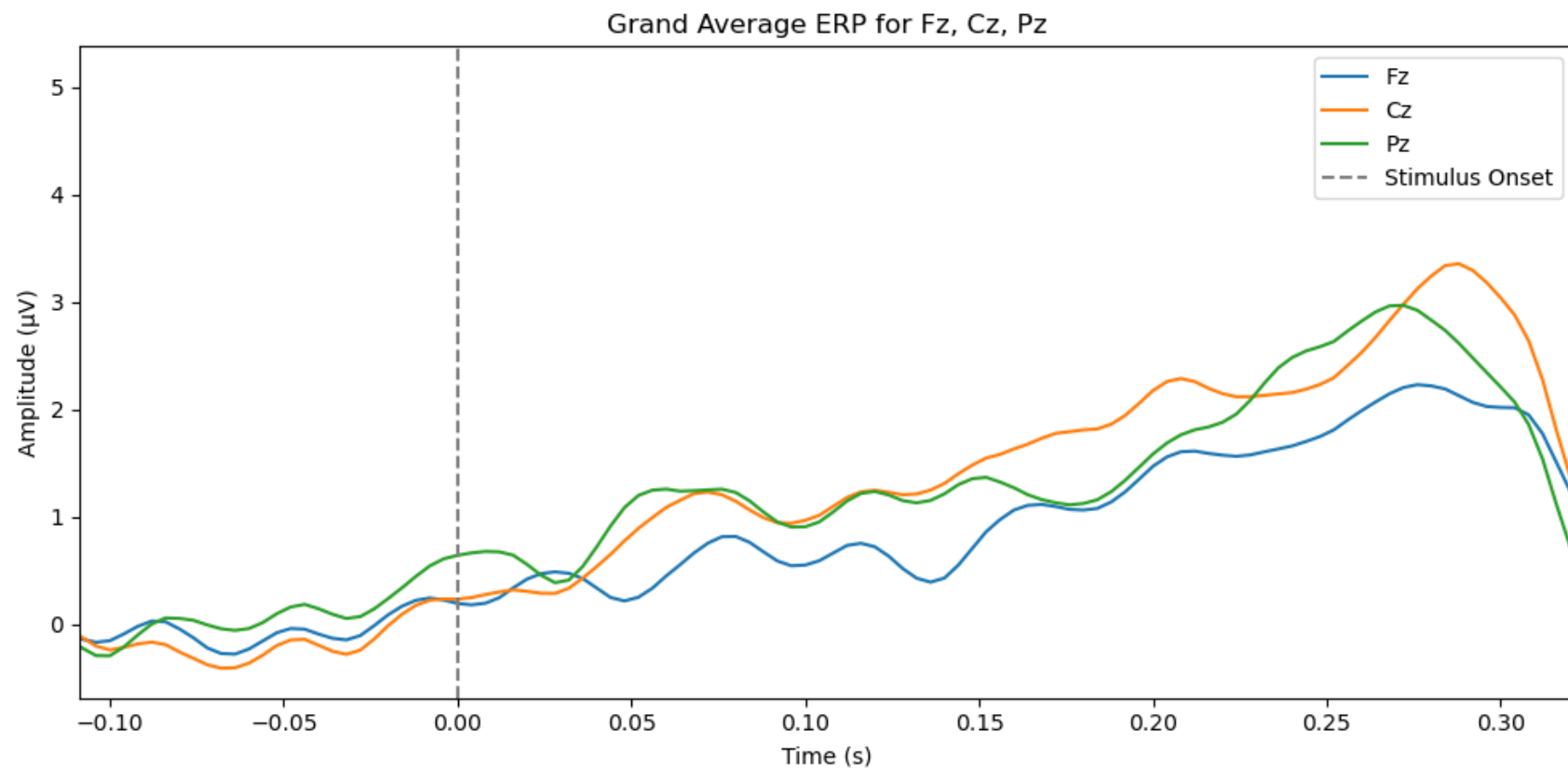


Γράφημα 2: Θηκόγραμμα του λανθάνοντα χρόνου των προκλητών δυναμικών (δεδομένα μαθητών κατά την ανώμαλη πτώση)

Στο Γράφημα 3 παρουσιάζεται το δυναμικό ανά ηλεκτρόδιο που προέκυψε σαν μέσος όρος όλων των δοκιμών, από όλους τους συμμετέχοντες, κατά τις οποίες είχαμε παραβίαση του νόμου της βαρύτητας. Σε αυτό αποτυπώνεται όλη η γνωστική επεξεργασία, από την πρώιμη αντίληψη, μέχρι την αξιολόγηση και την αντίδραση. Στο Γράφημα 4 αποτυπώνεται το δυναμικό πάνω στα ηλεκτρόδια Fz, Cz, Pz που είναι αυτά που σχετίζονται κυρίως με τις γνωστικές λειτουργίες.



Γράφημα 3: Το μέσο (συνολικό) προκλητό δυναμικό ανά ηλεκτρόδιο κατά την περίοδο παραβίασης της βαρύτητας

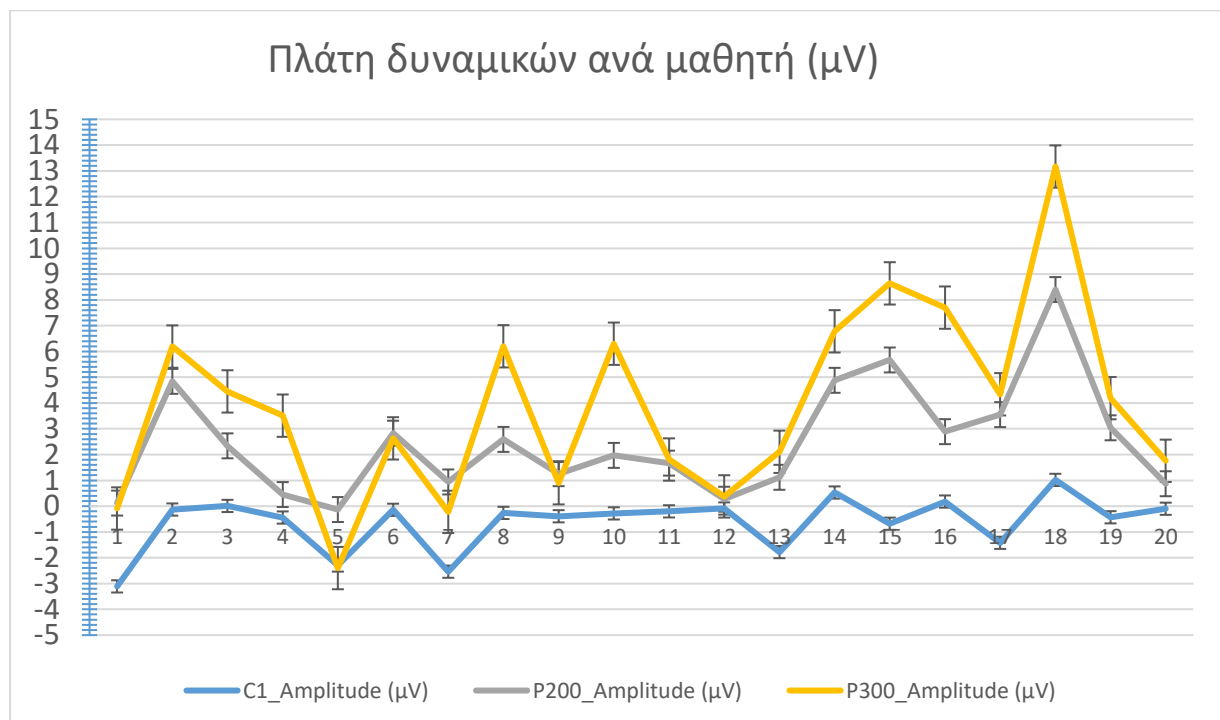


Γράφημα 4: Η αποτύπωση του προκλητού δυναμικού στα ηλεκτρόδια Fz,Cz,Pz

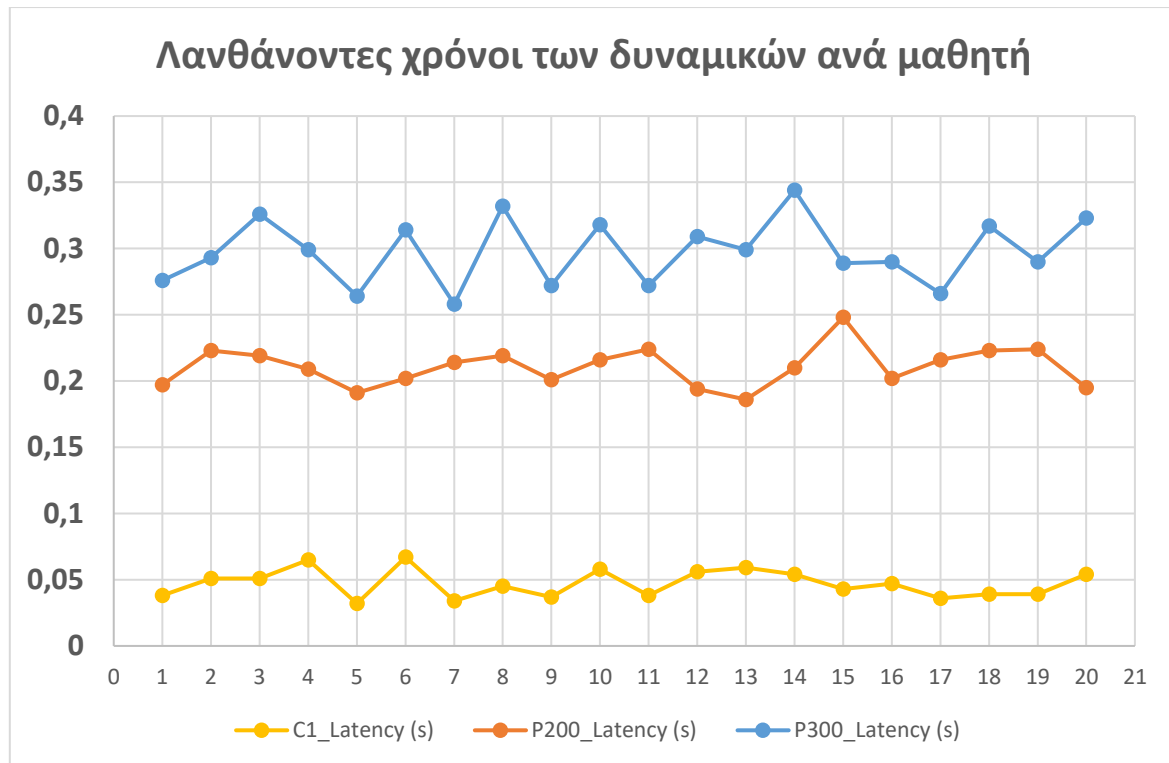
Παρόλο που οι οπτικές κορυφές των συστατικών στο γράφημα είναι ελαφρώς μετατοπισμένες σε σύγκριση με τις αριθμητικές τιμές, η χρονική τους ακολουθία και η πολικότητα επιβεβαιώνουν την αναμενόμενη γνωστική διαδοχή. Αυτά τα κύματα συλλογικά υποδεικνύουν συνεχή προσοχή και συμμετοχή μετά από αξιολόγηση, ακόμα και κάτω από τις αισθητηριακά-γνωστικά απαιτητικές συνθήκες ενός περιβάλλοντος επαυξημένης πραγματικότητας.

Τα πλάτη και οι λανθάνοντες χρόνοι εξαρτώνται ακόμη από πλήθος άλλων παραγόντων. Ενδεικτικά αναφέρονται το είδος των ηλεκτροδίων (ξηρά/υγρά, επίδραση λόγω της διαφορετικής αντίστασης και εφαρμογής), ο περιβάλλον θόρυβος, η επικάλυψη με άλλες συνιστώσες, ακόμη και η ίδια η ανατομία των συμμετεχόντων (επίδραση στην πολικότητα).

Στο γράφημα 5 παρουσιάζουμε την διακύμανση του πλάτους και στο γράφημα 6 του λανθάνοντος χρόνου των προκλητών δυναμικών των ανά μαθητή. Οι χρόνοι και τα πλάτη της κάθε συνιστώσας είναι δυνατό να αποτελέσουν καλούς δείκτες συσχέτισης με άλλες παραμέτρους, όπως η επίδοση των μαθητών ή ο χρόνος απόκρισης.

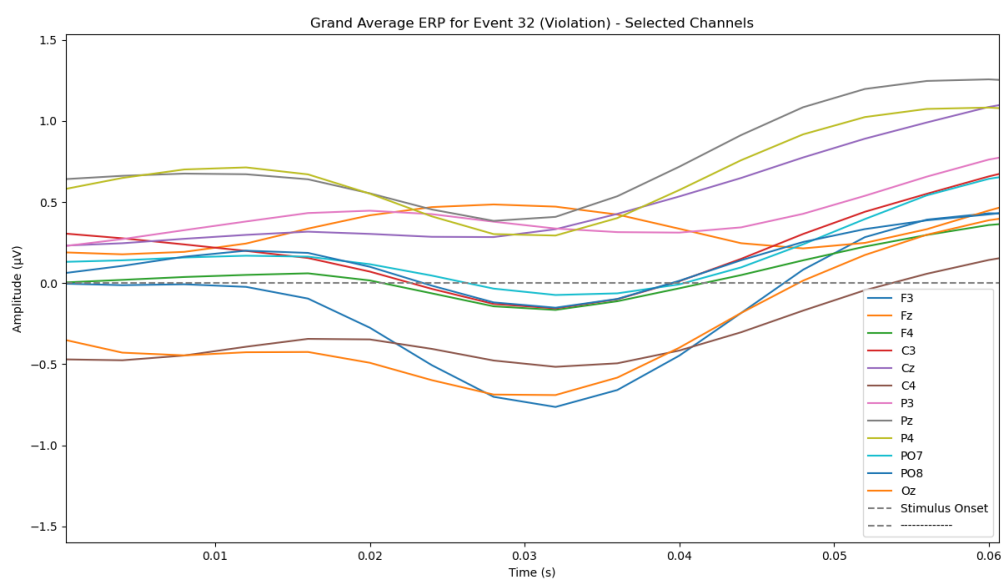


Γράφημα 5: Πλάτος των προκλητών δυναμικών ανά μαθητή



Γράφημα 6: Λανθάνων χρόνος εμφάνισης των προκλητών δυναμικών ανά μαθητή

Το δυναμικό C1 καταγράφηκε, με λανθάνουσα περίοδο 47 ms και πλάτος $-63 \mu V$, παρουσίασε ισχυρή αρνητικότητα στην ινιακή μέση γραμμή (ηλεκτρόδιο Oz) και στην P08, όπως φαίνεται στο Γράφημα 7.



Γράφημα 7: Η συνιστώσα C1 (Oz-P08)

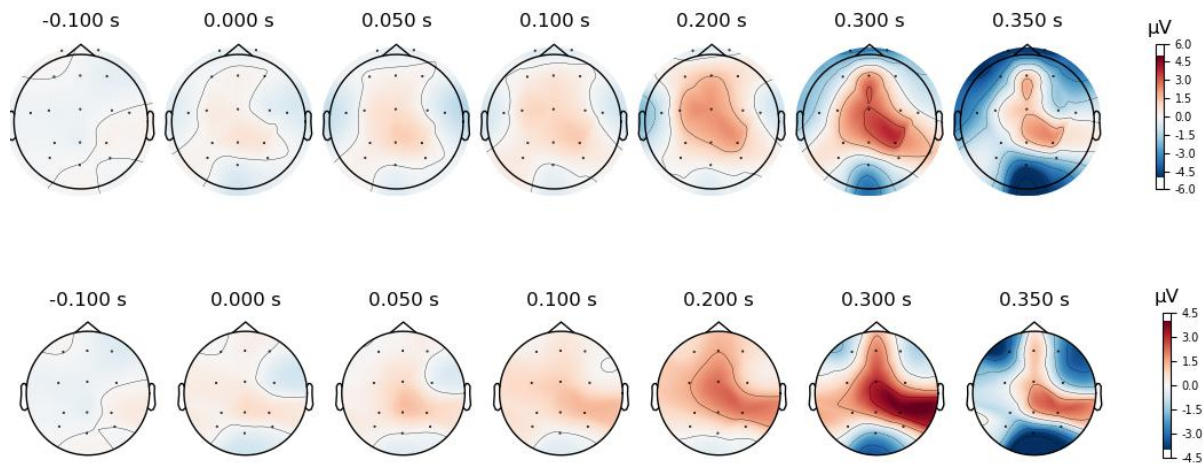
Το επόμενο δυναμικό που εντοπίσαμε ήταν το P200, μια πρόιμη θετική δυναμική που εμφανίζεται περίπου 150–250 ms μετά την έναρξη του ερεθίσματος και σχετίζεται με πρόιμες γνωστικές διεργασίες επεξεργασίας, κατηγοριοποίησης και αξιολόγησης αισθητηριακών ερεθισμάτων (τροχιών κίνησης), παρατηρήθηκε στα 211 ms, πλάτος 2,48 μV και με κεντρική κατανομή (Cz).

Το τελευταίο που εντοπίσαμε ήταν το P300, με ισχυρή θετική απόκριση (298 ms, 3,92 μV) με βρεγματική εστίαση (Pz) και επέκταση στα Cz, P3, P4. Το δυναμικό αυτό αποτελεί το κύριο δείκτη της γνωστικής επίλυσης της ανωμαλίας, ενδεικτική της γνωστικής συμμετοχής και της ενημέρωσης της μνήμης κατά την ανάλυση της ανωμαλίας.

Η ανάλυση των δυναμικών που προκλήθηκαν από κινήσεις σφαιρών που παραβιάζουν τη βαρύτητα αποκάλυψε μια ιεραρχική ακολουθία νευρικής επεξεργασίας, χαρακτηριζόμενη από διακριτές συνιστώσες με συγκεκριμένες χωροχρονικές δυναμικές.

Η τοπογραφία των προκλητών δυναμικών

Οι τοπογραφικοί χάρτες στο Γράφημα 8 απεικονίζουν την χωροχρονική εξέλιξη της γνωστικής επεξεργασίας: η πρόιμη μετωπική αρνητικότητα (-100–100 ms) μεταβαίνει σε μεσολαβούμενη κεντρική θετικότητα (200 ms) και οδηγεί σε βρεγματική κυριαρχία (300 ms) και επαναφορά σε ηρεμία, αντανακλώντας την πορεία από την αισθητηριακή ανάλυση προς τη γνωστική ενσωμάτωση. Στην πρώτη σειρά παρουσιάζεται η εξέλιξη με το σύνολο των ηλεκτροδίων (16), ενώ στη δεύτερη με λιγότερα (12). Όσο περισσότερα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούμε τόσο πιο λεπτομερής γίνεται η κατανομή στην κεφαλή.

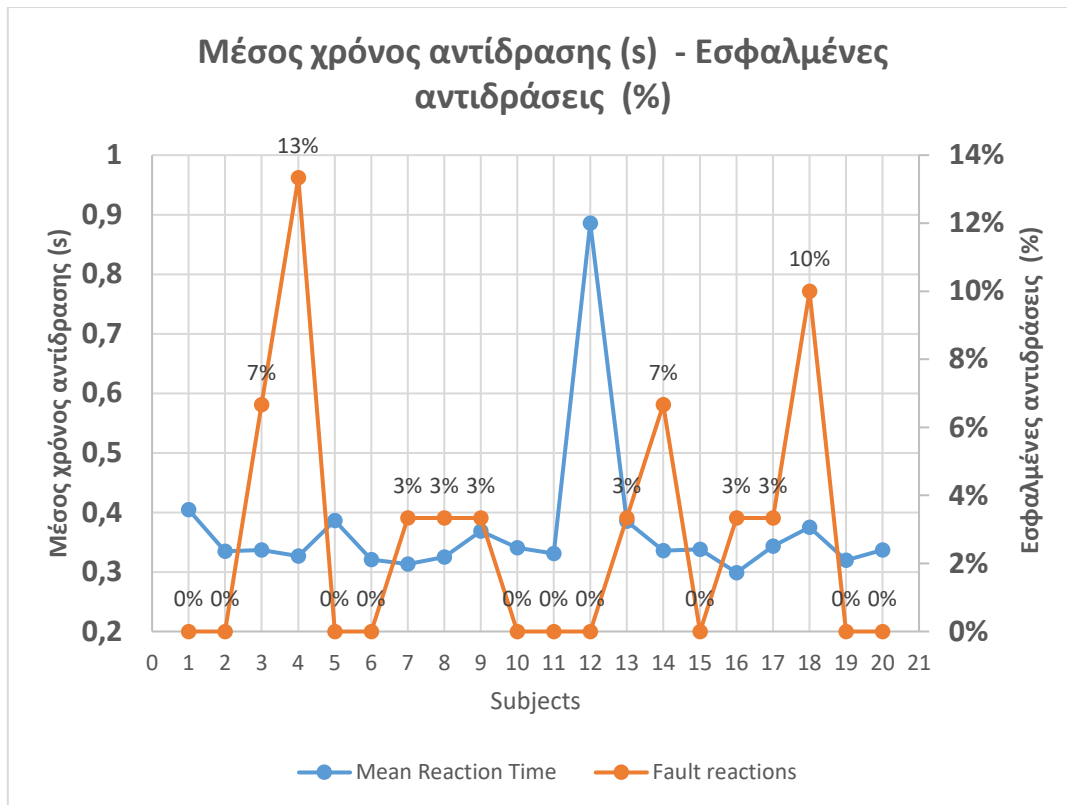


Γράφημα 8: Χρονική εξέλιξη της τοπογραφίας των περιοχών ενεργοποίησης

Χρόνος αντίδρασης

Η εφαρμογή AR που αναπτύχθηκε για την παρουσίαση είχε τη δυνατότητα να καταγράφει σε αρχείο τη στιγμή που πραγματοποιούνταν η παραβίαση στην κίνηση, αλλά και τις χρονικές στιγμές που οι μαθητές αντιδρούσαν μέσω του πληκτρολογίου.

Η ανάλυση αυτών κατέδειξε πως οι μαθητές επέδειξαν μεγάλο βαθμό συγκέντρωσης, με το πλήθος των παραβιάσεων στην κίνηση που εντοπίστηκαν εσφαλμένα να είναι κατά μέσο όρο μόνο 3%. Ο μέσος χρόνος αντίδρασης ήταν 0.37 δευτερόλεπτα, χρόνος που θα ήταν μικρότερος αν λάβουμε υπόψη μας την ύπαρξη δύο μαθητών με αισθητά μεγαλύτερο χρόνο απόκρισης από τους άλλους (0,88 και 0,48 δευτερόλεπτα). Στο γράφημα 9 αποτυπώνεται για κάθε συμμετέχοντα μαθητή ο μέσος χρόνος αντίδρασης και το ποσοστό των εσφαλμένων αντιδράσεων.



Γράφημα 9: Μέσος χρόνος αντίδρασης ανά μαθητή κατά τη διαπίστωση της παραβίασης - Ποσοστό εσφαλμένων αντιδράσεων ανά συμμετέχοντα

Δεύτερο ερευνητικό ερώτημα

Η ανάλυση στο δεύτερο πείραμα έγινε με διαχωρισμό του σήματος σε δύο συνεχείς περιοχές. Η πρώτη περιοχή περιείχε το σήμα κατά την περίοδο που οι μαθητές εκτιμούσαν τις αριθμητικές παραστάσεις χωρίς περισπασμούς, ενώ η δεύτερη περιοχή με τους περισπασμούς. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος multitaper για την εκτίμηση της ισχύος του φάσματος (Power Spectral Density - PSD) του σήματος EEG, η οποία μειώνει τη μεταβλητότητα των εκτιμήσεων και βελτιώνει την ανάλυση συχνοτήτων σε σχέση με μια απλή ανάλυση Fourier. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζει πολλαπλά παράθυρα (tapers) σε ένα σήμα για να παράγει διαφορετικές εκδοχές του, και στη συνέχεια υπολογίζει το μετασχηματισμό Fourier (FFT) για κάθε παράθυρο. Τα αποτελέσματα αυτών των παραθύρων αθροίζονται και παρέχουν μια πιο αξιόπιστη εκτίμηση του φάσματος.

Σύγκριση καταστάσεων με/χωρίς περισπασμούς κατά την εκτέλεση της εργασίας

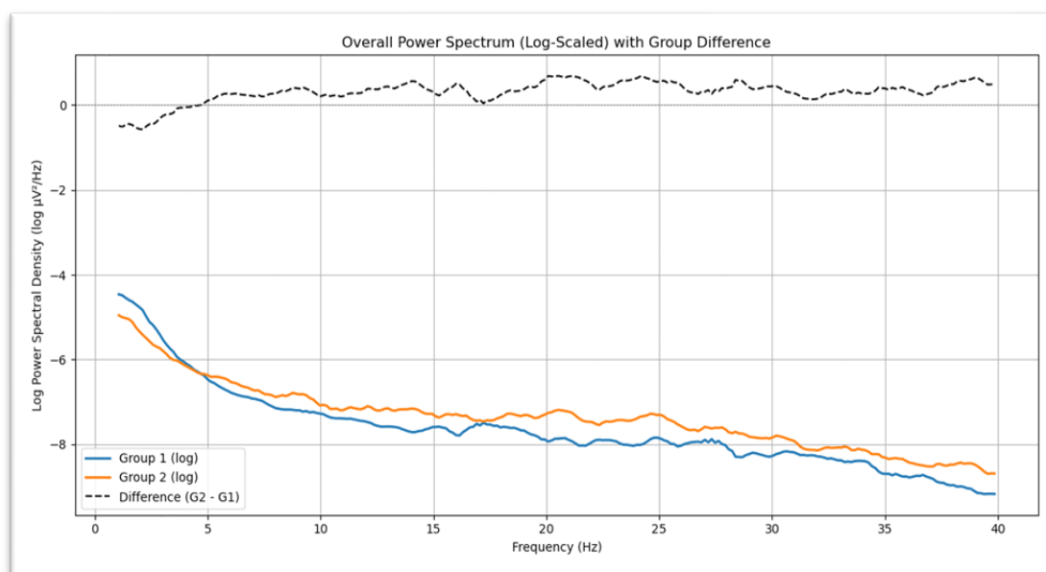
Το πείραμα διερεύνησε τη γνωστική επίδραση οπτικών περισπασμών (συγκρουόμενα σφαιρίδια) κατά την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων σε ένα περιβάλλον Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR) με χρήση ηλεκτροεγκεφαλογραφικών (EEG) δεδομένων. Τα κύρια ευρήματα αποκάλυψαν σημαντικές διαφορές στην νευρική δραστηριότητα μεταξύ της Ομάδας 1 (χωρίς περισπασμούς) και της Ομάδας 2 (με περισπασμούς), με μέτρια και μεγάλα μεγέθη επίδρασης ($r = 0,24-0,64$) που υπογραμμίζουν έντονες διακυμάνσεις σε όλες τις ζώνες συχνοτήτων (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Φασματική ισχύς στις ζώνες συχνοτήτων ανά συνθήκη (χωρίς/με περισπασμούς)

Frequency Band	Group 1 Mean Power $\mu V^2/Hz$	Group 2 Mean Power $\mu V^2/Hz$	Wilcoxon	p-value	Effect Size (r)
Delta	12.1253	4.0661	0.0	0.0000	0.502
Ερμηνεία: Group 1 (χωρίς περισπασμούς) > Group 2 (με περισπασμούς) (significant)					
Theta	0.2633	0.3337	8.0	0.0008	0.242
Ερμηνεία: Group 1 (χωρίς περισπασμούς) < Group 2 (με περισπασμούς) (significant)					
Alpha	0.0523	0.1043	0.0	0.0000	0.544
Ερμηνεία: Group 1 (χωρίς περισπασμούς) < Group 2 (με περισπασμούς) (significant)					
Beta	0.0155	0.0405	0.0	0.0000	0.644
Ερμηνεία: Group 1 (χωρίς περισπασμούς) < Group 2 (με περισπασμούς) (significant)					

Η μελέτη χρησιμοποίησε μη παραμετρικά στατιστικά τεστ (Wilcoxon) κατάλληλα για μικρά ή μη κανονικά δείγματα, με πολύ σημαντικές τιμές p ($p < 0,001$) στις ζώνες Delta, Theta, Alpha, Beta. Τη Gamma δεν τη μελετήσαμε λόγω του αρχικού φιλτραρίσματος των δεδομένων. Παρόλο που η χρήση «ξηρών» ηλεκτροδίων εισάγει ανησυχίες για θόρυβο, η συνεκτικότητα των αποτελεσμάτων υποστηρίζει την αξιοπιστία των δεδομένων.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε στο γράφημα 10 την ισχύ σε κάθε ζώνη για κάθε συνθήκη και την τοπογραφική κατανομή της κάθε κατάστασης καθώς και τη διαφορά μεταξύ της κατάστασης με περισπασμούς και χωρίς περισπασμούς ($\text{difference} = \text{Με_περισπασμούς} - \text{Χωρίς_περισπασμούς}$)

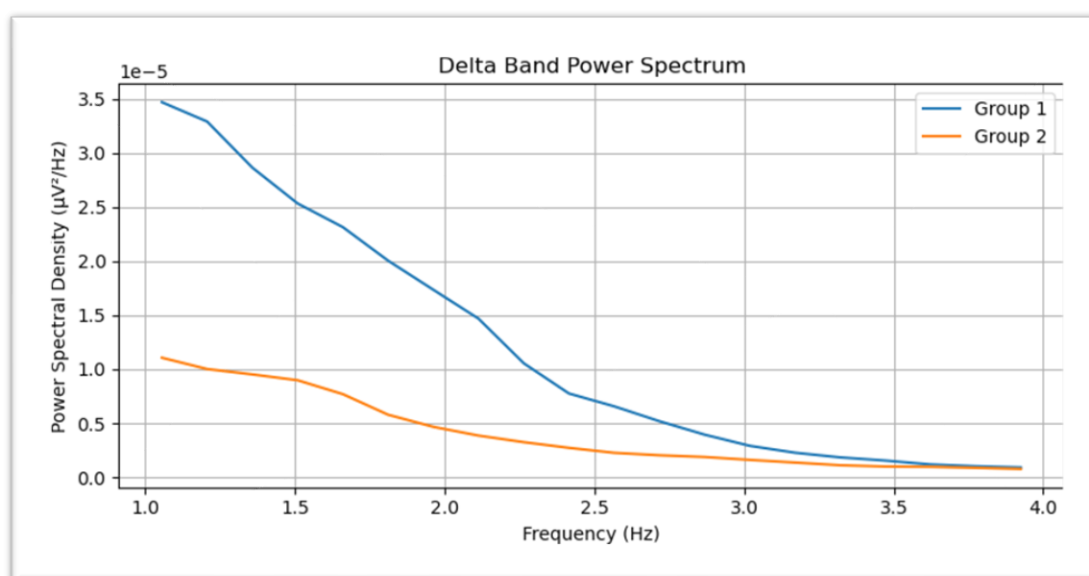


Γράφημα 10: Φασματική αποτύπωση των καταστάσεων με/χωρίς περισπασμούς

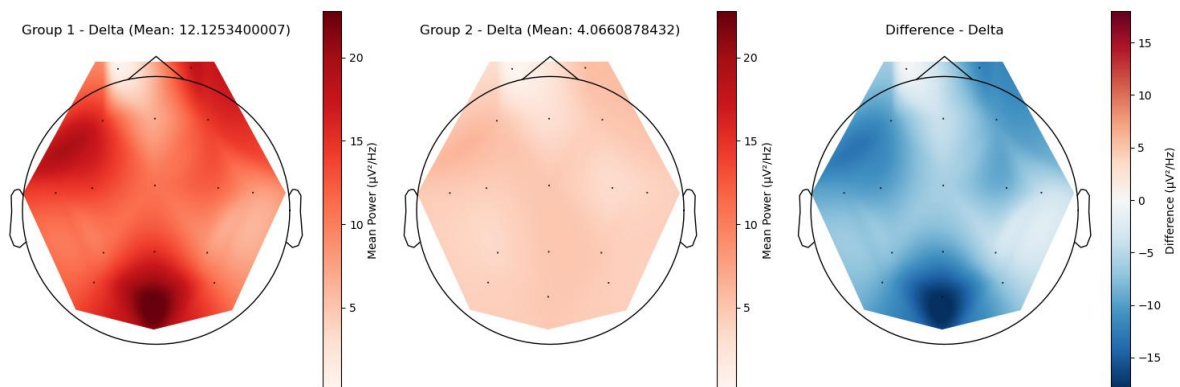
Μέγεθος και Επίδραση ανά Ζώνη Συχνοτήτων

1. περιοχή Δέλτα (0,5–4 Hz)

Η Ομάδα 1 (χωρίς περισπασμούς) έδειξε τριπλάσια περισσότερη ισχύ σε σχέση με την Ομάδα 2 (12 vs. 4 $\mu\text{V}^2/\text{Hz}$). Το υψηλό Delta στην Ομάδα 1 αντιστοιχεί σε χαλαρή κατάσταση συγκέντρωσης, απαραίτητη για διαρκή προσοχή. Οι περισπασμοί στην Ομάδα 2 μείωσαν το Delta (Γράφημα 11,12).



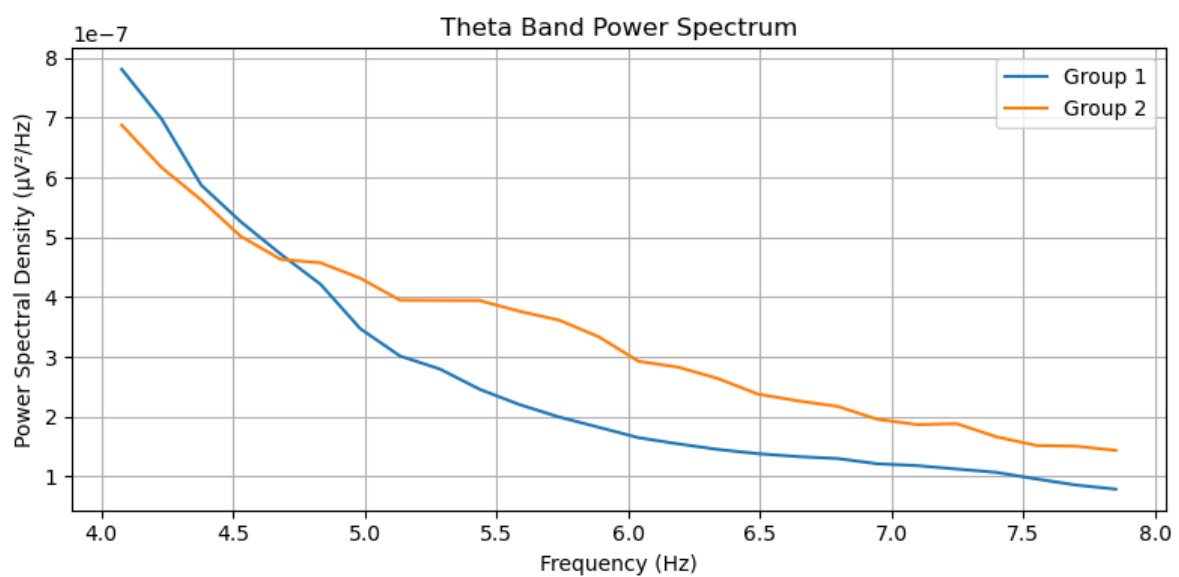
Γράφημα 11: Φασματική κατανομή και ισχύς της περιοχής δέλτα



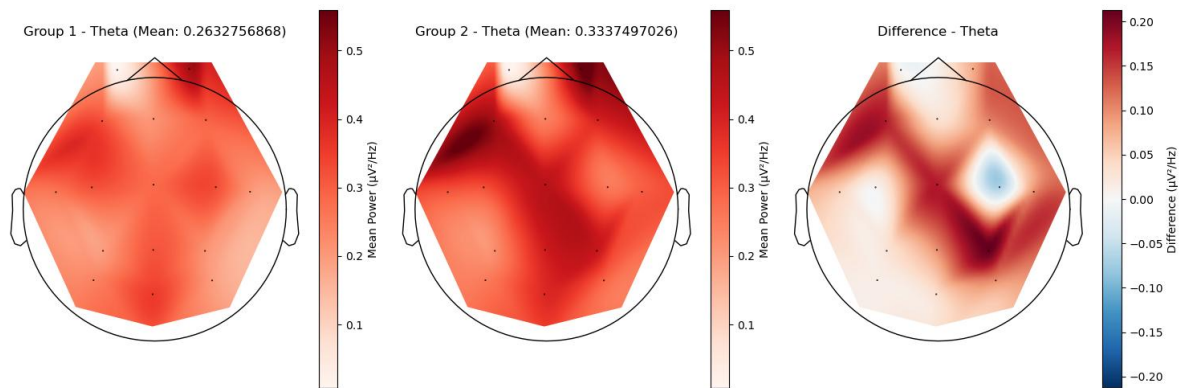
Γράφημα 12: Τοπογραφική κατανομή της περιοχής δέλτα

2. περιοχή Θήτα (4–8 Hz)

Οι μέσες τιμές για την ομάδα 1 ήταν 0,26 και για την ομάδα 2. 0,33 $\mu V^2/Hz$, παρουσίασαν στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση (Γραφήματα 13,14). Όταν υπήρχαν περισπασμοί παρατηρήσαμε στην Ομάδα 2 (με περισπασμούς) αύξηση της ισχύος της θήτα.



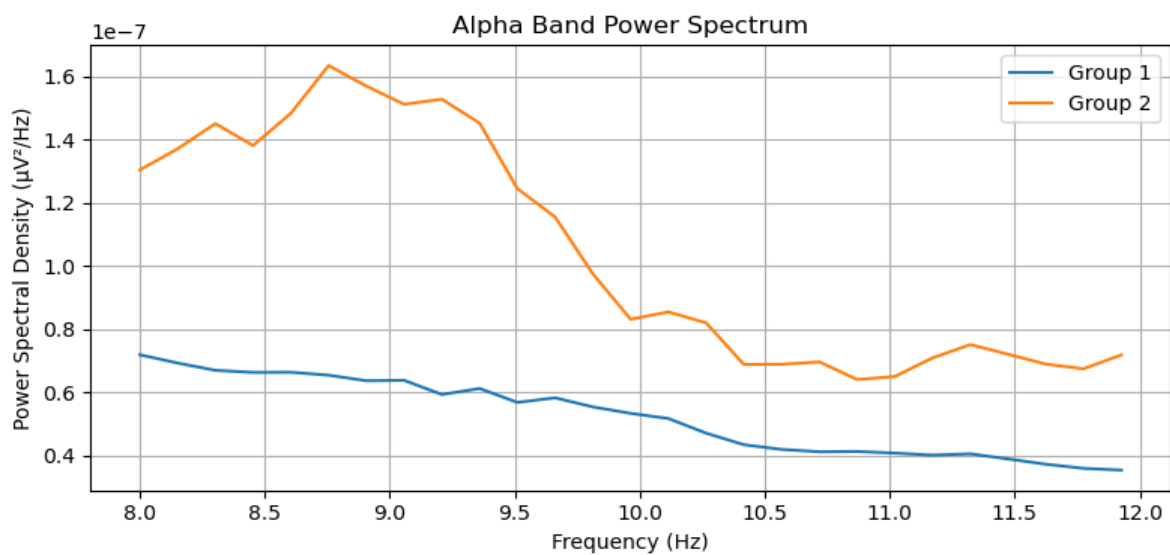
Γράφημα 13: Φασματική κατανομή και ισχύς της περιοχής θήτα



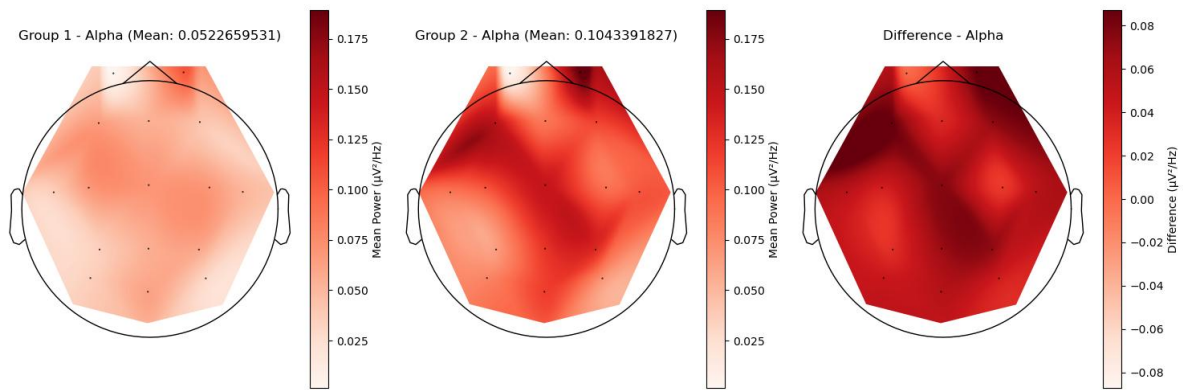
Γράφημα 14:Τοπογραφική κατανομή της περιοχής θήτα

3. περιοχή Άλφα (8–12 Hz)

Η Ομάδα 2 (με περισπασμούς) είχε δύο φορές υψηλότερη ισχύ 0,10 $\mu V^2/Hz$ σε σχέση με την Ομάδα 1. 0,05 $\mu V^2/Hz$ (Γραφήματα 15,16).



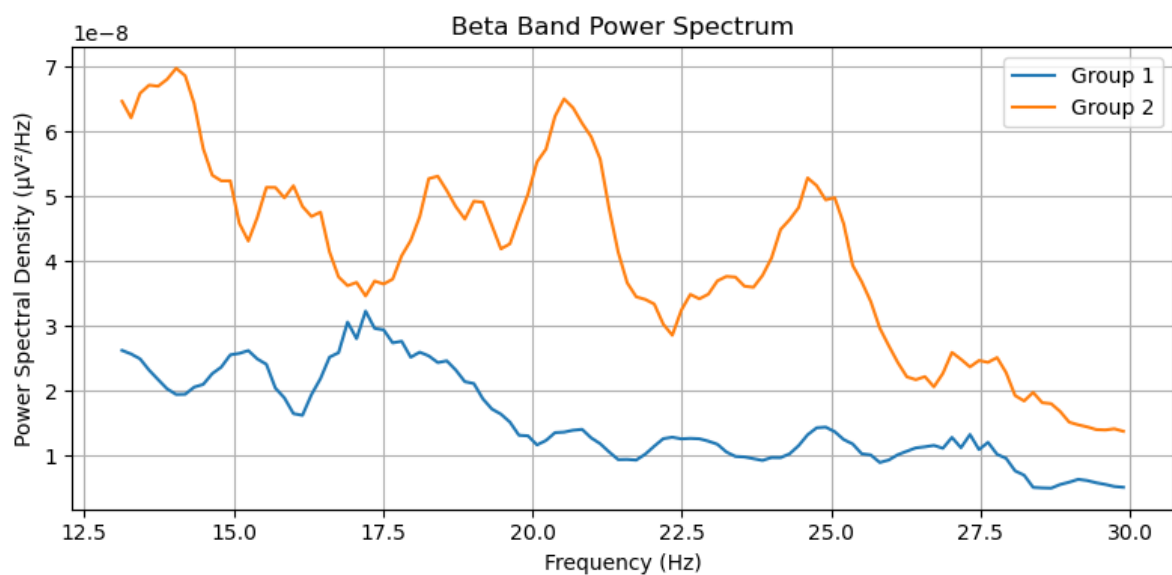
Γράφημα 15:Φασματική κατανομή και ισχύς της περιοχής άλφα



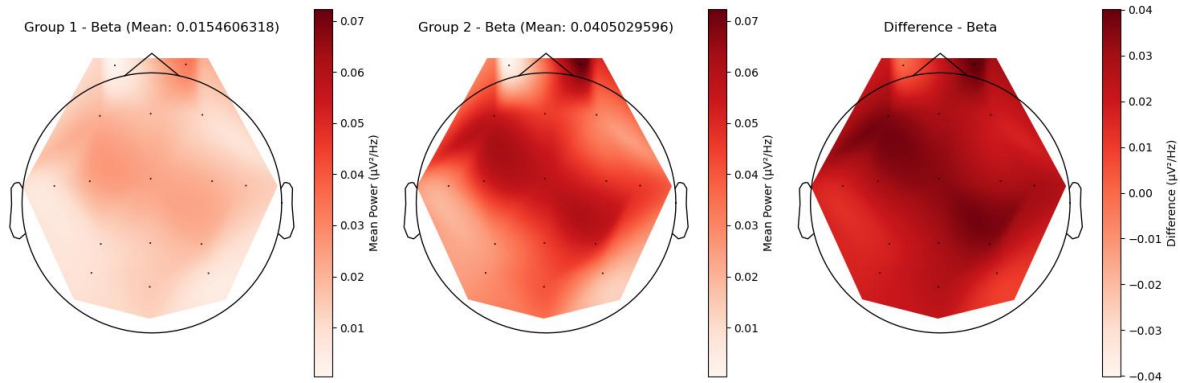
Γράφημα 16: Τοπογραφική κατανομή της περιοχής άλφα

4. περιοχή Βήτα (12–30 Hz)

Η Ομάδα 2 έδειξε υψηλότερη ισχύ (0,04 vs. 0,015 $\mu V^2/Hz$) σε σχέση με την πρώτη (Γραφήματα 17,18).



Γράφημα 17: Φασματική κατανομή και ισχύς της περιοχής βήτα



Γράφημα 18: Τοπογραφική κατανομή της περιοχής βήτα

Συνοψίζοντας, οι παρατηρούμενες αλλαγές στη δραστηριότητα των εγκεφαλικών κυμάτων κατά τη διάρκεια της φάσης των περισπασμών στο επαυξημένο περιβάλλον υποδεικνύουν μια μετάβαση προς υψηλότερη γνωστική συμμετοχή και προσοχή. Η αυξημένη δραστηριότητα στις περιοχές άλφα και βήτα υποδηλώνει ότι ο εγκέφαλος εστιάζει στη φιλτράρισμα των διαταραχών, στην ενεργή επεξεργασία πληροφοριών και στην ενίσχυση της γνωστικής λειτουργίας υψηλού επιπέδου. Η μειωμένη δραστηριότητα δέλτα υποδηλώνει μετατόπιση από μια χαλαρή ή χαμηλής συμμετοχής κατάσταση σε μια πιο ενεργή γνωστική επεξεργασία. Ο εγκέφαλος λοιπόν προσαρμόζεται σε εξωτερικές διαταραχές και διατηρεί την απόδοση της εργασίας μέσω δυναμικών αλλαγών στη δραστηριότητα των εγκεφαλικών κυμάτων.

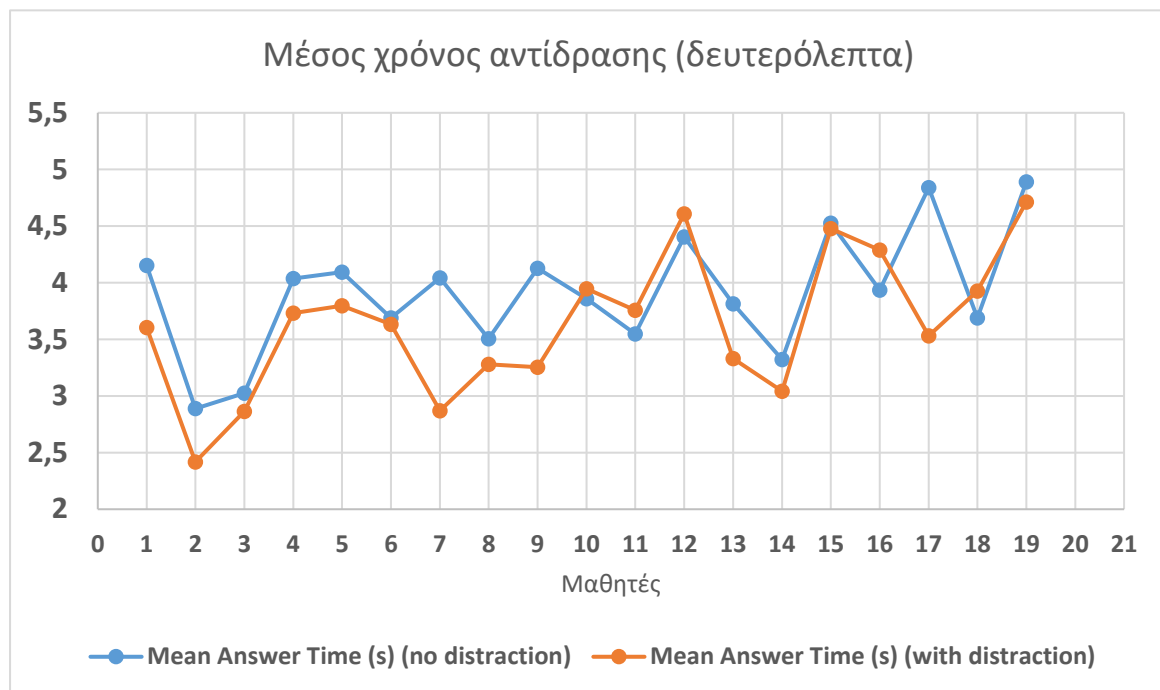
Απόδοση στην εργασία (ακρίβεια, ταχύτητα)

Η εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας έδινε τη δυνατότητα να καταγράφονται οι αυτόματα παραγόμενες μαθηματικές εκφράσεις, οι προτεινόμενες απαντήσεις, η απάντηση του μαθητή, αλλά και οι χρονικές στιγμές που αντιστοιχούσαν στα παραπάνω.

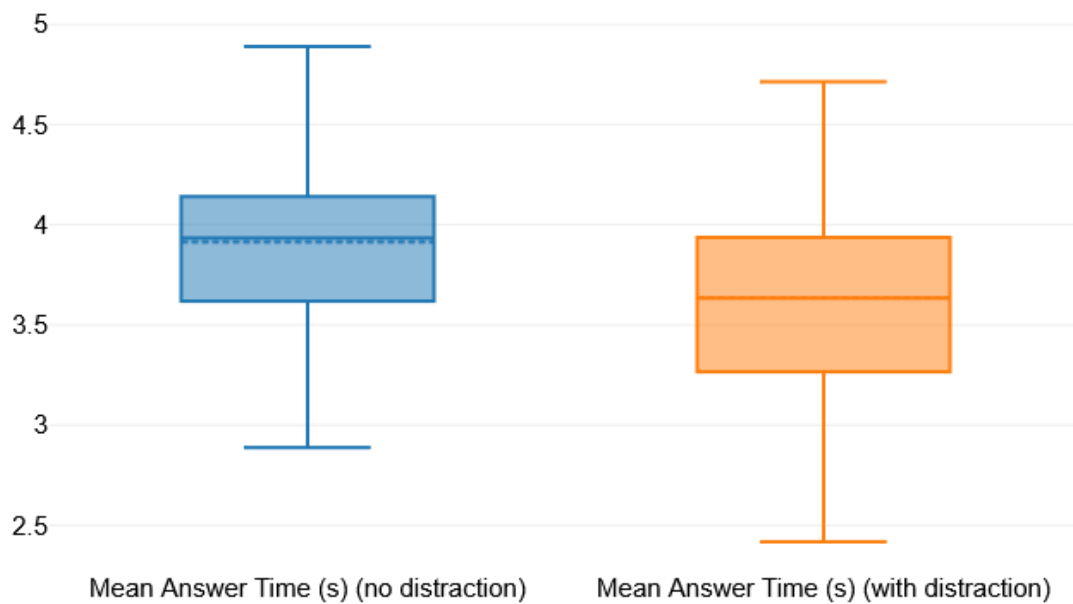
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο μέσος χρόνος απόκρισης κατά την αξιολόγηση μαθηματικών εκφράσεων είναι μικρότερος στην περίπτωση με οπτικούς περισπασμούς ($3,64 \pm 0,62$)s σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς περισπασμούς ($3,91 \pm 0,54$)s. Οι χρόνοι απόκρισης κυμάνθηκαν από 2,89 έως 4,89 δευτερόλεπτα χωρίς περισπασμούς και από 2,42 έως 4,71 δευτερόλεπτα με περισπασμούς. Η μέση τιμή με το τυπικό σφάλμα υπολογίστηκε σε ($3,91 \pm 0,54$) s χωρίς περισπασμούς και ($3,64 \pm 0,62$) s με περισπασμούς, υποδεικνύοντας ταχύτερη αντίδραση όταν υπάρχουν οπτικές παρεμβολές.

Διενεργήθηκε t-test για εξαρτημένα δείγματα για να συγκριθούν οι μέσοι χρόνοι απόκρισης μεταξύ των συνθηκών χωρίς περισπασμό και με περισπασμό. Διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στους χρόνους απόκρισης $t(18) = 2.66, p = .016$, με τις αποκρίσεις να είναι πιο αργές όταν δεν υπήρχαν περισπασμοί (3.91 s.) σε σύγκριση με όταν υπήρχαν περισπασμοί (3.64 s.). Η μέση διαφορά ήταν 0.28 s ($\sigma_m = 0.11$), με διάστημα εμπιστοσύνης 95% από 0.11 έως 1.10. Το μέγεθος επίδρασης ήταν μεσαίο ($Cohen's d = 0.611$), υποδεικνύοντας μέτρια επίδραση του περισπασμού στον χρόνο απόκρισης.

Στο Γράφημα 19 παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος αντίδρασης ανά μαθητή και στο Γράφημα 20 η διακύμανσή του.

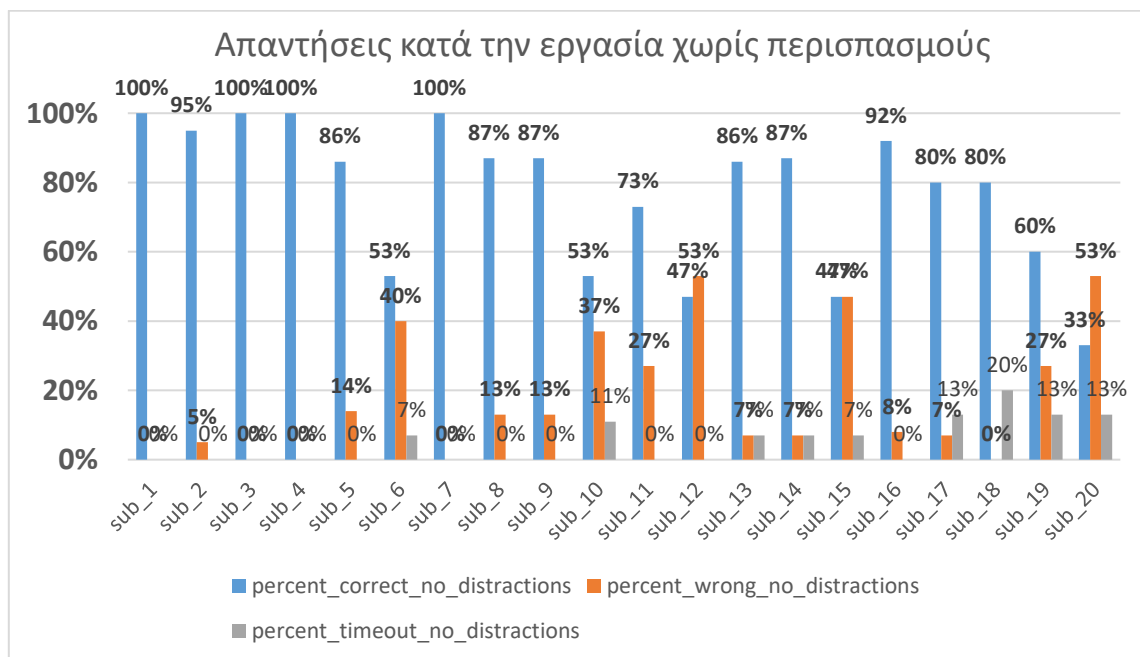


Γράφημα 19: χρόνος απάντησης ανά συμμετέχοντα



Γράφημα 20: Θηκόγραμμα χρόνου αντίδρασης μεταξύ των συνθηκών με/χωρίς περισπασμούς

Στο Γράφημα 21 αποτυπώνεται η ποσοστιαία ανάλυση των σωστών, λανθασμένων και εκτός χρόνου απαντήσεων για το σύνολο των μαθητών.

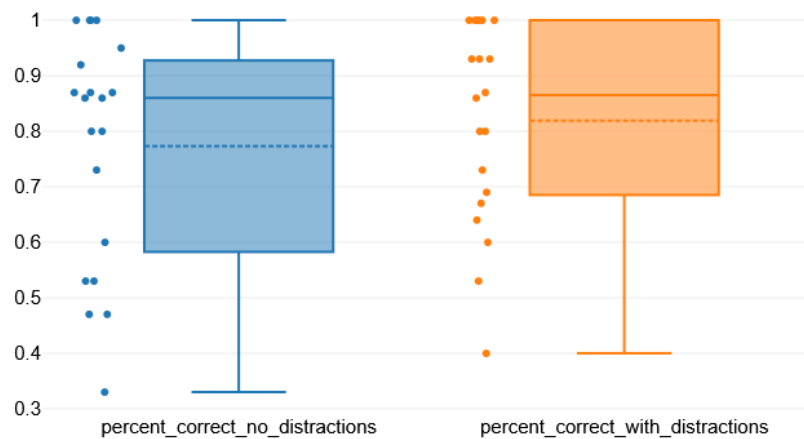


Γράφημα 21:Ανάλυση απαντήσεων χωρίς περισπασμούς

Η μέση τιμή με το τυπικό σφάλμα διαμορφώθηκε σε $(77 \pm 21)\%$ χωρίς περισπασμούς και $(82 \pm 18)\%$ με περισπασμούς. Η διακύμανσή τους παρουσιάζεται στο Γράφημα 23. Το μη παραμετρικό τεστ Wilcoxon έδειξε ότι αυτή η διαφορά δεν ήταν στατιστικά σημαντική, $W = 50$, $p = 0,209$. Η τιμή $p = 0,209$ είναι μεγαλύτερη από το καθορισμένο επίπεδο σημαντικότητας 0,05. Επομένως, το αποτέλεσμα δεν είναι στατιστικά σημαντικό. Συνεπώς, θεωρείται ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στις επιδόσεις τους.



Γράφημα 22: Ανάλυση απαντήσεων με περισπασμούς



Γράφημα 23: Σύγκριση σωστών απαντήσεων μεταξύ των δύο συνθηκών (με/χωρίς περισπασμούς)

Τα αποτελέσματα επηρεάζονται από το γεγονός ότι επιλέχθηκε ένα απλό έργο (βασική αξιολόγηση αριθμητικών εκφράσεων) και ο σχεδιασμός με χαμηλής έντασης περισπασμούς αποσκοπούσε όχι να αποσπάσει πλήρως με την έντασή τους την προσοχή τους (π.χ. χρησιμοποιώντας δυναμικές, πολυαισθητηριακές διακοπές) και να αποδιοργανώσουν την εκτέλεση της εργασίας, αλλά να προκαλέσουν μετρήσιμες νευρωνικές αλλαγές. Παρόλα αυτά όμως παρατηρούμε ότι ακόμη και σε αυτό το απλό έργο όταν μπαίνουν και οι ελάχιστοι χρονικοί περιορισμοί, οι μαθητές είναι δυνατό να συναντήσουν δυσκολίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

Συζήτηση

Σκοπός τις εργασίας ήταν να μελετηθεί αν η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) εμπλέκει ενεργά τους μαθητές στη μαθησιακή διαδικασία. Αναδείχθηκε ότι η επαυξημένη πραγματικότητα ενίσχυσε την προσοχή, την περιέργεια και τη γνωστική εμπύθιση των μαθητών. Στα δύο πειράματα οι μαθητές, στο σύνολό τους έδειξαν μεγάλο βαθμό συγκέντρωσης όπως προκύπτει από το μικρό πλήθος εσφαλμένων αντιδράσεων (πείραμα 1^ο) και το μεγάλο ποσοστό των εντός χρόνου απαντήσεων (πείραμα 2^ο), ενώ ολοκλήρωσαν τα πειράματα χωρίς κανένας να ζητήσει να τα διακόψει πρόωρα.

Πείραμα 1^ο Πρώτο ερευνητικό ερώτημα

Στο πρώτο πείραμα, το πλαίσιο που χρησιμοποιήσαμε είχε να κάνει με τις φυσικές επιστήμες και καλούσε τους μαθητές σε δράση, όταν σφαίρες, σε ένα περιβάλλον επαυξημένης πραγματικότητας, αψηφώντας τους νόμους της βαρύτητας, χωρίς αιτία, κινούνταν προς τα πάνω, επιφέροντας γνωστική σύγκρουση. Απαιτούσε από τους συμμετέχοντες αυξημένη προσοχή, αφού μόνο τότε θα μπορούσαν να εντοπίσουν αυτές τις μη αναμενόμενες αλλαγές στην κίνησή τους που ήταν ελάχιστης διάρκειας (0,2 δευτερόλεπτα), χωρίς να έχουν κάποια συμπληρωματική βοήθεια στον εντοπισμό από αλλαγές σε άλλα χαρακτηριστικά τους (πχ. μέγεθος, χρώμα, ήχο).

Η έρευνα μας ανέδειξε πως απροσδόκητα γεγονότα στο οπτικό πεδίο, όπως οι παραβάσεις των φυσικών νόμων στην κίνηση των σωμάτων προκαλούν στατιστικά σημαντικές διακριτές νευρικές αποκρίσεις σε σχέση με αυτές που προκαλεί η κανονική κίνηση των σωμάτων. Αυτές οι διαφορές ξεκινούν σε επίπεδο τάσης στα 50 ms, ενισχύονται γύρω από τα 200 ms, με την κορύφωση της διαφοροποίησης να συμβαίνει κοντά στα 290 ms μετά την παρουσίαση του ερεθίσματος – ασυνέπειας. Αυτά τα χρονικά διαστήματα συμπίπτουν με χρονικά παράθυρα που συνήθως συνδέονται με τα προκλητά δυναμικά C1, P200 και P300, υποδηλώνοντας γρήγορο εντοπισμό, αυξημένη γνωστική αξιολόγηση και επεξεργασία προσοχής ως απάντηση σε φυσικά απροσδόκητα γεγονότα.

Επικεντρωθήκαμε στη συνέχεια στην ανάλυση των δεδομένων που προέρχονταν από τις δοκιμές που σχετίζονταν με παραβίαση των φυσικών νόμων για να εντοπίσουμε πως επεξεργάζονται οι μαθητές γνωστικά αυτές τις καταστάσεις. Χρησιμοποιήθηκε ένα πείραμα τύπου oddball με προκλητά δυναμικά, μέθοδος που απαιτεί ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο

υλοποίησης, σχετίζεται με την απομόνωση δυναμικών της τάξης των λίγων μV και παρουσιάζει πρόσθετες δυσκολίες στο οπτικό πεδίο λόγω των πρόσθετων τεχνουργημάτων που εισάγει η αναπόφευκτη κίνηση των ματιών για την παρακολούθηση των ερεθισμάτων. Στην έρευνά μας καταφέραμε να πιστοποιήσουμε και να επιβεβαιώσουμε την ύπαρξή τους τόσο σε επίπεδο πλάτους, πολικότητας, χρονική στιγμή εμφάνισης, όσο και κατανομής - τοπολογίας. Τα κύρια χαρακτηριστικά των προκλητών δυναμικών που μελετήσαμε (C1, P200, P300) προσφέρουν μια μοναδική ευκαιρία κατανόησης των μηχανισμών προσοχής και επεξεργασίας της πληροφορίας. Η ανάλυση αποκάλυψε τη χαρτογράφηση όλης της διαδικασίας επεξεργασίας ενός ερεθίσματος που ξεκινά από την ακούσια σύλληψή του, προχωρά στην ενσυνείδητη επεξεργασία, κατάταξη, αξιολόγηση και λήγει με την ανάληψη δράσης. Επιβεβαιώσαμε, με την καταγραφή της αντίδρασής τους (μέσω του ηλεκτρολογίου) σε αρχείο και μετέπειτα επεξεργασία αυτού, πως μόνο τυχαία και αδικαιολόγητη δεν είναι η χρονική στιγμή ανάληψης της δράσης, η οποία έρχεται μόνο έπειτα από συγκεκριμένα στάδια νευρικής επεξεργασίας. Κάθε μαθητής ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρισκόταν, με την συμμετοχή του, την προσοχή του, ακόμα και με την ανατομία του, άφηνε τη δική του υπογραφή πάνω στα επιμέρους αυτά χαρακτηριστικά, τα οποία καταγράψαμε και αποτυπώσαμε και σε μετέπειτα έρευνα σκοπεύουμε να συσχετίσουμε με άλλες παραμέτρους τις εκπαιδευτικής διαδικασίας (π.χ. επίδοση). Οι μαθητές παρουσίασαν στα δυναμικά διαφορετικές εντάσεις (πλάτη) και χρόνους εμφάνισης (λανθάνοντες χρόνους) σαν απόκριση στα ερεθίσματα.

Το δυναμικό C1 είναι η πιο πρόωμη φλοιική απόκριση σε οπτικά ερεθίσματα, στην έρευνά μας καταγράφηκε 47 ms μετά την μη αναμενόμενη κίνηση των σφαιρών, σε συμφωνία με το χρονικό παράθυρο (40–90 ms) που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία (Jeffreys & Axford, 1972; Clark et al., 1995). Το πλάτος που καταγράψαμε ήταν $-0,63 \mu V$, λίγο μικρότερο σε σχέση με έρευνες που το θέλουν να κυμαίνεται μεταξύ 5 και $15 \mu V$, αν σε αυτές τονίζεται ότι η έντασή μπορεί να επηρεαστεί από ατομικές διαφορές και τα χαρακτηριστικά του ερεθίσματος (Clark et al., 1995; Pourtois et al., 2004). Αποδίδουμε το μικρό αυτό πλάτος στην εξοικείωση και εκπαίδευση που απέκτησαν με την επανάληψη λόγω των πολλών δοκιμών και συνηγορούμε υπέρ της πρόωμης πλαστικότητας στον φλοιό (Pourtois et al., 2008), την ανατροφοδότηση με πληροφορίες από ανώτερες περιοχές (π.χ., βρεγματικός ή μετωπιαίος φλοιός) προς τον V1, με ενίσχυση της αντίληψης και ρύθμιση τελικά του πλάτους αυτού. Όσον αφορά την κατανομή της στο τριχωτό της κεφαλής, εκδηλώθηκε με αρνητικότητα στην ινιακή μέση γραμμή (ηλεκτρόδιο Oz) και στην P08. Η κατανομή που παρατηρήσαμε συμφωνεί με τη βιβλιογραφία

που την τοποθετεί κυρίως σε οπίσθια βρεγματικά ηλεκτρόδια, ειδικά στα Pz και Oz, γεγονός και αντικατοπτρίζει την προέλευσή της από τον πρωτογενή οπτικό φλοιό (V1) (Di Russo et al., 2002, Fox et al., 2008; Slotnick, 2020). Η ελάχιστη δραστηριότητα σε μετωπικές ή βρεγματικές περιοχές υπογραμμίζει ότι το C1 προέρχεται από αισθητηριακές διεργασίες χαμηλού επιπέδου, χωρίς σημαντική συμβολή ανώτερων γνωστικών δικτύων. Το C1 λειτουργεί λοιπόν ως νευροβιολογικός δείκτης γρήγορης οπτικής αντίληψης, ακόμη και για σύντομα ερεθίσματα (0,2 s), τα οποία ενδεχομένως να μην επαρκούν για πλήρη επεξεργασία κίνησης. Το δυναμικό C1 ιστορικά θεωρούνταν ανθεκτικό στη ρύθμιση από την προσοχή (Anllo-Vento & Hillyard, 1996; Clark & Hillyard, 1996). Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι υπό συγκεκριμένες συνθήκες, όπως υψηλό αντιληπτικό φορτίο ή εργασίες βασισμένες σε επιμέρους χαρακτηριστικά του ερεθίσματος, η προσοχή μπορεί να επηρεάσει την C1 (Kelly et al., 2008; Fu et al., 2009; Prasad et al., 2023). Μια μετα-ανάλυση των Qin et al. (2022) επιβεβαίωσε αυτή τη δυνατότητα, δείχνοντας μέτρια ρύθμιση της C1 από την προσοχή. Αυτό υποδηλώνει ότι η πρώιμη αισθητηριακή επεξεργασία δεν είναι αυστηρά προωθητική, όπως υποστήριζε η παραδοσιακή θεωρία, η οποία θεωρούσε τη ροή της πληροφορίας ως μονοκατευθυντική από τα χαμηλότερα αισθητηριακά κέντρα (όπως ο πρωτοταγής οπτικός φλοιός V1) προς τα ανώτερα γνωστικά κέντρα, χωρίς ανατροφοδότηση ή επιρροή από ανώτερες γνωστικές διεργασίες. Σύγχρονες προσεγγίσεις αναδεικνύουν την ύπαρξη μηχανισμών ανώτερης τάξης (top-down signals), όπως η προσοχή, οι προσδοκίες και η εκμάθηση, οι οποίοι επηρεάζουν ακόμα και τα πρώιμα στάδια επεξεργασίας στον V1. Η θεωρία της προβλεπτικής κωδικοποίησης (predictive coding) προτείνει ότι ο εγκέφαλος δημιουργεί ενεργά προβλέψεις για τα αισθητηριακά ερεθίσματα και στέλνει σήματα ανατροφοδότησης στα πρωτογενή αισθητηριακά κέντρα, προσαρμόζοντας τη νευρωνική δραστηριότητα με βάση τις προσδοκίες. Επιπλέον, οι μηχανισμοί επαναπληροφόρησης (reentrant processing) επιτρέπουν την ανατροφοδότηση πληροφοριών από ανώτερες περιοχές (π.χ., βρεγματικός ή μετωπιαίος φλοιός) προς τον V1, ενισχύοντας την αντίληψη σε σύνθετες ή αβέβαιες σκηνές. Συνολικά, τα ευρήματα αυτά καταρρίπτουν την παραδοσιακή άποψη της καθαρά προωθητικής ροής πληροφορίας, υποστηρίζοντας ότι η πρώιμη αισθητηριακή επεξεργασία δεν αποτελεί απλώς μια παθητική αντανάκλαση της αισθητηριακής εισόδου, είναι δυναμική και αλληλεπιδραστική, μπορεί να τροποποιηθεί από την εμπειρία, ενισχύοντας τη σημασία της σε εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (AR) όπου η μάθηση και η προσαρμογή είναι κρίσιμες. Στην έρευνά μας η παραβίαση γινόταν συνήθως σε ένα ουδέτερο σημείο σε σχέση με το οπτικό πεδίο και η πολικότητα καταγράφηκε σαν αρνητική, όμως με βάση τη βιβλιογραφία ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της C1 είναι η αρνητική πολικότητα όταν

το ερέθισμα εμφανίζεται στο άνω οπτικό πεδίο και η θετική πολικότητα όταν το ερέθισμα εμφανίζεται στο κάτω οπτικό πεδίο: τα ερεθίσματα στο άνω οπτικό πεδίο προκαλούν αρνητική εκτροπή, ενώ τα ερεθίσματα στο κάτω οπτικό πεδίο δημιουργούν θετική εκτροπή (Clark et al., 1995).

Το δυναμικό P200 καταγράφηκε στην έρευνά μας σαν μια θετική αιχμή που εμφανίζεται περίπου στα 211 ms μετά την έναρξη της παραβίασης στην ομαλή κίνηση, με κεντρική κατανομή, κυρίως στο Cz, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία (Kong et al., 2010; O'Donnell et al., 1997), υποδεικνύοντας ενεργοποίηση του οπτικοκινητικού και του μετωποβρεγματικού δικτύου (Höfel et al., 2007). Το πλάτος της P200 που καταγράψαμε ήταν +2.48μV, στη βιβλιογραφία κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 2 και 10 μV, αν και οι τιμές επηρεάζονται από τη σημασία και τη συναισθηματική φόρτιση των ερεθισμάτων (Luck, 2014; Carretié et al., 2004). Έρευνες δείχνουν ότι η P200 ενισχύεται σε ερεθίσματα που κρίνονται ως σημαντικά ή απρόσμενα, καθώς η ενίσχυση του πλάτους σχετίζεται με την αυξημένη κατανομή προσοχής και την αρχική αξιολόγηση των πληροφοριών (Kok, 2001; Carretié et al., 2004). Σε πειράματα τύπου oddball, όπου οι συμμετέχοντες καλούνται να ανιχνεύσουν σπάνια ή σημαντικά γεγονότα, το πλάτος της P200 είναι αυξημένο, αντανακλώντας τη μεγαλύτερη γνωστική επεξεργασία και την προσοχή που δίνεται στα κρίσιμα ερεθίσματα (Kok, 2001). Επιπλέον, η P200 ενισχύεται σε συναισθηματικά φορτισμένα ερεθίσματα, υποδηλώνοντας ότι το ανθρώπινο σύστημα αντιλαμβάνεται γρήγορα την ενδεχόμενη σημασία αυτών των πληροφοριών (Carretié et al., 2004). Συνδέεται με την ανίχνευση απρόσμενων γεγονότων, όπως ανωμαλίες στην κίνηση, ενεργοποιώντας μετωποκεντρικά δίκτυα που ελέγχουν τη συνέπεια της κίνησης (Kourtzi & Shiffrar, 2001). Η χρονική μετατόπιση της P200 (~211 ms) σε σύγκριση με τα κλασικά oddball paradigms (~160 ms) αντανακλά τον αυξημένο γνωστικό φόρτο που απαιτεί η ανάλυση αποκλίσεων μεταξύ αναμενόμενης και παρατηρούμενης συμπεριφοράς (McIntosh et al., 2008). Η P200 λειτουργεί ως "γέφυρα" μεταξύ της πρώιμης αισθητηριακής επεξεργασίας (C1/P100/N100) και της γνωστικής ανάλυσης (P300), προετοιμάζοντας το έδαφος για πιο σύνθετες διεργασίες (Höfel et al., 2007).

Η συνιστώσα P300 αποτελεί έναν από τους πιο μελετημένους δείκτες των προκλητών δυναμικών και σχετίζεται άμεσα με την προσοχή και τη γνωστική επεξεργασία. Το πλάτος και ο λανθάνων χρόνος της P300 επηρεάζονται σημαντικά από την εστίαση της προσοχής και τις απαιτήσεις της γνωστικής επεξεργασίας. Σε υγιείς ενήλικες, το πλάτος της P300 κυμαίνεται συνήθως δεν ξεπερνά τα 20 μV, με μέση τιμή περίπου 4.5 μV (Polich, 2007; Kok, 2001; Sorout et al., 2022). Το πλάτος αυτό αντικατοπτρίζει την ποσότητα των γνωστικών πόρων που

κατανέμονται για την επεξεργασία ενός ερεθίσματος, αυξάνεται όταν η προσοχή είναι επικεντρωμένη και μειώνεται όταν η γνωστική φόρτιση είναι χαμηλή ή η προσοχή διασπάται (Polich, 2007; Kok, 2001). Η λανθάνουσα περίοδος της P300 εμφανίζεται συνήθως μεταξύ 250 και 500 ms μετά την παρουσίαση του ερεθίσματος, με μέση τιμή περίπου 281 ms (Johnson, 1986; Picton, 1992). Η καθυστέρηση αυτή σχετίζεται με την ταχύτητα της γνωστικής επεξεργασίας και την αναγνώριση του ερεθίσματος. Όταν τα ερεθίσματα είναι δύσκολα ή η προσοχή είναι διασπασμένη, η λανθάνουσα περίοδος τείνει να αυξάνεται, αντανakλώντας μεγαλύτερη προσπάθεια για την ανάλυση των πληροφοριών (Johnson, 1986; Picton, 1992). Στην έρευνά μας αναζητήσαμε και εντοπίσαμε το P300, το οποίο εμφανίστηκε με ισχυρή θετική απόκριση 298 ms μετά την παραβίαση της κίνησης, χρόνος που υποδηλώνει μια μέτρια γνωστική καθυστέρηση στην κατηγοριοποίηση του ερεθίσματος, η οποία ευθυγραμμίζεται με τις αυξημένες απαιτήσεις επεξεργασίας που εγγράφονται στην ανίχνευση μεταβατικών, απρόβλεπτων ανωμαλιών κίνησης σε ένα πεδίο AR. Η καθυστέρηση αποκαλύπτει ότι η παραβίαση φυσικών νόμων απαιτεί επιπλέον χρόνο για νοητική προσομοίωση, καθιστώντας την P300 έναν ευαίσθητο δείκτη φυσικής αντίληψης (McIntosh et al., 2008). Το πλάτος ήταν 3,92 μ V, με το μεγάλο αυτό πλάτος να υποδηλώνει το βαθμό της γνωστικής σύγκρουσης μεταξύ της παρατηρούμενης κίνησης και των εσωτερικών αναπαραστάσεων της βαρύτητας (Donchin & Coles, 1988). Η κατανομή του είχε βρεγματική εστίαση (Pz) και επέκταση στα Cz, P3, P4. Η κατανομή της συμφωνεί με την υπάρχουσα βιβλιογραφία (Sangal & Sangal, 1996; Katayama & Polich, 1999; Ji et al. 1999). Η βρεγματική ενεργοποίηση σχετίζεται με ενημέρωση της εργαζόμενης μνήμης και ενσωμάτωση πολυτροπικών πληροφοριών (Polich, 2007). Το P300 τόσο σε επίπεδο πλάτους όσο και σε επίπεδο λανθάνοντα χρόνου εμφάνισης είχε τη μεγαλύτερη διακύμανση και μπορεί να αποτελέσει και τον κυριότερο παράγοντα διαφοροποίησης μεταξύ των μαθητών.

Στην έρευνά μας καταγράψαμε το χρόνο αντίδρασης (Reaction Time - RT) και το ποσοστό των εσφαλμένων αναγνώρισεων. Το πλήθος των παραβιάσεων στην κίνηση που εντοπίστηκαν εσφαλμένα ήταν κατά μέσο όρο μόνο 3%, ενώ ο μέσος χρόνος αντίδρασης ήταν 0.37 δευτερόλεπτα. Ο χρόνος αυτός είναι σε συμφωνία χρονικά με τη λανθάνουσα περίοδο της P300 (0.305s) και προσφέρει κρίσιμες πληροφορίες για τη σχέση νευρογνωστικής επεξεργασίας και συμπεριφοράς. Η αντίδραση (370ms) εμφανίζεται λίγο μετά την κορύφωση της P300 (305ms), υποδηλώνοντας ότι η γνωστική επίλυση της ανωμαλίας (P300) αποτελεί το κρίσιμο στάδιο πριν την απάντηση. Η μικρή χρονική διαφορά αντανakλά την ταχύτητα μετάβασης από τη νοητική απόφαση (P300) στη συμπεριφορική εκδήλωση (Kutas et al., 1977). Το μεγάλο πλάτος

της P300 (3,92 μV) και ο σχετικά γρήγορος RT υποστηρίζουν την υπόθεση ότι η έντονη γνωστική σύγκρουση (που εκφράζεται από την P300) επιταχύνει τη λήψη απόφασης. Αυτό συμβαδίζει με θεωρίες που θέτουν την P300 ως δείκτη "καθαρισμού" της εργαζόμενης μνήμης πριν τη δράση (Polich, 2007).

Δεύτερο ερευνητικό ερώτημα

Στο δεύτερο πείραμα, το πλαίσιο που χρησιμοποιήσαμε και είχε να κάνει με τις φυσικές επιστήμες και συγκεκριμένα με τα μαθηματικά. Οι μαθητές καλούνταν να εκτιμούν το αποτέλεσμα τυχαία δημιουργημένων μαθηματικών εκφράσεων κάτω από δύο συνθήκες, χωρίς περισπασμούς και με περισπασμούς που είχαν τη μορφή συγκρουόμενων σφαιρών. Αποδείξαμε ότι υπάρχει προσαρμογή της εγκεφαλικής λειτουργίας προκειμένου να εκτελεστεί το μαθησιακό έργο με μετάβαση προς μια υψηλότερη γνωστική συμμετοχή και προσοχή. Η αυξημένη δραστηριότητα άλφα και βήτα υποδηλώνει ότι ο εγκέφαλος εστιάζει στη φιλτράρισμα των διαταραχών, στην ενεργή επεξεργασία πληροφοριών και στην ενίσχυση της γνωστικής λειτουργίας υψηλού επιπέδου. Η μειωμένη δραστηριότητα δέλτα υποδηλώνει μετατόπιση από μια χαλαρή ή χαμηλής συμμετοχής κατάσταση σε μια πιο ενεργή γνωστική επεξεργασία. Η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε είχε να κάνει με τη φασματική ανάλυση των εγκεφαλογραφημάτων και μελετήσαμε πως διαφοροποιούνται οι ζώνες συχνοτήτων (δέλτα, θήτα, άλφα, βήτα) μεταξύ των δύο καταστάσεων.

Η μείωση της δέλτα κατά τη διάρκεια της εργασίας με περισπασμούς αντανakλά μια μετάβαση από μια κατάσταση χαλαρής προσοχής σε μια κατάσταση εγρήγορσης. Οι ρυθμοί δέλτα συνήθως σχετίζονται με τον βαθύ ύπνο και την χαμηλή γνωστική απαίτηση (Begum et al., 2013). Η καταστολή της δραστηριότητας στη δέλτα ζώνη κατά τη διάρκεια της φάσης των περισπασμών υποδηλώνει ότι ο εγκέφαλος μεταβαίνει σε μια πιο ενεργή και συμμετοχική κατάσταση για να επεξεργαστεί τις απαιτήσεις της εργασίας και τα εξωτερικά ερεθίσματα. Η αύξηση του γνωστικού φόρτου και των απαιτήσεων προσοχής, όπως εκείνες που απαιτούνται για την εκτέλεση της μαθηματικής εργασίας σε περιβάλλον περισπασμών, έχει συνδεθεί με την καταστολή του δέλτα (Muehling et al., 2020). Οι εφαρμογές AR θα πρέπει λοιπόν να ελαχιστοποιούν την οπτική πολυπλοκότητα κατά τις αναλυτικές εργασίες.

Η υψηλότερη ισχύς θήτα που παρατηρήθηκε κατά την εργασία με οπτικούς περισπασμούς, σε σύγκριση με την εργασία χωρίς περισπασμούς, μαζί με τους ταχύτερους χρόνους απόκρισης και την ίδια ακρίβεια, υποδηλώνει αυξημένη γνωστική προσπάθεια για την

καταστολή των παρεμβολών και τη διατήρηση της προσοχής. Η δραστηριότητα θήτα φαίνεται να ενεργοποιεί μηχανισμούς προσαρμοστικού ελέγχου, ενισχύοντας την ικανότητα φιλτραρίσματος άσχετων ερεθισμάτων (Cavanagh & Frank, 2014; Wöstmann et al., 2019). Σε απλές αριθμητικές εργασίες, όπου το γνωστικό φορτίο είναι χαμηλό, οι συμμετέχοντες μπορούν να ανακαταναείμουν πόρους για την αντιμετώπιση περισπασμών, αυξάνοντας την ισχύ θήτα και την ταχύτητα απόκρισης (Lenartowicz et al., 2018). Επιπλέον, η θήτα ισχύς φαίνεται να σχετίζεται με την απαιτούμενη γνωστική προσπάθεια και όχι αποκλειστικά με τη δυσκολία της εργασίας, υποδηλώνοντας ότι η αυξημένη προσπάθεια για τη διατήρηση της προσοχής μπορεί να ενισχύει τις ταλαντώσεις θήτα, ακόμα και σε απλά καθήκοντα (Berger et al., 2018). Η θήτα επίσης συνδέεται με τη μνήμη εργασίας και τον γνωστικό έλεγχο (Klimesch, 1999), ενώ η αυξημένη θήτα σε συνθήκες περισπασμών αντανακλά την προσπάθεια του εγκεφάλου να φιλτράρει τα άσχετα ερεθίσματα. Προτείνεται ότι οι εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις επιπτώσεις της παρατεταμένης χρήσης, καθώς η συνεχής προσπάθεια διατήρησης της προσοχής μπορεί να οδηγήσει σε γνωστική κόπωση.

Η αύξηση της ισχύος στην ζώνη άλφα κατά την εργασία με οπτικούς περισπασμούς είναι συμβατή με την έρευνα που υποστηρίζει ότι οι ρυθμοί άλφα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον ανασταλτικό έλεγχο και στην γνωστική ρύθμιση. Τα πειραματικά δεδομένα αποκαλύπτουν διακριτά πρότυπα ταλαντώσεων άλφα μεταξύ των δύο ομάδων που εκτέλεσαν μαθηματικές πράξεις υπό διαφορετικές συνθήκες προσοχής. Η εργασία χωρίς περισπασμούς, παρουσίασε χαμηλότερη μέση ισχύ άλφα, με αποσυγχρόνιση (ERD) στις βρεγματο-ινιακές περιοχές. Αυτό το πρότυπο αντικατοπτρίζει τη χαρακτηριστική νευρωνική υπογραφή της εξωγενούς εστίασης της προσοχής, όπου η οπτική επεξεργασία των μαθηματικών ερεθισμάτων καταστέλλει τη δραστηριότητα άλφα στις οπίσθιες περιοχές. Αντίθετα, η εργασία με την παρουσία οπτικών παρεμβολών, παρουσίασε σημαντικά υψηλότερη μέση ισχύ άλφα, με ισχυρό συγχρονισμό (ERS) που ήταν πιο έντονη στις μετωπο-κεντρικές περιοχές. Αυτή η ενίσχυση της μετωπιαίας άλφα αντικατοπτρίζει έναν αντισταθμιστικό νευρωνικό μηχανισμό για την ενεργή καταστολή των παρεμβολών και τη διατήρηση της εστίασης στην εργασία, σε συμφωνία με την υπόθεση της ανασταλτικής πύλης των ταλαντώσεων άλφα (Cooper et al., 2003). Οι αλλαγές στην ισχύ της άλφα είναι λοιπόν περιοχικά εξειδικευμένες, εμφανίζοντας αποσυγχρόνιση (ERD) στις βρεγματο-ινιακές περιοχές κατά τη διάρκεια οπτικών εργασιών και συγχρόνιση (ERS) στις μετωπο-κεντρικές περιοχές κατά τη διάρκεια αριθμητικών υπολογισμών, υπογραμμίζοντας διακριτούς ρόλους στη ρύθμιση της προσοχής (Foxye &

Snyder, 2011). Τα ευρήματα αυτά αναδεικνύουν τη δυναμική φύση των ταλαντώσεων άλφα, με τη μετωπιαία δραστηριότητα άλφα να ενισχύει τη γνωστική σταθερότητα υπό περισπασμούς, ενώ η οπίσθια ρύθμιση άλφα αντικατοπτρίζει την επεξεργασία οπτικών πληροφοριών σχετικών με την εργασία. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η ισχύς άλφα αυξάνεται κατά τη διάρκεια εργασιών απόρριψης ή εσωτερικά κατευθυνόμενης προσοχής, ώστε να ανασταλεί ή να απορριφθεί η εισερχόμενη αισθητηριακή πληροφορία (Ray & Cole, 1985; Foxe & Snyder, 2011; Klimesch et al., 2007; Jensen & Mazaheri, 2010). Πολλές μελέτες έχουν δείξει σημαντικό συγχρονισμό άλφα που σχετίζεται με το γνωστικό φορτίο της μνήμης, ιδιαίτερα όταν οι συμμετέχοντες έπρεπε να διατηρήσουν πληροφορίες για σύντομα χρονικά διαστήματα (Jensen et al., 2002). Αυτός ο μηχανισμός φιλτραρίσματος επιτρέπει την απομόνωση των γνωστικών διεργασιών από εξωτερικές διαταραχές, βελτιστοποιώντας την απόδοση κατά τη διάρκεια απαιτητικών νοητικών δραστηριοτήτων (Magosso et al., 2019). Ειδικότερα, η ισχύς άλφα αυξάνεται σε επίπεδα συγκρίσιμα με την κατάσταση χαλάρωσης κατά τη διάρκεια αριθμητικών υπολογισμών, δείχνοντας ότι οι ταλαντώσεις άλφα βοηθούν στην απομόνωση του εγκεφάλου από εξωτερικούς περισπασμούς κατά την εσωτερική επεξεργασία (Magosso et al., 2019).

Οι τοπογραφικοί χάρτες για τη ζώνη συχνοτήτων βήτα (13–30 Hz) αποκαλύπτουν σαφείς διαφορές στην κατανομή της ισχύος μεταξύ της εργασίας χωρίς περισπασμούς και της εργασίας με περισπασμούς. Η εργασία χωρίς περισπασμούς παρουσίασε χαμηλότερη μέση ισχύ βήτα, η οποία εντοπίστηκε κυρίως σε μετωποκεντρικές και βρεγματικές περιοχές, με σχετικά αραιή κατανομή σε όλο το τριχωτό της κεφαλής. Αντίθετα, η εργασία με περισπασμούς εμφάνισε σημαντικά υψηλότερη μέση ισχύ βήτα με έντονη και εκτεταμένη ενεργοποίηση στις μετωποκεντρικές και βρεγματικές περιοχές. Ο χάρτης διαφορών, ο οποίος αντιπροσωπεύει την διαφορά μεταξύ των δύο συνθηκών (εργασία_με_περισπασμούς – εργασία_χωρίς_περισπασμούς), δείχνει έντονες αυξήσεις στην ισχύ βήτα στην εργασία με περισπασμούς σχεδόν σε ολόκληρο το τριχωτό της κεφαλής, ιδιαίτερα στις μετωποκεντρικές και βρεγματικές περιοχές, χωρίς σε καμία περιοχή να γίνεται το αντίθετο. Αυτή η αυξημένη ισχύς βήτα στην εργασία με περισπασμούς υποδηλώνει ενισχυμένη αισθητικοκινητική και προσοχική συμμετοχή υπό συνθήκες περισπασμών. Οι ταλαντώσεις βήτα είναι καλά τεκμηριωμένες για τον ρόλο τους στη διατήρηση της γνωστικής σταθερότητας και στο "φιλτράρισμα" των αισθητηριακών πληροφοριών κατά τη διάρκεια απαιτητικών ως προς την προσοχή εργασιών (Engel & Fries, 2010). Η ισχυρότερη ενεργοποίηση στις μετωποκεντρικές περιοχές στην εργασία με περισπασμούς αντικατοπτρίζει ενισχυμένο σχεδιασμό κινητικών

ενεργειών και ανασταλτικό έλεγχο, κάτι που μπορεί να υποδεικνύει ενεργή καταστολή των περισπασμών για τη διατήρηση της απόδοσης στην εργασία (Zhang et al., 2008). Η σημαντική διαφορά στην ισχύ βήτα μεταξύ των δύο ομάδων υποδηλώνει ότι οι οπτικοί περισπασμοί δεν διαταράσσουν απλώς τη γνωστική επεξεργασία. Αντίθετα, ενεργοποιούν αντισταθμιστικούς νευρικούς μηχανισμούς που ενισχύουν τους συγχρονισμένους ρυθμούς βήτα. Αυτή η προσαρμογή μπορεί να λειτουργεί ως σταθεροποιητικός μηχανισμός για την προστασία των γνωστικών διεργασιών και τη διατήρηση της συγκέντρωσης κατά την εκτέλεση των εργασιών, αναδεικνύοντας τη δυναμική ικανότητα του εγκεφάλου να βελτιστοποιεί την απόδοση ακόμα και υπό αυξημένες περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Συνολικά, η αύξηση της άλφα και βήτα δραστηριότητας υπό την παρουσία περισπασμών ενδέχεται να αντιπροσωπεύει έναν αντισταθμιστικό νευρωνικό μηχανισμό που υποστηρίζει τη γνωστική απόδοση σε απαιτητικά περιβάλλοντα.

Ο εγκέφαλος φαίνεται ότι προσαρμόζεται σε εξωτερικές διαταραχές και να διατηρεί την απόδοση της εργασίας μέσω δυναμικών αλλαγών στη δραστηριότητα των εγκεφαλικών κυμάτων. Επιβεβαιώσαμε πως αν και δεν υπήρξε βελτίωση (στατιστικά σημαντική) στις επιδόσεις, υπήρξε στατιστικά σημαντική βελτίωση στο χρόνο απόκρισης λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης και προσοχής και ενεργού αποκλεισμού των περισπασμών που υποδηλώνει η μεταβολή στην ισχύ των ζωνών συχνοτήτων.

Η έρευνα έχει άμεσες επιπτώσεις στην παιδαγωγική σχεδίαση των εφαρμογών επαυξημένης πραγματικότητας και σχετίζονται τόσο με την ένταση όσο και τη χρονική διάρκεια των ερεθισμάτων, ώστε τελικά αυτές να μην λειτουργούν διασπαστικά στην προσοχή, αλλά εποικοδομητικά με σκοπό τη μεγιστοποίηση του μαθησιακού οφέλους.

Συμπεράσματα

Τα δύο πειράματα που πραγματοποιήσαμε επιβεβαίωσαν πως είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν περιβάλλοντα επαυξημένης πραγματικότητας για την παρουσίαση διδακτικών σεναρίων, πλήρως παραμετροποιήσιμων και ελεγχόμενων από τον διδάσκοντα, χωρίς να απαιτείται η φυσική ύπαρξη των σχετικών πειραματικών διατάξεων. Μέσω της εγκεφαλογραφίας και των εργαλείων που αυτή διαθέτει είναι δυνατή η παρακολούθηση της γνωστικής επεξεργασίας ενός ερεθίσματος σε όλη τη διαδρομή, από τον ακούσιο εντοπισμό του, την επεξεργασία του μέχρι και την τελική λήψη μιας απόφασης. Τα στάδια αυτά μπορούν όχι μόνο να προσδιοριστούν χρονικά, αλλά και με τι ένταση συμβαίνουν. Διαπιστώσαμε πως

οι μαθητές παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις στον τρόπο που αντιμετωπίζουν τα ίδια ερεθίσματα, διαφορές που μπορούν να αξιοποιηθούν για τη δυναμική και σε πραγματικό χρόνο μεταβολή του μαθησιακού περιεχομένου. Η ποσότητα της πληροφορίας και η επιλογή των επιμέρους χαρακτηριστικών των μαθησιακών αντικειμένων είναι κρίσιμες παράμετροι που θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη ο σχεδιασμός των εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων, ώστε οι πληροφορίες να δίνονται με ρυθμό που μπορεί να απορροφήσει ο μαθητής και με επιλογή κατάλληλων εποπτικών μέσων που δεν θα τους αποσπά την προσοχή. Ακόμη, διαπιστώσαμε πως ο εγκέφαλος προσαρμόζεται σε εξωτερικούς περισπασμούς και μπορεί να διατηρεί την απόδοση στην εργασία μέσω δυναμικών αλλαγών στη δραστηριότητα των εγκεφαλικών κυμάτων.

Περιορισμοί της έρευνας

Σαν περιορισμό στην έρευνά μας θα αναφέρουμε το μικρό δείγμα 20 μαθητές. Ακόμη η χρήση ξηρών ηλεκτροδίων, με τη μεγάλη αντίσταση που διαθέτουν, μειώνουν την ένταση των δυναμικών που καταγράφονται.

Προκλήσεις και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο

Προτείνεται η ενσωμάτωση νευρωνικών δεδομένων στις εφαρμογές της επαυξημένης πραγματικότητας, με σκοπό αυτές να αποκτούν δυναμικό χαρακτήρα προσαρμοζόμενες στις μαθησιακές ανάγκες της στιγμής. Για παράδειγμα, όταν ανιχνεύεται χαμηλό πλάτος P300 ή αυξημένη άλφα που σχετίζονται με απόσπαση προσοχής ή κόπωση, η εφαρμογή της επαυξημένης πραγματικότητας μπορεί να εισάγει παύσεις ή να απλοποιεί το περιεχόμενο. Αντίθετα υψηλό πλάτος P300/βήτα δραστηριότητα που συνδέονται με ενεργή συμμετοχή, θα επιτρέπουν στην εφαρμογή την εισαγωγή πιο απαιτητικών καθηκόντων.

Εξατομικευμένη μάθηση

Προτείνεται επίσης η δημιουργία γνωστικών προφίλ έπειτα από μακροπρόθεσμη παρακολούθηση των προκλητών δυναμικών που θα αποκαλύψει μεταξύ άλλων το μαθησιακό στυλ (π.χ., οπτικό vs ακουστικό) και την ταχύτητα εξοικείωσης με το εκπαιδευτικό υλικό του

κάθε μαθητή. Μέσω νευροανάδρασης είναι δυνατή η εκπαίδευση μαθητών σε αυτορρύθμιση της εγκεφαλικής τους δραστηριότητας (π.χ., αύξηση βήτα για εστίαση).

Νευροπροσαρμοστικά συστήματα επαυξημένης πραγματικότητας

Τέλος, προτείνεται η δημιουργία «έξυπνων» συστημάτων που προσαρμόζουν το περιεχόμενο σε πραγματικό χρόνο. Μέσω ανάλυσης των προκλητών δυναμικών θα αποφασίζεται η επανάληψη/τροποποίηση υλικού όταν εντοπίζονται χαμηλές αντιδράσεις. Ακόμη σκόπιμες «παραβιάσεις» (π.χ., παράλογες τροχιές) είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν σαν εργαλεία για την ενίσχυση της έκπληξης (P300) και της γνωστικής αφομοίωσης.

Οι προκλήσεις είναι πολλές τόσο σε τεχνικό επίπεδο (βελτίωσης του υλικού (ελαφριά EEG) και αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης για άμεση ανάλυση δεδομένων), όσο κυρίως ηθικές, αφού η προστασία της ιδιωτικότητας των εγκεφαλικών δεδομένων δεν θα πρέπει ποτέ να θυσιάζεται στο βωμό του οποιουδήποτε «κέρδους».

Αναφορές

- Acharya, U. R., Fujita, H., Sudarshan, V. K., Bhat, S., & Koh, J. E. W. (2017). Application of entropies for automated diagnosis of epilepsy using EEG signals: A review. *Knowledge-Based Systems*, 88, 85-96. [10.1016/j.knosys.2015.07.032](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.07.032)
- Akçayır, M., & Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational research review*, 20, 1-11.
- Ales, J. M., Yates, J. L., & Norcia, A. M. (2010). V1 is not uniquely identified by polarity reversals of responses to upper and lower visual field stimuli. *Neuroimage*, 52(4), 1401-1409.
- Alexander, A. L., Brunyé, T., Sidman, J., & Weil, S. A. (2005). From gaming to training: A review of studies on fidelity, immersion, presence, and buy-in and their effects on transfer in pc-based simulations and games. *DARWARS Training Impact Group*, 5, 1-14.
- Ansari, D., De Smedt, B., & Grabner, R. H. (2012). Neuroeducation – A critical overview of an emerging field. *Neuroethics*, 5(2), 105–117. <https://doi.org/10.1007/s12152-011-9119-3>
- Arena, F., Collotta, M., Pau, G., & Termine, F. (2022). An overview of augmented reality. *Computers*, 11(2), 28. <https://doi.org/10.3390/computers11020028>
- Athif, M., Rathnayake, B. L. K., Nagahapitiya, S. D. B. S., Samarasinghe, S. A. K., Samarasinghe, P. S., Peiris, R. L., & De Silva, A. C. (2020, July). Using biosignals for objective measurement of presence in virtual reality environments. In *2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)* (pp. 3035-3039). IEEE., doi: <https://doi.org/10.1109/EMBC44109.2020.9176022>.
- Azuma, R. T. (1997). *A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments*/MIT press.
- Bahavan, T. T. N., Navaratnarajah, S., Owinda, D., Akalanka, I., Peiris, R., & Silva, A. D. (2023). Towards an objective measurement of presence, place illusion, and plausibility illusion in virtual reality using electroencephalography. *Virtual Reality*, 27(3), 2649-2664. <https://doi.org/10.1007/s10055-023-00815-x>
- Bailenson, J. N., Beall, A. C., Loomis, J., Blascovich, J., & Turk, M. (2005). Transformed social interaction, augmented gaze, and social influence in immersive virtual environments. *Human communication research*, 31(4), 511-537. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2958.2005.tb00881.x>

- Baldwin, C. L., Roberts, D. M., Barragan, D., Lee, J. D., Lerner, N., & Higgins, J. S. (2017). Detecting and quantifying mind wandering during simulated driving. *Frontiers in human neuroscience*, 11, 406. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00406>
- Baumgartner, T., Valko, L., Esslen, M., & Jäncke, L. (2008). Neural correlates of spatial presence in the brain. *European Journal of Neuroscience*, 27(8), 1907-1916.
- Bear, M. F., Connors, B. W., Paradiso, M. A. (2020). *Neuroscience:Exploring the Brain*. Wolters Kluwer. Apr;56(100):393-400. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2014.02.010.
- Begum, S., Aftab, S., & Yousuf, H. (2013). Changes in the brain wave patterns with age and cognitive function. *Brain and Cognitive Sciences*, 2(3), 125-134.
- Benedek, M., Schickel, R. J., Jauk, E., Fink, A., & Neubauer, A. C. (2014). Alpha power increases in right parietal cortex reflects focused internal attention. *Neuropsychologia*, 56, 393-400. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2014.02.010
- Berger, A., Tzur, G., & Posner, M. I. (2018). Infant brains detect arithmetic errors. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 18(6), 1200–1210. <https://doi.org/10.3758/s13415-018-0630-4>
- Billinghurst, M., Clark, A., & Lee, G. (2015). A survey of augmented reality. *Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction*, 8(2–3), 73–272.
- Billinghurst, M., Kato, H., & Poupyrev, I. (2015). *Collaborative augmented reality*. *Communications of the ACM*, 45(7), 64–70. <https://doi.org/10.1145/514236.514265>
- Botella, C., Fernández-Álvarez, J., Guillén, V., García-Palacios, A., & Baños, R. (2017). Recent progress in virtual reality exposure therapy for phobias: a systematic review. *Current psychiatry reports*, 19, 1-13.
- Braboszcz, C., & Delorme, A. (2011). Lost in thoughts: neural markers of low alertness during mind wandering. *Neuroimage*, 54(4), 3040-3047. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.10.008
- Burns, C. G., & Fairclough, S. H. (2015). Use of auditory event-related potentials to measure immersion during a computer game. *International Journal of Human-Computer Studies*, 73, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2014.09.002>.
- Bystrom K., Barfield W. and Hendrix C., "A Conceptual Model of the Sense of Presence in Virtual Environments," in *Presence*, vol. 8, no. 2, pp. 241-244, April 1999, doi: 10.1162/105474699566107.

- Carretié, L., Hinojosa, J. A., Martín-Loeches, M., Mercado, F., & Tapia, M. (2004). Automatic attention to emotional stimuli: Neural correlates. *Human Brain Mapping*, 22(4), 290–299. <https://doi.org/10.1002/hbm.20037>
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(8), 414–421.
- Chi, Y. M., Wang, Y. T., Wang, Y., Maier, C., Jung, T. P., & Cauwenberghs, G. (2010). *Dry and noncontact EEG sensors for mobile brain–computer interfaces*. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 20(2), 228–235. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2011.2174652>
- Chiang, T. H., Yang, S. J., & Hwang, G. J. (2014). An augmented reality-based mobile learning system to improve students' learning achievements and motivations in natural science inquiry activities. *Journal of Educational Technology & Society*, 17(4), 352–365.
- Chiossi, F., Ou, C., Putze, F., & Mayer, S. (2024, December). Detecting Internal and External Attention in Virtual Reality: A Comparative Analysis of EEG Classification Methods. In *Proceedings of the International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia* (pp. 381–395).
- Christofi, M., Baka, E., Stavroulia, K. E., Michael-Grigoriou, D., Lanitis, A., & Magnenat-Thalmann, N. (2018). Studying Levels of Presence in a Virtual Environment Simulating Drug Use in Schools: Effect on Different Character Perspectives. In *ICAT-EGVE* (pp. 163–170). DOI: 10.2312/egve.20181329
- Chun, M. M., Golomb, J. D., & Turk-Browne, N. B. (2011). A taxonomy of external and internal attention. *Annual review of psychology*, 62(1), 73–101. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.100427>.
- Clark, V. P., Fan, S., & Hillyard, S. A. (1995). Identification of early visual evoked potential generators by retinotopic and topographic analyses. *Human Brain Mapping*, 2(3), 170–187
- Cohen, M. X. (2014). *Analyzing Neural Time Series Data: Theory and Practice*. MIT Press.
- Cole, H.W., Ray, W.J., 1985. EEG correlates of emotional tasks related to attentional demands. *Int. J. Psychophysiol.* 3, 33–41.
- Cooper, N. R., Croft, R. J., Dominey, S. J., Burgess, A. P., & Gruzelier, J. H. (2003). Paradox lost? Exploring the role of alpha oscillations during externally vs. internally directed attention

and the implications for idling and inhibition hypotheses. *International journal of psychophysiology*, 47(1), 65-74. doi: 10.1016/S0167-8760(02)00107-1

Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature reviews neuroscience*, 3(3), 201-215.

Darken, R. P., Bernatovich, D., Lawson, J. P., & Peterson, B. (1999). Quantitative measures of presence in virtual environments: The roles of attention and spatial comprehension. *CyberPsychology & Behavior*, 2(4), 337-347.

Dey, J. Phoon, S. Saha, C. Dobbins and M. Billinghamurst, "Neurophysiological Effects of Presence in Calm Virtual Environments," 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), Atlanta, GA, USA, 2020, pp. 744-745, doi: 10.1109/VRW50115.2020.00223.

Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual review of neuroscience*, 18(1), 193-222. doi:10.1146/annurev.ne.18.030195.001205

Dikker, S., Wan, L., Davidesco, I., Kaggen, L., Oostrik, M., McClintock, J., & Poeppel, D. (2017). Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom. *Current Biology*, 27(9), 1375–1380. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.04.002>

Di Russo, F., Martinez, A., Sereno, M. I., Pitzalis, S., & Hillyard, S. A. (2002). Cortical sources of the early components of the visual evoked potential. *Human Brain Mapping*, 15(2), 95–111.

Donchin, E., & Coles, M. G. H. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences*.

Edwards, D. J., & Trujillo, L. T. (2021). An Analysis of the External Validity of EEG Spectral Power in an Uncontrolled Outdoor Environment during Default and Complex Neurocognitive States. *Brain Sciences*, 11(3), 330. <https://doi.org/10.3390/brainsci11030330>

Emile Savalle et al 2024 J. Neural Eng. 21 046015 DOI <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ad5cc2>

Engel, A. K., & Fries, P. (2010). Beta-band oscillations—signalling the status quo?. *Current opinion in neurobiology*, 20(2), 156-165.

Engel, A. K., & Fries, P. (2010). Beta-band oscillations: Stabilizing the center of attention. *NeuroImage*, 53(2), 127-132.

Felton, W. M., & Jackson, R. E. (2022). Presence: A review. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 38(1), 1-18.

Fiebelkorn, I. C., & Kastner, S. (2019). A rhythmic theory of attention. *Trends in cognitive sciences*, 23(2), 87-101.

Fink, A., & Benedek, M. (2013). The creative brain: brain correlates underlying the generation of original ideas.

Fitzgibbon, S. P., Pope, K. J., Mackenzie, L., Clark, C. R., & Willoughby, J. O. (2004). Cognitive tasks augment gamma EEG power. *Clinical neurophysiology*, 115(8), 1802-1809.

Foxe, J. J., & Snyder, A. C. (2011). The role of alpha-band brain oscillations as a sensory suppression mechanism during selective attention. *Frontiers in psychology*, 2, 154. 10.3389/fpsyg.2011.00154

Foxe, J. J., Strugstad, E. C., Sehatpour, P., Molholm, S., Pasioka, W., Schroeder, C. E., & McCourt, M. E. (2008). Parvocellular and magnocellular contributions to the initial generators of the visual evoked potential: high-density electrical mapping of the “C1” component. *Brain topography*, 21, 11-21.

Freeman, J., Avons, S. E., Pearson, D. E., & IJsselstein, W. A. (1999). Effects of sensory information and prior experience on direct subjective ratings of presence. *Presence*, 8(1), 1-13.

Freeman, D., Reeve, S., Robinson, A., Ehlers, A., Clark, D., Spanlang, B., & Slater, M. (2017). Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders. *Psychological medicine*, 47(14), 2393-2400.

Garzón, J., Pavón, J., & Baldiris, S. (2019). Systematic review and meta-analysis of augmented reality in educational settings. *Virtual reality*, 23(4), 447-459.

Gebhardt, C., Hecox, B., Van Opheusden, B., Wigdor, D., Hillis, J., Hilliges, O., & Benko, H. (2019, October). Learning cooperative personalized policies from gaze data. In *Proceedings of the 32nd annual ACM symposium on user interface software and technology* (pp. 197-208).

Geva, G., Getter, N., Blecher, B., Ben-Ari, O., Gordon, B., Nakdimon, I., & Shriki, O. (2025). Reduction in EEG theta power as a potential marker for spatial disorientation during flight. *Scientific Reports*, 15(1), 1682.

Goswami, U. (2004). Neuroscience and education. *British Journal of Educational Psychology*, 74(1), 1–14. <https://doi.org/10.1348/000709904322848798>

Gramann, K., Gwin, J. T., Bigdely-Shamlo, N., Ferris, D. P., & Makeig, S. (2010). Visual evoked responses during standing and walking. *Frontiers in human neuroscience*, 4, 202. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00202>

Grassini, S., Laumann, K., Thorp, S., & Topranin, V. D. M. (2021). Using electrophysiological measures to evaluate the sense of presence in immersive virtual environments: An event-related potential study. *Brain and behavior*, 11(8), e2269.

Grassini, S., & Laumann, K. (2020). Questionnaire measures and physiological correlates of presence: A systematic review. *Frontiers in psychology*, 11, 349.doi: 10.3389/fpsyg.2020.00349

Grubert, J., Langlotz, T., Zollmann, S., & Regenbrecht, H. (2016). Towards pervasive augmented reality: Context-awareness in augmented reality. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 23(6), 1706-1724.

Gupta, R. S., Kujawa, A., & Vago, D. R. (2019). The neural chronometry of threat-related attentional bias: Event-related potential (ERP) evidence for early and late stages of selective attentional processing. *International Journal of Psychophysiology*, 146, 20-42.

Hagedorn, L. J., De Rooij, A., & Alimardani, M. (2023, April). Virtual Reality and Creativity: How Do Immersive Environments Stimulate the Brain during Creative Idea Generation?. In *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-7).

He, W., et al. (2020). Artifact removal in EEG signals using band-pass and adaptive filters. *Biomedical Signal Processing and Control*.

Hein, D., Mai, C., & Hußmann, H. (2018, May). The usage of presence measurements in research: a review. In *Proceedings of the International Society for Presence Research Annual Conference (Presence)* (pp. 21-22). Prague: The International Society for Presence Research.

Herwig, U., Satrapi, P., & Schönfeldt-Lecuona, C. (2003). Using the international 10-20 EEG system for positioning of transcranial magnetic stimulation. *Brain topography*, 16, 95-99.

Herrmann, C. S., Fründ, I., & Lenz, D. (2014). Neurofeedback of gamma-band activity. *Biological Psychology*, 98, 3-12.

Hidi, S. E. (1995). A reexamination of the role of attention in learning from text. *Educational Psychology Review*, 7, 323-350.

Hilken, T., De Ruyter, K., Chylinski, M., Mahr, D., & Keeling, D. I. (2017). Augmenting the eye of the beholder: exploring the strategic potential of augmented reality to enhance online service experiences. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 45, 884-905

Hillyard, S. A., & Anllo-Vento, L. (1998). Event-related brain potentials in the study of visual selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(3), 781–787.

Höfel, L., Jacobsen, T., & Ansorge, U. (2007). Electrophysiological correlates of processing aesthetics: An event-related brain potential study. *NeuroReport*, 18(6), 567–571.

Holmes, G. (1945). The organization of the visual cortex in man. *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, 38(11), 769–774.

Ibáñez, M. B., Di Serio, Á., Villarán, D., & Kloos, C. D. (2014). Experimenting with electromagnetism using augmented reality: Impact on flow student experience and educational effectiveness. *Computers & education*, 71, 1-13.

International Society for Presence Research. (2000). An explication of presence . Retrieved July 15,2014, from <http://ispr.info>

Islam MK, Rastegarnia A, Yang Z. Methods for artifact detection and removal from scalp EEG: A review. *Neurophysiol Clin*. 2016 Nov;46(4-5):287-305. doi: 10.1016/j.neucli.2016.07.002.

Jasper, H. H. (1958). The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10(2), 371-375.

Jeffreys, D. A., & Axford, J. G. (1972). Source locations of pattern-specific components of human visual evoked potentials. *I. Component of striate cortical origin. Experimental Brain Research*, 16(1), 1–21.

Jensen, O., Gelfand, J., Kounious, K., Lisman, J.E., 2002. Oscillations in the alpha band (9–12 Hz) increase with memory load during retention in a short-term memory task. *Cereb. Cortex* 12,877–882.

Jensen, O., & Mazaheri, A. (2010). Shaping functional architecture by oscillatory alpha activity: Gating by inhibition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4, 186.

Jensen, O., Bonnefond, M., & VanRullen, R. (2012). An oscillatory mechanism for prioritizing salient unattended stimuli. *Trends in cognitive sciences*, 16(4), 200-206.

Janssen, T. W., Grammer, J. K., Bleichner, M. G., Bulgarelli, C., Davidesco, I., Dikker, S., & van Atteveldt, N. (2021). Opportunities and limitations of mobile neuroimaging technologies in educational neuroscience. *Mind, Brain, and Education*, 15(4), 354-370.

Ji, J., Porjesz, B., Begleiter, H., & Chorlian, D. (1999). P300: the similarities and differences in the scalp distribution of visual and auditory modality. *Brain topography*, 11, 315-327.

Jiang, X., Bian, G. B., & Tian, Z. (2019). Removal of artifacts from EEG signals: a review. *Sensors*, 19(5), 987. doi: 10.3390/s19050987.

Jin, C. Y., Borst, J. P., & Van Vugt, M. K. (2019). Predicting task-general mind-wandering with EEG. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 19, 1059-1073. <https://doi.org/10.3758/s13415-019-00707-1>

Johnson Jr, R. (1986). A triarchic model of P300 amplitude. *Psychophysiology*, 23(4), 367–384. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1986.tb00649.x>

Kaldas, A. (2022). Attention: a descriptive taxonomy. *History and Philosophy of the Life Sciences*, 44(4), 63.

Kandel E.R., & Schwartz J.H., & Jessell T.M., & Siegelbaum S.A., & Hudspeth A.J., & Mack S (2014), *Principles of Neural Science, Fifth Edition*. McGraw-Hill Education. <https://neurology.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1049§ionid=59138139>

Kashiwase, Y., Matsumiya, K., Kuriki, I., & Shioiri, S. (2013). Temporal dynamics of visual attention measured with event-related potentials. *PloS one*, 8(8), e70922.

Katayama, J. I., & Polich, J. (1999). Auditory and visual P300 topography from a 3 stimulus paradigm. *Clinical Neurophysiology*, 110(3), 463-468.

Kelly, S. P., Gomez-Ramirez, M., & Foxe, J. J. (2008). Spatial attention modulates initial afferent activity in human primary visual cortex. *Cerebral Cortex*, 18(11), 2633–2640.

Kim, S. P. (2018). Preprocessing of EEG. *Computational EEG Analysis: Methods and Applications*, 15-33. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0908-3_2

Kiyokawa, K., Billingham, M., Hayes, S. E., Gupta, A., Sannohe, Y., & Kato, H. (2002, October). Communication behaviors of co-located users in collaborative AR interfaces. In *Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (pp. 139-148). IEEE. Maselli, A., & Slater, M. (2013). *The building blocks of the full body ownership illusion*. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 83.

Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis. *Brain research reviews*, 29(2-3), 169-195, doi:10.1016/s0165-0173(98)00056-3.

Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in cognitive sciences*, 16(12), 606-617. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.10.007>.

Kober, S. E., & Neuper, C. (2011). Personality and presence in virtual reality: Does extraversion matter? *International Journal of Human-Computer Interaction*, 27(9), 434-444.

Kober, S. E., & Neuper, C. (2012). Using auditory event-related EEG potentials to assess presence in virtual reality. *International Journal of Human-Computer Studies*, 70(9), 577-587. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2012.03.004>.

Kober, S. E., Kurzmann, J., & Neuper, C. (2012). Cortical correlate of spatial presence in 2D and 3D interactive virtual reality: an EEG study. *International Journal of Psychophysiology*, 83(3), 365-374.

Kober, S. E., et al. (2019). EEG alpha and gamma oscillations in immersive VR tasks: A systematic review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 213.

Kong, L., Zhang, J. X., Kang, C., Du, Y., Zhang, B., & Wang, S. (2010). P200 and phonological processing in Chinese word recognition. *Neuroscience Letters*, 473(1), 37-41.

Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, 38(3), 557-577. <https://doi.org/10.1017/S0048577201991742>

Kosmyna, N., & Maes, P. (2022, March). Assessing internal, external and covert visuospatial attention in AR using brain sensing: a pilot study. In *Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) III* (Vol. 11931, pp. 33-45). SPIE.

Kotte, S., & Dabbakuti, J. K. (2020, December). Methods for removal of artifacts from EEG signal: A review. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1706, No. 1, p. 012093). IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1706/1/012093.

Kuba, M., Kubová, Z., Kremláček, J., & Langrová, J. (2007). Motion-onset VEPs: characteristics, methods, and diagnostic use. *Vision research*, 47(2), 189-202.

Kourtzi, Z., & Shiffrar, M. (2001). Dynamic representations of human body movement. *Perception*, 30(7), 743-762.

Kumar, M., Delaney, C., Soroush, P. Z., Yamani, Y., & Krusienski, D. J. (2021, October). Characterization of affective states in virtual reality environments using EEG. In *2021 IEEE international conference on systems, man, and cybernetics (smc)* (pp. 2689-2693). IEEE.

Lai, A. F., Chen, C. H., & Lee, G. Y. (2019). An augmented reality-based learning approach to enhancing students' science reading performances from the perspective of the cognitive load theory. *British Journal of Educational Technology*, 50(1), 232-247.

Lampathaki, N., Evangelou, M., Papageorgiou, M., Tsiavou, A. S., & Chomko, G. (2022). The Use of Virtual Reality in the Science of Psychology. *Homo Virtualis*, 5(1), 166-187. <https://doi.org/10.12681/homvir.30340>

Lécuyer, A., Lotte, F., Reilly, R. B., Leeb, R., Hirose, M., & Slater, M. (2008). Brain-computer interfaces, virtual reality, and videogames. *Computer*, 41(10), 66-72. doi: 10.1109/MC.2008.410.

Lee, K. (2012). Augmented reality in education and training. *TechTrends*, 56, 13-21.

Lenartowicz, A., Lu, S., Rodriguez, C., Lau, E., & Walshaw, P. D. (2018). Alpha desynchronization and fronto-parietal connectivity during spatial working memory encoding in ADHD. *Biological Psychiatry*, 83(9), S132–S133. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2018.02.349>

Lombard, M., & Ditton, T.B. (1997). At the heart of it all: The concept of presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2).

Lombard, M., & Jones, M. T. (2015). Defining presence. *Immersed in media: Telepresence theory, measurement & technology*, 13-34.

Lopes da Silva, F. (2010). EEG: Origin and measurement. Oxford University Press.

Lu, S. J., & Liu, Y. C. (2014). Integrating augmented reality technology to enhance children's learning in marine education. *Environmental Education Research*, 21(4), 525–541. <https://doi.org/10.1080/13504622.2014.911247>

Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1994). Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology*, 31(3), 291–308.

Luck, S. J., Woodman, G. F., & Vogel, E. K. (2000). Event-related potential studies of attention. *Trends in cognitive sciences*, 4(11), 432-440.

Macdonald, J. S., Mathan, S., & Yeung, N. (2011). Trial-by-trial variations in subjective attentional state are reflected in ongoing prestimulus EEG alpha oscillations. *Frontiers in psychology*, 2, 82. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00082>

- Magosso, E., De Crescenzo, F., Ricci, G., Piastra, S., & Ursino, M. (2019). EEG alpha power is modulated by attentional changes during cognitive tasks and virtual reality immersion. *Computational intelligence and neuroscience*, 2019(1), 7051079. doi: 10.1155/2019/7051079.
- Mann, C. A., Serman, M. B., & Kaiser, D. A. (1996). Suppression of EEG rhythmic frequencies during somato-motor and visuo-motor behavior. *International Journal of Psychophysiology*, 23(1-2), 1-7.
- Martin, S. J., Grimwood, P. D., & Morris, R. G. (2000). Synaptic plasticity and memory: an evaluation of the hypothesis. *Annual review of neuroscience*, 23, 649–711. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.23.1.649>
- Martinez, A., Anllo-Vento, L., Sereno, M. I., Frank, L. R., Buxton, R. B., Dubowitz, D. J., ... & Hillyard, S. A. (1999). Involvement of striate and extrastriate visual cortical areas in spatial attention. *Nature Neuroscience*, 2(4), 364–369.
- Marucci, M., Di Flumeri, G., Borghini, G., Sciaraffa, N., Scandola, M., Pavone, E. F., ... & Aricò, P. (2021). The impact of multisensory integration and perceptual load in virtual reality settings on performance, workload and presence. *Scientific Reports*, 11(1), 4831. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84196-8>
- Mathewson, K. E., Harrison, T. J., & Kizuk, S. A. (2017). High and dry? Comparing active dry EEG electrodes to active and passive wet electrodes. *Psychophysiology*, 54(1), 74-82.
- Maurer, U., Brem, S., Bucher, K., & Brandeis, D. (2009). Emerging neurophysiological specialization for letter strings. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(10), 1532–1552. <https://doi.org/10.1162/089892905774597219>
- McIntosh, R. D., Mulroue, A., & Dijkerman, H. C. (2008). Grasping the impossible: 3-D shape influences perception but not action. *PLoS ONE*, 3(4), e1900.
- McIntosh, A. R., Kovacevic, N., & Itier, R. J. (2008). Increased brain signal variability accompanies lower behavioral variability in development. *PLoS Computational Biology*, 4(7), e1000106.
- Meehan, M., Insko, B., Whitton, M., & Brooks Jr, F. P. (2002). Physiological measures of presence in stressful virtual environments. *Acm transactions on graphics (tog)*, 21(3), 645-652.
- Mikropoulos, T. A., & Natsis, A. (2011). Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999–2009). *Computers & education*, 56(3), 769-780. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2010.10.020>

- Muehling, M. C., Kauffmann, L. B., & Sander, D. (2020). Cognitive workload and EEG power: Changes in alpha, theta, and delta during task performance. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 32(2), 265-276.
- Näätänen, R., & Picton, T. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*, 24(4), 375–425.
- Nash, E. B., Edwards, G. W., Thompson, J. A., & Barfield, W. (2000). A review of presence and performance in virtual environments. *International Journal of human-computer Interaction*, 12(1), 1-41.
- Nichols, S. (1999). Physical ergonomics of virtual environment use. *Applied Ergonomics*, 30(1), 79-90.
- Niedermeyer, E., & da Silva, F. L. (2005). *Electroencephalography, basic principles, clinical applications and related fields*.
- Nunez, P. L., & Srinivasan, R. (2006). *Electric fields of the brain: the neurophysics of EEG*. Oxford University Press, USA.
- O'Donnell, B. F., Swearer, J. M., Smith, L. T., Hokama, H., & McCarley, R. W. (1997). A topographic study of ERPs elicited by visual feature discrimination. *Brain Topography*, 10, 133-143.
- Oostenveld, R., & Praamstra, P. (2001). The five percent electrode system for high-resolution EEG and ERP measurements. *Clinical Neurophysiology*, 112(4), 713-719.
- Oostenveld, R., et al. (2011). FieldTrip: Open-source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. *Computational Intelligence and Neuroscience*.
- Palva, S., & Palva, J. M. (2007). New vistas for α -frequency band oscillations. *Trends in neurosciences*, 30(4), 150-158.
- Pappalettera, C., Miraglia, F., Cacciotti, A., Nucci, L., Tufo, G., Rossini, P. M., & Vecchio, F. (2024). The impact of virtual reality and distractors on attentional processes: insights from EEG. *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology*, 476(11), 1727-1742. <https://doi.org/10.1007/s00424-024-03008-w>
- Pashler, H., Johnston, J. C., & Ruthruff, E. (2001). Attention and performance. *Annual review of psychology*, 52(1), 629-651.

- Pfurtscheller, G., & Aranibar, A. (1977). Event-related cortical desynchronization detected by power measurements of scalp EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*.
- Pfurtscheller, G., & Lopes da Silva, F. H. (1999). Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization. *Clinical Neurophysiology*.
- Picton, T. W. (1992). The P300 wave of the human event-related potential. *Journal of clinical neurophysiology*, 9, 456-456. <https://doi.org/10.1097/00004691-199210000-00002>
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128–2148.
- Pourtois, G., Rauss, K. S., Vuilleumier, P., & Schwartz, S. (2008). Effects of perceptual learning on primary visual cortex activity in humans. *Vision Research*, 48(1), 55–62.
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., et al. (2018). *Neuroscience*. Sinauer Associates.
- Putze, F., Scherer, M., & Schultz, T. (2016, October). Starring into the void? Classifying Internal vs. External Attention from EEG. In *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 1-4).
- Raichle, M. E. (2015). The brain's default mode network. *Annual review of neuroscience*, 38(1), 433-447. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-071013-014030>
- Rauschnabel, P. A., Felix, R., Hinsch, C., Shahab, H., & Alt, F. (2022). *What is XR? Towards a framework for augmented and virtual reality*. *Computers in Human Behavior*, 133, 107289. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107289>
- Ray, W. J., & Cole, H. W. (1985). EEG alpha and beta rhythms in anxiety. *International Journal of Psychophysiology*, 3(4), 307–315.
- de Rijk, A. E., Schreurs, K. M., & Bensing, J. M. (1999). Complaints of fatigue: related to too much as well as too little external stimulation?. *Journal of Behavioral Medicine*, 22, 549-573.
- Riva, G., Waterworth, J. A., & Waterworth, E. L. (2004). The layers of presence: a bio-cultural approach to understanding presence in natural and mediated environments. *CyberPsychology & Behavior*, 7(4), 402-416.
- Rushby, J. A., Barry, R. J., Clarke, A. R., Johnstone, S. J., & Magee, C. A. (2007). EEG differences between eyes-closed and eyes-open resting conditions. [doi:10.1016/j.clinph.2007.07.028](https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.07.028)

Tauscher, J. P., Schottky, F. W., Grogork, S., Bittner, P. M., Mustafa, M., & Magnor, M. (2019, March). Immersive EEG: evaluating electroencephalography in virtual reality. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (pp. 1794-1800). IEEE. doi: 10.1109/VR.2019.8797858

Safikhani, S., Gattringer, V., Schmied, M., Pirker, J., & Wriessnegger, S. C. (2024). The Influence of Realism on the Sense of Presence in Virtual Reality: Neurophysiological Insights Using EEG. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(11), 104. doi.org/10.3390/mti8110104

Saha, S., Dobbins, C., Gupta, A., & Dey, A. (2024). Machine learning based classification of presence utilizing psychophysiological signals in immersive virtual environments. *Scientific Reports*, 14(1), 21667. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72376-1>

Sanchez-Vives, Maria & Slater, Mel. (2005). From presence to consciousness through virtual reality. *Nature reviews. Neuroscience*. 6. 332-9. 10.1038/nrn1651.

Sánchez, J. G. S., & Vázquez, D. J. (2023). The advantages of using augmented reality as a pedagogical teaching resource. *Revista Innova Educación*, 5(2), 7-28.

Sangal, R. B., & Sangal, J. M. (1996). Topography of auditory and visual P300 in normal adults. *Clinical Electroencephalography*, 27(3), 145-150.

Schubert, T., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. (2001). The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10(3), 266-281.

Sheridan, T. B. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, 1(1), 120-125.

Shinn-Cunningham, B., Durlach, N., & Held, R. (1992). Adaptation to transformed auditory localization cues in a hybrid real/virtual environment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(4_Supplement), 2368-2369.

Shin H, Kim K. Virtual reality for cognitive rehabilitation after brain injury: a systematic review. *J Phys Ther Sci*. 2015 Sep;27(9):2999-3002. doi: 10.1589/jpts.27.2999.

Skarbez, R., Brooks, Jr, F. P., & Whitton, M. C. (2017). A survey of presence and related concepts. *ACM computing surveys (CSUR)*, 50(6), 1-39.

Slater, M., & Usoh, M. (1993, September). Presence in immersive virtual environments. In *Proceedings of IEEE virtual reality annual international symposium* (pp. 90-96). IEEE.

Slater, M., Usoh, M., & Steed, A. (1994). Depth of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 3(2), 130-144.

Slater, M. (1999). Measuring presence: A response to the Witmer and Singer presence questionnaire. *Presence: teleoperators and virtual environments*, 8(5), 560-565.

Slater, M. (2003). A note on presence terminology. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(5), 483-493.

Slater, M. (2003). A note on presence terminology. *Presence connect*, 3(3), 1-5.

Slater, M., Brogni, A., & Steed, A. (2003, October). Physiological responses to breaks in presence: A pilot study. In *Presence 2003: The 6th annual international workshop on presence* (Vol. 157). Cleveland, OH: Citeseer.

Slater, M., Lotto, B., Arnold, M. M., & Sanchez-Vives, M. V. (2009). How we experience immersive virtual environments: the concept of presence and its measurement. *Anuario de psicología*, 40(2), 193-210.

Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1535), 3549-3557.

Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(6), 603-616.

Slotnick, S. D. (2020). The experimental parameters that affect attentional modulation of the ERP C1 component. *The Cognitive Neuroscience of Attention*, 41-50.

Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2015). The science of mind wandering: Empirically navigating the stream of consciousness. *Annual review of psychology*, 66(1), 487-518.

Sorout, J., Kacker, S., Saboo, N., Soni, H., Buttar, K. K., & Reddy, S. (2022). P₃₀₀ Wave Latency and Amplitude in Healthy Young Adults: A Normative Data. *Neurology India*, 70(2), 660-663. <https://doi.org/10.4103/0028-3886.344641>

Souza, R. H. C. E., & Naves, E. L. M. (2021). Attention detection in virtual environments using EEG signals: a scoping review. *frontiers in physiology*, 12, 727840.

Stanney, K. M., Mourant, R. R., & Kennedy, R. S. (1998). Human factors issues in virtual environments: A review of the literature. *Presence*, 7(4), 327-351.

Steptoe, W., Steed, A., & Slater, M. (2013). Human tails: ownership and control of extended humanoid avatars. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 19(4), 583-590.

Steriade, M., et al. (1993). Thalamocortical oscillations in the sleeping and aroused brain. *Science*, 262(5134), 679-685.

Strauss, D. J., Francis, A. L., Vibell, J., & Corona-Strauss, F. I. (2024). The role of attention in immersion: The two-competitor model. *Brain Research Bulletin*, 210, 110923.

Syiem, B.V., Kelly, R.M., Goncalves, J., Velloso, E., Dingler, T., 2021. Impact of task on attentional tunneling in handheld augmented reality. In: Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, <http://dx.doi.org/10.1145/3411764.3445580>.

Syiem, B.V., Kelly, R.M., Velloso, E., Goncalves, J., Dingler, T., 2020. Enhancing visitor experience or hindering docent roles: Attentional issues in augmented reality supported installations. In: 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. ISMAR, pp. 279-288. <http://dx.doi.org/10.1109/ISMAR50242.2020.00053>.

Tan, E., Troller-Renfree, S. V., Morales, S., Buzzell, G. A., McSweeney, M., Antúnez, M., & Fox, N. A. (2024). Theta activity and cognitive functioning: Integrating evidence from resting-state and task-related developmental electroencephalography (EEG) research. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 67, 101404.

Terkildsen, T., & Makransky, G. (2019). Measuring presence in video games: An investigation of the potential use of physiological measures as indicators of presence. *International journal of human-computer studies*, 126, 64-80., <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2019.02.006>.

Tauscher, J. P., Schottky, F. W., Grogorick, S., Bittner, P. M., Mustafa, M., & Magnor, M. (2019, March). Immersive EEG: evaluating electroencephalography in virtual reality. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (pp. 1794-1800). IEEE.

Van Baren, J., & IJsselstein, W. (2004). Compendium of presence measures. Available online at: <http://www.presence-research.org/Overview.html>

Vite, Y. J., & Hu, Y. (2023, March). The role of attention and cognitive workload in measuring levels of task complexity within virtual environments. In *2023 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)* (pp. 651-652). IEEE.

Vortmann, L. M., Kroll, F., & Putze, F. (2019). EEG-based classification of internally-and externally-directed attention in an augmented reality paradigm. *Frontiers in human neuroscience*, 13, 348 .doi: 10.3389/fnhum.2019.00348

Wang, J. W., Zhang, D. W., & Johnstone, S. J. (2025). Portable EEG for assessing attention in educational settings: A scoping review. *Acta Psychologica*, 255, 104933. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2025.104933>.

Wimmer, M., Pepicelli, A., Volmer, B., ElSayed, N., Cunningham, A., Thomas, B. H., ... & Veas, E. E. (2025). Counting on AR: EEG responses to incongruent information with real-world context. *Computers in Biology and Medicine*, 185, 109483. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2024.109483>.

Wirth, W., Hartmann, T., Böcking, S., Vorderer, P., Klimmt, C., Schramm, H., ... & Jäncke, P. (2007). A process model of the formation of spatial presence experiences. *Media psychology*, 9(3), 493-525. 10.1080/15213260701283079.

Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225–240.

Wöstmann, N. M., Herrmann, B., Maess, B., & Obleser, J. (2019). Spatiotemporal dynamics of auditory attention synchronize with speech. *Journal of Neuroscience*, 39(16), 3131–3142. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2226-18.2019>

Zhang, Z. (2019). EEG Signal Processing and Feature Extraction. EEG Signal Processing and Feature Extraction.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.