



Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων
Σχολή Επιστημών Αγωγής
Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης
Π.Μ.Σ.: «Διδακτική και τεχνολογίες μάθησης των
Φυσικών Επιστημών»

Μεταπτυχιακή Εργασία

«Γνωστικός φόρτος σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα εικονικής
και επαυξημένης πραγματικότητας: μία εγκεφαλογραφική
μελέτη »

Μπλέτσας Δημήτριος-Ευστάθιος

Επιβλέπων :Καθηγητής Αναστάσιος Μικρόπουλος

Ιωάννινα, 2025

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του Μπλέτσα Δημήτριου-Ευστάθιου («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο/η 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/Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Στοιχεία Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Αναστάσιος Μικρόπουλος

Καθηγητής, Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης, Σχολή Επιστημών Αγωγής,
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Κωνσταντίνος Θ. Κώτσης

Καθηγητής, Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης, Σχολή Επιστημών Αγωγής,
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Κωνσταντίνος Τσάμης

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ιατρικής, Σχολή Επιστημών Υγείας,
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στην οικογένεια μου,

Και στους υπόλοιπους

“Caelum non animum mutant qui trans mare currunt.”

(«Αλλάζουν ουρανό, όχι όμως ψυχή, αυτοί που τρέχουν πέρα από τη θάλασσα»).

Οράτιος

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στους χώρους του Εργαστηρίου Εφαρμογών Εικονικής Πραγματικότητας στην Εκπαίδευση (EarthLab) του Παιδαγωγικού Τμήματος Δημοτικής Εκπαίδευσης του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Ο γραφών θα ήθελε να ευχαριστήσει θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή Αναστάσιο Μικρόπουλο, που με την καθοδήγηση, τις συμβουλές αλλά και την υπομονή του, συνέβαλε την ομαλή έκβαση αυτής της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διευθυντή του ΠΜΣ Διδακτική και Τεχνολογίες Μάθησης των Φυσικών Επιστημών και μέλος της τριμελούς επιτροπής Καθηγητή Κωνσταντίνο Κώτση καθώς και τον Επίκουρο Καθηγητή Κωνσταντίνο Τσάμη, Νευρολόγο και τρίτο μέλος της επιτροπής.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία χωρίς την αμέριστη συμβολή και βοήθεια του Δρ Μιχάλη Δελημήτρου, φίλου και μέλους ΕΔΙΠ του EarthLab.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση μεταξύ συστήματος επαυξημένης πραγματικότητας AR και εικονικής πραγματικότητας VR όσον αφορά το γνωστικό φόρτο μέσω της ανάλυσης εγκεφαλογραφημάτων. Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στους χώρους και με τον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Εφαρμογών Εικονικής Πραγματικότητας στην Εκπαίδευση (EarthLab) του Παιδαγωγικού Τμήματος Δημοτικής Εκπαίδευσης του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Εφαρμόστηκαν σε ένα δείγμα 25 φοιτητών του ΠΤΔΕ Ιωαννίνων δυο εκδοχές ενός οπτικού ερεθίσματος (μια σε σύστημα εικονικής πραγματικότητας VR και μια σε σύστημα επαυξημένης πραγματικότητας AR). Το οπτικό ερέθισμα αποτελείται από τρισδιάστατη εφαρμογή μεταβαλλόμενης πολυπλοκότητας που αναπτύχθηκε ειδικά για τους σκοπούς της μελέτης. Στους συμμετέχοντες εφαρμόστηκε φορητή συσκευή απαγωγής ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων και εξήχθησαν εγκεφαλογραφήματα, τόσο κατά τη διάρκεια της χρήσης του συστήματος VR, όσο και του AR. Μετά το πείραμα ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να συμπληρώσουν το καθιερωμένο ερωτηματολόγιο για θέματα γνωστικού φορτίου Nasa-tlx. Τα αποτελέσματα τόσο των εγκεφαλογραφημάτων όσο και των ερωτηματολογίων αναλύθηκαν με τις κατάλληλες στατιστικές μεθόδους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στα περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας υπάρχει μια τάση αύξησης του γνωστικού φόρτου, σε σχέση με τα περιβάλλοντα επαυξημένης πραγματικότητας.

Λέξεις-κλειδιά: Επαυξημένη πραγματικότητα (AR), Εικονική πραγματικότητα (VR), Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG), Γνωστικός φόρτος, Εκπαιδευτική νευροεπιστήμη, NASA-TLX

Abstract

This dissertation aims to compare augmented reality (AR) and virtual reality (VR) systems with respect to cognitive load, as assessed through electroencephalography (EEG) analysis. The study was conducted at the Laboratory of Virtual Reality Applications in Education (EarthLab) of the Department of Primary Education at the University of Ioannina, utilizing its facilities and equipment. A sample of 25 undergraduate students from the Department of Primary Education participated in the experiment, where they were exposed to two versions of the same visual stimulus—one presented in a VR system and the other in an AR system. The visual stimulus consisted of a three-dimensional application of varying complexity, developed specifically for the purposes of the experiment by the Earth Lab research team. During the sessions, participants wore a portable EEG recording device, and brain activity was captured both in the VR and AR conditions. Following the experimental sessions, participants completed the standardized NASA-TLX questionnaire to assess subjective cognitive workload. The results from both the EEG recordings and the questionnaires were analyzed using appropriate statistical methods. The results indicate a higher cognitive load on the Artificial Intelligence environment than in the Augmented Reality environment.

Keywords: Augmented reality (AR), Virtual reality (VR), Electroencephalography (EEG), Cognitive load, educational neuroscience, NASA-TLX

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	5
Περίληψη.....	6
Abstract	7
Κατάλογος Σχημάτων	10
Κατάλογος Πινάκων.....	11
Κεφάλαιο 1ο Θεωρητική Προσέγγιση.....	12
1.1. Οι τεχνολογίες εμβύθισης	12
1.2. Το Ανθρώπινο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα και ο Εγκέφαλος.	13
1.2.1 Το Ανθρώπινο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα.	13
1.2.2 Τα νευρικά κύτταρα.	14
1.2.3 Συλλογή και επεξεργασία των ηλεκτρικών σημάτων των νευρικών κυττάρων.	16
1.2.4 Οι εγκεφαλικοί ρυθμοί.....	17
1.3 Ο Γνωστικός φόρτος	20
1.3.1 Η θεωρία του γνωστικού φόρτου.....	20
1.3.2 Η Θεωρία της Γνωστικής Πολυμεσικής Μάθησης.	21
1.4 Γνωστικός φόρτος σε περιβάλλοντα εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας με χρήση ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων: μια βιβλιογραφική ανασκόπηση.	23
Κεφάλαιο 2ο Μεθοδολογία.....	27
2.1 Σκοπός της έρευνας και ερευνητικά ερωτήματα.....	27
2.2 Δείγμα- διαδικασία συλλογής δεδομένων έρευνας.....	27
2.3 Ερευνητικά εργαλεία.....	28
2.3.1 Συσκευή επαυξημένης πραγματικότητας (AR) MagicLeap	28
2.3.2 Συσκευή εικονικής πραγματικότητας (VR) Oculus	29
2.3.3 Ο ασύρματος Εγκεφαλογράφος G.Tec g.Nautilus.	30
2.3.4 Ο εγκεφαλογράφος της εταιρίας Emotiv.	32
2.3.5 Ο αντιλαμβανόμενος γνωστικός φόρτος: το ερωτηματολόγιο NASA TLX	34
2.3.6 Το ψηφιακό περιβάλλον της μελέτης.	36
2.3.7 Η βιβλιοθήκη MNE-Python για την επεξεργασία των εγκεφαλογραφημάτων.	40
2.3.7.1 Μετατροπή των αρχείων καταγραφής από του g.Nautilus.	40
2.3.7.2 Η επεξεργασία των εγκεφαλογραφημάτων	41
2.3.7.2 Η φασματική ανάλυση των εγκεφαλογραφημάτων.....	44

Κεφάλαιο 3ο Αποτελέσματα.....	45
3.1 Επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων	45
Κεφάλαιο 4ο Συμπεράσματα- Συζήτηση.....	51
4.1 Συμπεράσματα.....	51
4.2 Μελλοντική έρευνα	53
Βιβλιογραφική λίστα αναφορών	54
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	58
Α. Κώδικας Python για την επεξεργασία EEG	58
Α1. Μετατροπή αρχείων .mat σε .fif mat2fif.py	58
Α2. Κώδικας Python για φιλτράρισμα filter_eeg.py	61
Α3. Κώδικας Python για average refering ref_eeg.py	63
Α4. Κώδικας psd.py υπολογισμού psd και εξόδου csv αποτελεσμάτων.....	64

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1	Ο ανθρώπινος εγκέφαλος	14
Σχήμα 2	Η δομή ενός τυπικού νευρώνα	15
Σχήμα 3	Το σύστημα τοποθέτησης ηλεκτροδίων 10-20.....	17
Σχήμα 4	Οι τέσσερις βασικοί εγκεφαλικοί ρυθμοί (ζώνες συχνοτήτων).....	19
Σχήμα 5	Σκαρίφημα του δωματίου καταγραφής.....	28
Σχήμα 6	Η συσκευή επαυξημένης πραγματικότητας Magic Leap 2	29
Σχήμα 7	Η συσκευή VR Oculus Rift S.....	30
Σχήμα 8	Η συσκευή απαγωγής εγκεφαλογραφημάτων g.Nautilus research	31
Σχήμα 9	Η συσκευή απαγωγής εγκεφαλογραφημάτων emotiv Flex	32
Σχήμα 10	Η συσκευή απαγωγής εγκεφαλογραφημάτων emotiv Eroc	33
Σχήμα 12	Στιγμιότυπο της “ενσωμάτωσης” του ερωτηματολογίου σε διαδικτυακή μορφή	36
Σχήμα 13	Στιγμιότυπο της φάσης REST-BASELINE του πειράματος.....	38
Σχήμα 14	Στιγμιότυπο της φάσης S1 του πειράματος	38
Σχήμα 15	Στιγμιότυπο της φάσης S2 του πειράματος	39
Σχήμα 16	Στιγμιότυπο της φάσης S3 του πειράματος	39
Σχήμα 17	Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα τυχαίου δείγματος χωρίς κάποια επεξεργασία (raw)	41
Σχήμα 18	Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα τυχαίου δείγματος μετά την εφαρμογή φίλτρων.	42
Σχήμα 19	Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα τυχαίου δείγματος μετά την αφαίρεση μέσου όρου σήματος	43

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Βασικές αρχές της CTML	22
Πίνακας 2 Πίνακας πρωτότυπης έκδοσης και ελληνικής μετάφρασης του NASA-TLX.....	35
Πίνακας 3 Περιγραφή της διαδικασίας του οπτικού ερεθίσματος (stimuli) του πειράματος.	37
Πίνακας 4 Σχετική Ισχύς Ζωνών ανά Ηλεκτρόδιο για τυχαίο συμμετέχοντα	45
Πίνακας 5 Αποτελέσματα του τεστ σύγκρισης μέσω Wilcoxon για VR vs AR.....	48
Πίνακας 6 Πίνακας Αποτελεσμάτων Nasa-TLX για όλους τους συμμετέχοντες.....	49
Πίνακας 7 Μέσοι όροι Nasa-tlx για AR Και VR για όλους τους συμμετέχοντες	49
Πίνακας 8 Ο έλεγχος κανονικότητας των κατανομών για τα ερωτηματολόγια Nasa-TLX	50
Πίνακας 9 Αποτελέσματα ερωτηματολογίου NASA-TLX (AR vs VR)	50

Κεφάλαιο 1ο Θεωρητική Προσέγγιση

1.1. Οι τεχνολογίες εμπύθισης

Η Επαυξημένη Πραγματικότητα.

Η Επαυξημένη Πραγματικότητα (ΕΠ, Augmented Reality, AR). ορίζεται ως η “μίξη” ψηφιακών αντικειμένων και πραγματικού κόσμου. Τα ψηφιακά αντικείμενα που μπορούν να παρατεθούν στον πραγματικό κόσμο μπορούν να είναι ήχοι, κείμενα, εικόνες, video κλπ.).

Σύμφωνα με τον Azuma (1997) για να χαρακτηριστεί ένα σύστημα ως Επαυξημένη Πραγματικότητα θα πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω τρεις προϋποθέσεις

- α. το πραγματικό κομμάτι και το εικονικό να συνδυάζονται
- β. να συμβαίνουν ταυτόχρονα και σε πραγματικό χρόνο.
- γ. το εικονικό κομμάτι να είναι “χωρικά ευθυγραμμισμένο” έτσι ώστε ο χρήστης να το θεωρεί κομμάτι του πραγματικού κόσμου.

Σύμφωνα με τον Δελημήτρο (2023) παρόλο που ο όρος και η περιγραφή της χρήσης της ΕΠ υπάρχει εδώ και αρκετά χρόνια, μόλις τα τελευταία έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές και υλικό που να την υποστηρίζει με σταθερότητα. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ανάπτυξη της τεχνολογίας σε τέτοιο επίπεδο που αξιόπιστοι αισθητήρες, “έξυπνες συσκευές” καθώς επίσης και εξειδικευμένες συσκευές ΕΠ και γρήγορα δίκτυα δεδομένων, έγιναν προσιτά στο ευρύ κοινό.

1.1.2 Η Εικονική Πραγματικότητα.

Η Εικονική Πραγματικότητα (ΕΠ, Virtual Reality, VR) ορίζεται ως η τεχνολογία που επιτρέπει τη δημιουργία ενός ψηφιακού περιβάλλοντος στο οποίο ο χρήστης καταδύεται πλήρως, χάνοντας την οπτική και ακουστική επαφή με τον πραγματικό κόσμο. Η ΕΠ αντικαθιστά εντελώς το φυσικό περιβάλλον με ένα υπολογιστικά παραγόμενο, προβαλλόμενο μέσα από ειδικές συσκευές όπως κράνη κεφαλής (HMDs), ακουστικά και χειριστήρια κίνησης (Steuer, 1992).

Σε αντίθεση με την Επαυξημένη Πραγματικότητα, όπου ο ψηφιακός κόσμος "συμπληρώνει" τον πραγματικό, η ΕΠ τον αντικαθιστά εξ ολοκλήρου (Milgram & Kishino, 1994). Η τεχνολογία της ΕΠ έχει αξιοποιηθεί σε πολλούς τομείς, όπως η εκπαίδευση, η ψυχοθεραπεία, η ιατρική

προσομοίωση, η εκπαίδευση προσωπικού, αλλά και στον τομέα της ψυχαγωγίας. Η εμπορική διάδοση της ΕΠ έγινε πιο ευρεία την τελευταία δεκαετία, με την κυκλοφορία προσιτών συστημάτων όπως το Oculus Rift, το HTC Vive, το PlayStation VR, και πιο πρόσφατα, το Meta Quest. Όπως και στην περίπτωση της AR, έτσι και η VR έχει τις ρίζες της στη δεκαετία του 1960, με πρωτοπόρους όπως ο Ivan Sutherland, ο οποίος ανέπτυξε το πρώτο σύστημα εικονικής απεικόνισης με HMD (Sutherland, 1968). Σημαντικό ρόλο έπαιξε επίσης ο Morton Heilig, με το Sensorama (1957), μία από τις πρώτες πολυαισθητηριακές εμπειρίες προσομοίωσης.

1.2. Το Ανθρώπινο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα και ο Εγκέφαλος.

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος διαδραματίζει το κύριο ρόλο σε όλες τις ανθρώπινες λειτουργίες. Μια ολιστική θεώρηση του εγκεφάλου τον θεωρεί ως μέρος του κεντρικού νευρικού συστήματος.

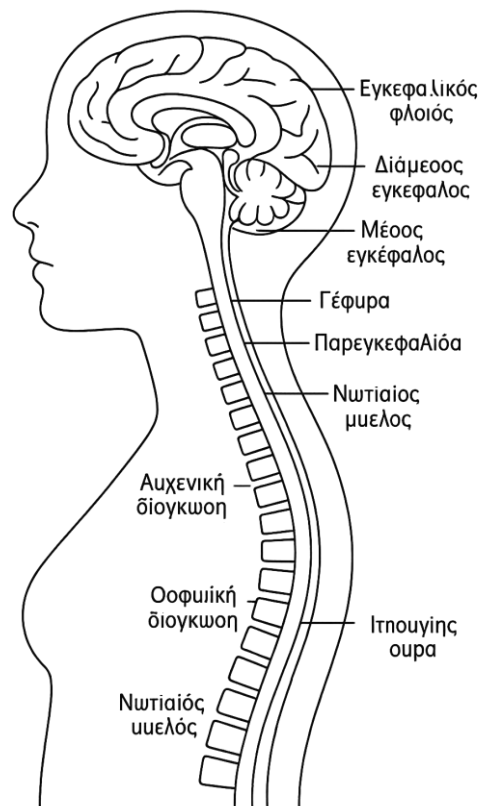
1.2.1 Το Ανθρώπινο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα.

Το ανθρώπινο κεντρικό σύστημα (Kandel, Schwartz, & Jessell, 2005:10) αποτελείται από επτά κύρια μέρη:

- α) Το νωτιαίο μυελό: Δέχεται πληροφορίες από το δέρμα και τα άκρα και ελέγχει τις κινήσεις τους.
- β) Τον προμήκη μυελό: Περιλαμβάνει διάφορα κέντρα αυτόνομων ζωτικών λειτουργιών (καρδιακός ρυθμός, αναπνοή).
- γ) Τη γέφυρα: Μεταφέρει πληροφορίες σχετικές με την επικοινωνία από τα ημισφαίρια στην παρεγκεφαλίδα.
- δ) Την παρεγκεφαλίδα: Εμπλέκεται στην εκμάθηση των κινητικών δεξιοτήτων.
- ε) Το μέσο εγκέφαλο (midbrain): Ελέγχει τα οπτικά και ακουστικά αντανακλαστικά.
- στ) Το διάμεσο εγκέφαλο: Αποτελείται από το θάλαμο και τον υποθάλαμο: ο πρώτος επεξεργάζεται τις πληροφορίες που φτάνουν στον φλοιό από το υπόλοιπο σώμα και ο δεύτερος ρυθμίζει αυτόνομες ενδοκρινικές λειτουργίες.

ζ) Τα εγκεφαλικά ημισφαίρια: Αποτελούνται από το φλοιό, τα βασικά γάγγλια, τον υπόκαμπο και την αμυγδαλή. Τα γάγγλια ρυθμίζουν την κίνηση, ο υπόκαμπος εμπλέκεται στην αποθήκευση της μνήμης ενώ η αμυγδαλή επιδρά στη ρύθμιση και έγχυση των ορμονών και των συναισθημάτων.

Ο φλοιός, που παίζει μεγάλο ρόλο στις ανώτερες λειτουργίες, περιβάλλει τα ημισφαίρια και διαιρείται σε τέσσερις λοβούς (μετωπιαίο, βρεγματικό, κροταφικό και ινιακό). Ο μετωπιαίος σχετίζεται με τον προγραμματισμό των μελλοντικών δράσεων και την κίνηση, ο βρεγματικός με την αίσθηση της αφής, ο ινιακός με την όραση και ο κροταφικός με την ακοή και εμπλέκεται και με την μάθηση και τα συναισθήματα (Σχήμα 1).

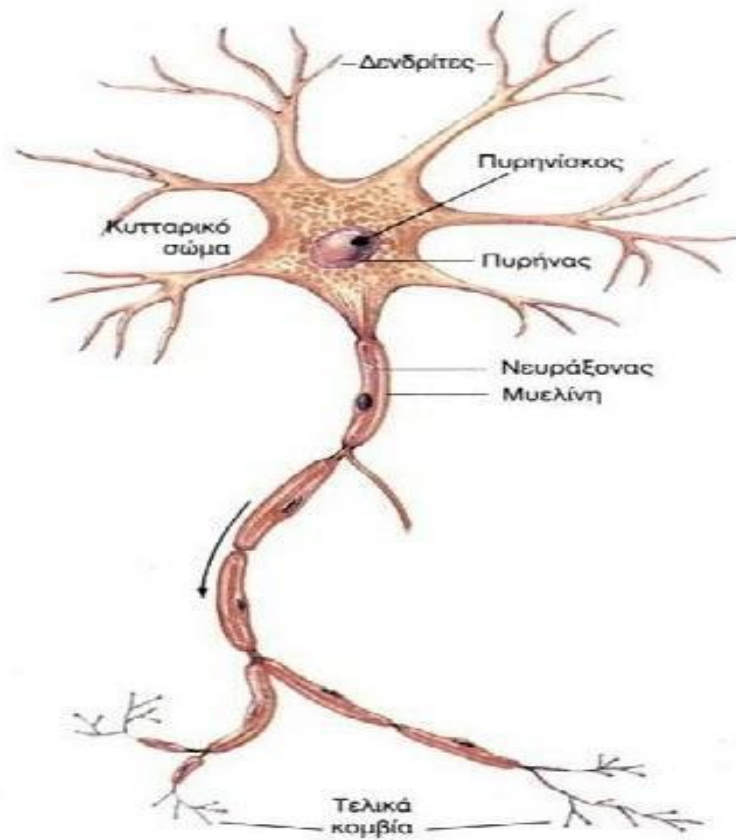


Σχήμα 2 Ο ανθρώπινος εγκέφαλος

1.2.2 Τα νευρικά κύτταρα.

Τα νευρικά κύτταρα ή νευρώνες είναι η δομική μονάδα των νευρικών κυκλωμάτων και κατ' επέκταση, του νευρικού συστήματος και όλης της εγκεφαλικής λειτουργίας. Αποτελούνται από το

κυτταρικό σώμα (που είναι το μεταβολικό κέντρο), το νευράξονα, τους δενδρίτες και τα προσυναπτικά νευρικά κομβία. Ο νευράξονας είναι η βασική μονάδα μετάδοσης της πληροφορίας. Τα ηλεκτρικά δυναμικά που διατρέχουν τον άξονα ονομάζονται δυναμικά ενέργειας και είναι της τάξης των 100mV και διάρκειας 1ms (Kandel, Schwartz, & Jessell, 2005: 25). Οι δενδρίτες είναι το μέρος του νευρώνα που συνδέεται με τους άλλους νευρώνες. Τα διάκενα ονομάζονται συνάψεις και ανάλογα με το είδος του ερεθίσματος που τις ενεργοποιεί διακρίνονται σε ηλεκτρικές και χημικές.



Σχήμα 3 Η δομή ενός τυπικού νευρώνα

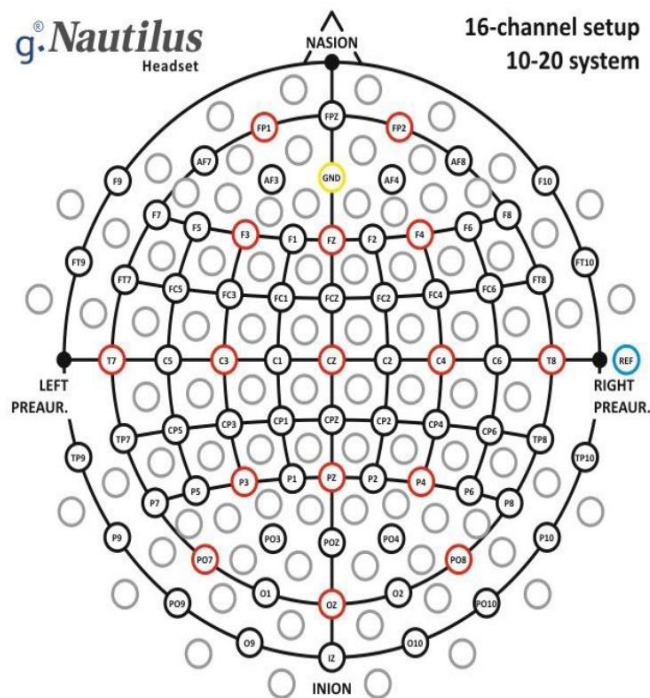
Το δυναμικό ενέργειας του νευρώνα (100 mV) καθώς διαδίδεται μέσα από τις υπερκείμενες δομές του εγκεφάλου εξασθενεί με αποτέλεσμα να φτάνει σε τιμές περίπου 10-100 μ V. Οπότε μπορούν να γίνουν αισθητά ηλεκτρικά σήματα μόνο από ταυτόχρονη δραστηριότητα μεγάλου αριθμού νευρώνων. Σύμφωνα με τον Terplan (2002), τα ηλεκτροεγκεφαλικά σήματα (EEG) στο τριχωτό της κεφαλής κυμαίνονται συνήθως από 0.5 έως 100 μ V (peak-to-peak). Σε παθολογικές

καταστάσεις, όπως η επιληψία, μπορούν να καταγραφούν κύματα ακόμη και της τάξης των 1000 μV .

1.2.3 Συλλογή και επεξεργασία των ηλεκτρικών σημάτων των νευρικών κυττάρων.

Τα ηλεκτρικά σήματα από τον εγκέφαλο συλλέγονται από κατάλληλα ηλεκτρόδια και οδηγούνται μετά από ενίσχυση, προεπεξεργασία και ψηφιοποίηση σε κάποιο καταγραφικό σύστημα. Υπάρχουν ποικίλα είδη ηλεκτροδίων, καθένα από τα οποία παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η επιλογή είναι θέμα εφαρμογής. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις στο τριχωτό της κεφαλής που στο συγκεκριμένο πείραμα περιγράφονται από το **διεθνές σύστημα τοποθέτησης ηλεκτροδίων 10–20**. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελεί το πιο διαδεδομένο πρότυπο για την καταγραφή ηλεκτροεγκεφαλογράφηματος (EEG). Αναπτύχθηκε για να διασφαλίσει τυποποιημένη τοποθέτηση ηλεκτροδίων σε διαφορετικούς ερευνητικούς και κλινικούς χώρους. Η ονομασία “10–20” προέρχεται από τις σχετικές αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, οι οποίες αντιστοιχούν σε ποσοστά 10% ή 20% της συνολικής απόστασης μεταξύ ανατομικών σημείων αναφοράς του κρανίου. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι οι θέσεις των ηλεκτροδίων αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες περιοχές του εγκεφαλικού φλοιού. Το σύστημα επιτρέπει τόσο την αξιόπιστη σύγκριση μεταξύ συμμετεχόντων όσο και τη συσχέτιση των ηλεκτροφυσιολογικών σημάτων με γνωστές λειτουργικές περιοχές του εγκεφάλου, καθιστώντας το απαραίτητο εργαλείο στην ερευνητική και κλινική πρακτική. Οι θέσεις των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στη παρούσα εργασία, καθώς και η τυπολογική ομαδοποίηση τους φαίνονται παρακάτω.

- **Μετωπιαία (Frontal: Fp1, Fp2, F3, F4, Fz)** που σχετίζονται με εκτελεστικές λειτουργίες, προσοχή και γνωστικό έλεγχο.
- **Κεντρικά (Central: C3, C4, Cz)** που αντιστοιχούν σε κινητικές και σωματοαισθητικές περιοχές.
- **Βρεγματικά (Parietal: P3, P4, Pz)** που εμπλέκονται στην αισθητηριοκινητική ολοκλήρωση και στην οπτικοχωρική προσοχή.
- **Ινιακά (Occipital: O1, O2, Oz)** που αντιστοιχούν στις οπτικές περιοχές.
- **Βρεγματικό-Ινιακά (Parieto-Occipital: PO7, PO8)** που σχετίζονται με οπτικοχωρική προσοχή και αναστολή ανεπιθύμητων οπτικών ερεθισμάτων.



Electrode	Logical Channel
FP1	1
FP2	2
F3	3
FZ	4
F4	5
T7	6
C3	7
CZ	8
C4	9
T8	10
P3	11
PZ	12
P4	13
PO7	14
PO8	15
OZ	16

Σχήμα 4 Το σύστημα τοποθέτησης ηλεκτροδίων 10-20

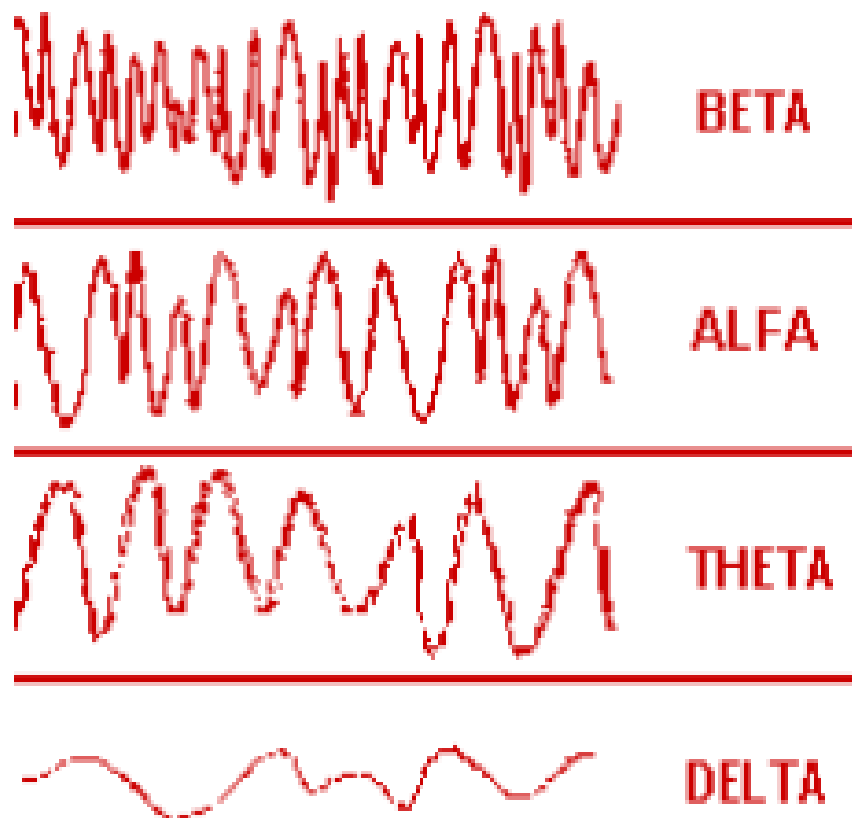
1.2.4 Οι εγκεφαλικοί ρυθμοί

Τα ηλεκτρικά σήματα που προέρχονται από τον εγκέφαλό μπορούν να ανιχνευθούν και να καταγραφούν με συσκευές που ονομάζονται εγκεφαλογράφοι. Τα σήματα μπορούν να αναλυθούν φασματικά και να κατηγοριοποιηθούν σε 5 κατηγορίες ανάλογα με τη συχνότητα τους και ονομάζονται εγκεφαλικοί ρυθμοί. Οι εγκεφαλικοί ρυθμοί αποτελούν τα χαρακτηριστικά πρότυπα

ηλεκτρικής δραστηριότητας και αντανakλούν τη λειτουργική κατάσταση του εγκεφάλου. Κάθε ρυθμός χαρακτηρίζεται από το εύρος συχνοτήτων του και συνδέεται με συγκεκριμένες γνωστικές και συναισθηματικές καταστάσεις : (Cavanagh & Frank, 2014):

- Δέλτα (0.5–4 Hz): Κυριαρχούν στον βαθύ ύπνο και σε καταστάσεις απώλειας συνείδησης. Συνδέονται με διαδικασίες αποκατάστασης του οργανισμού.
- Θήτα (4–8 Hz): Εμφανίζονται σε χαλάρωση, υπνηλία και ονειρική κατάσταση, αλλά και κατά τη μάθηση και την εσωτερική συγκέντρωση. Οι διαφοροποιήσεις στο μετωπιαίο λοβό (Frontal: Fp1, Fp2, F3, F4, Fz) είναι ενδεικτικές αυξημένου γνωστικού φόρτου.
- Άλφα (8–13 Hz): Χαρακτηρίζονται από ηρεμία με κλειστά μάτια, χαλάρωση και ελαφρά εσωστρέφεια. Μειώνονται με το άνοιγμα των ματιών ή με έντονη νοητική δραστηριότητα. Η δραστηριότητα στον βρεγματικό λοβό (Parietal: P3, P4, Pz) σχετίζεται με την κατανομή προσοχής και την πρόσβαση σε αποθηκευμένες πληροφορίες (Klimesch, 2012).
- Βήτα (13–30 Hz): Συνδέονται με εγρήγορση, γνωστική επεξεργασία και αυξημένη προσοχή. Υπερβολική δραστηριότητα βήτα έχει συσχετιστεί με άγχος.
- Γάμμα (>30 Hz): Εντοπίζονται σε υψηλού επιπέδου γνωστικές διεργασίες, όπως η αντίληψη, η μνήμη εργασίας και η ολοκλήρωση αισθητηριακής πληροφορίας.

Οι παραπάνω ρυθμοί δεν είναι ανεξάρτητοι, αντιθέτως συνυπάρχουν και αλληλοεπιδρούν, αντικατοπτρίζοντας τη δυναμική ισορροπία μεταξύ διαφορετικών λειτουργικών καταστάσεων του εγκεφάλου (Tsiara, 2021). Οι εγκεφαλικές ζώνες (συχνοτήτων) που καταγράφονται μέσω EEG αποτελούν βασικούς δείκτες της λειτουργικής κατάστασης του εγκεφάλου και συνδέονται με γνωστικές διεργασίες όπως η προσοχή, η μνήμη και η μάθηση.



Σχήμα 5 Οι τέσσερις βασικοί εγκεφαλικοί ρυθμοί (ζώνες συχνότητων)

Οι νευροεπιστήμες αναγνωρίζουν ότι η μνήμη δεν αποτελεί ενιαία οντότητα, αλλά περιλαμβάνει διακριτά συστήματα, (όπως η βραχύχρονη, η μακρόχρονη, η δηλωτική και η μη δηλωτική μνήμη), τα οποία υποστηρίζονται από διαφορετικά νευρωνικά κυκλώματα (Kandel, Schwartz, & Jessell, 2005). Τα συστήματα αυτά εξηγούν πώς οι εμπειρίες κωδικοποιούνται και αποθηκεύονται σε βιολογικό επίπεδο, αναδεικνύοντας τον ρόλο του ιππόκαμπου, των βασικών γαγγλίων και της παρεγκεφαλίδας στη διαδικασία της μάθησης και της μνήμης.

Στο πεδίο της εκπαιδευτικής ψυχολογίας, η προσοχή των ερευνητών στρέφεται κυρίως στην εργαζόμενη μνήμη, η οποία, λόγω περιορισμού στη χωρητικότητά της, αποτελεί το κρίσιμο «στενό πέρασμα» bottleneck της γνωστικής επεξεργασίας. Εδώ εντάσσεται η Θεωρία του Γνωστικού φόρτου (Cognitive Load Theory, CLT), η οποία επιχειρεί να περιγράψει πώς η κατανομή και η διαχείριση του γνωστικού φόρτου στην εργαζόμενη μνήμη επηρεάζει τη μάθηση

(Sweller, 1988, 2010). Η σύνδεση των δύο προσεγγίσεων, της νευροεπιστήμης και της γνωστικής ψυχολογίας, προσφέρει ένα ολοκληρωμένο θεωρητικό πλαίσιο. Έτσι οι βιολογικές βάσεις της μνήμης, καθορίζουν τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της μάθησης, ενώ η CLT εστιάζει στο πώς ο εκπαιδευτικός σχεδιασμός μπορεί να αξιοποιήσει αυτούς τους περιορισμούς για την αποτελεσματική μετάδοση γνώσης (Paas, Renkl, & Sweller, 2003).

1.3 Ο Γνωστικός φόρτος

1.3.1 Η θεωρία του γνωστικού φόρτου.

Η θεωρία του γνωστικού φόρτου (Cognitive Load Theory, CLT) αναπτύχθηκε από τον John Sweller στα τέλη της δεκαετίας του 1980 με σκοπό να εξηγήσει πώς οι περιορισμοί της εργαζόμενης μνήμης (ή μνήμης εργασίας) επηρεάζουν τη μάθηση (Sweller, 1988, 2010). Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η ανθρώπινη μνήμη εργασίας έχει περιορισμένη χωρητικότητα και διάρκεια, γεγονός που σημαίνει ότι η υπερφόρτωση της μπορεί να εμποδίσει την αποτελεσματική επεξεργασία πληροφοριών και τη δημιουργία μακροπρόθεσμων γνωστικών αναπαραστάσεων στη μνήμη. Η μνήμη εργασίας παίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της μάθησης γιατί οι πληροφορίες αποθηκεύονται σε αυτή προσωρινά και στη συνέχεια μεταφέρονται και αποθηκεύονται στη μακροπρόθεσμη μνήμη.

Η CLT διακρίνει τρεις τύπους γνωστικού φόρτου (Paas, Renkl, & Sweller, 2003).:

- **Εγγενές φορτίο (intrinsic load):** αφορά τη δυσκολία του ίδιου του περιεχομένου σε σχέση με τις γνώσεις και τις δεξιότητες του εκπαιδευόμενου.
- **Εξωγενές φορτίο (extraneous load):** προκαλείται από τον τρόπο παρουσίασης του υλικού, ιδιαίτερα όταν περιέχει άσχετες ή περίπλοκες πληροφορίες που δεν διευκολύνουν τη μάθηση.
- **Ωφέλιμο φορτίο (germane load):** σχετίζεται με τις νοητικές διεργασίες που συμβάλλουν στη δημιουργία και οργάνωση γνωστικών σχημάτων, και θεωρείται θετικό για τη μαθησιακή διαδικασία.

Η θεωρία του γνωστικού φόρτου έχει σημαντική συμβολή στον σχεδιασμό εκπαιδευτικών περιβαλλόντων και τεχνολογιών μάθησης. Περιβάλλοντα που μειώνουν το εξωγενές φορτίο και ενισχύουν το ωφέλιμο, επιτρέπουν στους μαθητές να αφομοιώσουν καλύτερα τις πληροφορίες και να αναπτύξουν ουσιαστικές γνωστικές δεξιότητες. Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση τεχνολογιών *εμβύθισης*, όπως η Επαυξημένη AR και η Εικονική Πραγματικότητα (VR), έχει προταθεί ως μέσο μείωσης του εξωγενούς φορτίου, καθώς προσφέρουν πιο φυσική και διαισθητική αλληλεπίδραση με τις πληροφορίες (Mikropoulos & Natsis, 2011).

1.3.2 Η Θεωρία της Γνωστικής Πολυμεσικής Μάθησης.

Η Θεωρία της Γνωστικής Πολυμεσικής Μάθησης (Cognitive Theory of Multimedia Learning, CTML) αναπτύχθηκε από τον Richard Mayer (2002) και στηρίζεται σε τρεις βασικές παραδοχές της γνωστικής επιστήμης: διπλά κανάλια, περιορισμένη χωρητικότητα και ενεργή επεξεργασία (Mayer, 2002). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, οι άνθρωποι μαθαίνουν καλύτερα όταν οι πληροφορίες παρουσιάζονται με τρόπο που ενεργοποιεί τόσο το οπτικο-χωρικό όσο και το ακουστικό-λεκτικό κανάλι, αποφεύγοντας την υπερφόρτωση της εργαζόμενης μνήμης και ενισχύοντας τη διαδικασία επιλογής, οργάνωσης και ενοποίησης πληροφοριών σε μακρόχρονη μνήμη. Ο Mayer (2002) διακρίνει τρεις διαφορετικές οπτικές για τον ορισμό των πολυμέσων :

- (α) *delivery media view*, που εστιάζει στη χρήση διαφορετικών μέσων παρουσίασης (π.χ. οθόνη και μεγάφωνο).
- (β) *presentation modes view*, που εστιάζει στη συνδυασμένη παρουσίαση λέξεων και εικόνων.
- (γ) *sensory modalities view*, που εστιάζει στις αισθητηριακές οδούς πρόσληψης (οπτική και ακουστική).

Ο ίδιος απορρίπτει την πρώτη, τεχνοκεντρική προσέγγιση, διότι επικεντρώνεται στο μέσο και όχι στον μαθητή, και υιοθετεί κυρίως τη δεύτερη και τρίτη, οι οποίες εναρμονίζονται με τις αρχές της γνωστικής επιστήμης. Η CLT δίνει έμφαση στον περιορισμό της εργαζόμενης μνήμης και στη διαχείριση του γνωστικού φόρτου (*intrinsic, extraneous, germane*), ενώ η CTML εξειδικεύει αυτές τις αρχές στο πλαίσιο της μάθησης με πολυμέσα. Έτσι, ο Mayer μετέφρασε τα ευρήματα της CLT σε συγκεκριμένες αρχές σχεδιασμού που παρουσιάζονται παρακάτω:

- α) Segmenting (Τμηματοποίηση), μικρά διακριτά τμήματα στο σχεδιασμό του υλικού.
- β) Signaling (Σήμανση), χρήση ενδείξεων που κατευθύνουν τη προσοχή του κοινού .
- γ) Spatial Contiguity (Χωρική συνάφεια), οι πληροφορίες πρέπει να βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους.
- δ) Temporal Contiguity (Χρονική συνάφεια), τα διαφορετικά κανάλια πληροφορίας (ακουστικό, οπτικό) θα πρέπει να είναι συγχρονισμένα.
- ε) Coherence (Συνοχή), να μην υπάρχουν πολλά περιττά στοιχεία που αποσπάνε τη προσοχή.
- στ) Modality (Τροπικότητα με ανθρώπινη φωνή), αφήγηση με ανθρώπινη φωνή.

Η CTML αναφέρεται ως μια θεωρία αξιοποιείται στο σχεδιασμό ψηφιακών αντικειμένων για τεχνολογίες μάθησης με στόχο τα βέλτιστα παιδαγωγικά αποτελέσματα στο πίνακα 1 παρουσιάζονται αναλυτικά.

***Πίνακας 1** Βασικές αρχές της CTML σε συνδιασμό με την επίδραση στο γνωστικό φόρτο.*

Αρχή	Περιγραφή	Επίδραση στο γνωστικό φόρτο
Segmenting (Τμηματοποίηση)	Το υλικό παρουσιάζεται σε μικρά, διακριτά τμήματα, ώστε ο εκπαιδευόμενος να μπορεί να προχωρά με τον δικό του ρυθμό.	Μειώνει το εξωγενές φορτίο, επιτρέποντας καλύτερη διαχείριση της μνήμης εργασίας.
Signaling (Σήμανση)	Χρήση ενδείξεων όπως βέλη, χρώματα, ή λεκτικά σήματα που κατευθύνουν την προσοχή στα κρίσιμα σημεία.	Διευκολύνει την επιλεκτική προσοχή και περιορίζει το περιττό γνωστικός φόρτος.
Spatial Contiguity (Χωρική συνάφεια)	Κείμενο/ετικέτες τοποθετούνται κοντά στα αντίστοιχα οπτικά στοιχεία.	Μειώνει το φαινόμενο διάσπασης της προσοχής και βελτιώνει την ενσωμάτωση πληροφορίας.
Temporal Contiguity (Χρονική συνάφεια)	Η αφήγηση και το οπτικό υλικό παρουσιάζονται ταυτόχρονα, όχι με καθυστέρηση.	Ενισχύει τη συγχώνευση των πληροφοριών και μειώνει γνωστικές ασυνέχειες.
Coherence (Συνοχή)	Απομάκρυνση περιττών ή διακοσμητικών στοιχείων (π.χ. μουσική υποβάθρου, άσχετες εικόνες).	Μειώνει το εξωγενές φορτίο, αφήνοντας χώρο για το ενδογενές.
Modality (Τροπικότητα με ανθρώπινη φωνή)	Η αφήγηση γίνεται με προφορικό λόγο (ανθρώπινη φωνή) αντί για γραπτό κείμενο, συνδυαζόμενη με οπτικά στοιχεία.	Χρησιμοποιεί ταυτόχρονα το ακουστικό και οπτικό κανάλι, αξιοποιώντας καλύτερα τη μνήμη εργασίας.

1.4 Γνωστικός φόρτος σε περιβάλλοντα εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας με χρήση ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων: μια βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Στόχος της ανασκόπησης ήταν η διερεύνηση μελετών για το γνωστικός φόρτος σε περιβάλλοντα εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας με χρήση ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων. Η αναζήτηση έγινε στην ακαδημαϊκή βάση Scopus με τον ακόλουθο αλγόριθμο:

("virtual reality" OR "augmented reality" OR VR OR AR) AND ("cognitive load" OR "mental workload" OR workload) AND (EEG OR "electroencephalography" OR "brain activity")AND("Nasa-tlx").

Τα σημαντικότερα ευρήματα ήταν οκτώ δημοσιεύσεις, οι δύο εκ των οποίων ήταν ανασκοπήσεις.

Οι Buchner, Buntins και Kerres (2022) ξεκινώντας από 2008 δημοσιεύσεις κατέληξαν σε 54 σχετικές με την επαυξημένη πραγματικότητα και την επίδραση της στο γνωστικός φόρτος. Το βασικό τους συμπέρασμα ήταν ότι στις περισσότερες εργασίες το γνωστικό φορτίο είναι μικρότερο ή ίσο όταν γίνεται χρήση της επαυξημένης πραγματικότητας ΕΠ κυρίως σε αντιπαράθεση με συμβατικά μέσα (έντυπες ή ακουστικές οδηγίες). Πλήθος μελετών είχε δείξει ότι δείκτες ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος, όπως η ισχύς στα μετωπιαία θ και βρεγματικά άλφα κύματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του γνωστικού φόρτου και την ανάπτυξη σύνθετων δεικτών, όπως ο Cognitive Load Index (CLI) (Holm et al., 2009).

Οι Baceviciute, Terkildsen, and Makransky (2021) έδειξαν ότι η ανάγνωση σε περιβάλλον VR οδήγησε σε αποδοτικότερη μεταφορά γνώσης αλλά και μεγαλύτερο χρόνο μελέτης. Οι ερευνητές συνέκριναν την ανάγνωση σε φυσικό φυλλάδιο έναντι ταυτόσημου εικονικού φυλλαδίου μέσα σε εικονικό δωμάτιο νοσοκομείου. Το δείγμα αποτέλεσαν 48 φοιτητές σε τυχαιοποιημένη μεταξύ-ομάδων κατηγοριοποίηση. Μετρήθηκαν η διατήρηση γνώσεων (retention), η μεταφορά (transfer), ο χρόνος ανάγνωσης, οι αυτο-αναφορές γνωστικού φόρτου και δείκτες EEG (PSD σε περιοχές θήτα, άλφα, βήτα). Κύριο εύρημα ήταν ότι η ομάδα VR είχε σημαντικά υψηλότερη επίδοση στη μεταφορά γνώσης (δείκτης Cohen's $d \approx 0.61$, μετρία επίδραση), χωρίς διαφορά στη διατήρηση της πληροφορίας. Η ανάγνωση σε VR ήταν βραδύτερη (δείκτης Cohen's $d \approx 1.10$, υψηλή επίδραση). Στις αυτο-αναφορές, το περιεχόμενο θεωρήθηκε δυσκολότερο στον φυσικό περιβάλλον, ενώ η μορφή παρουσίασης δυσκολότερη στο εικονικό. Η συνολική νοητική προσπάθεια και συγκέντρωση δεν διέφεραν. Στο EEG, το εικονικό περιβάλλον εμφάνισε αυξημένη βρεγματική θήτα (ιδίως στο POz) και μειωμένη άλφα και βήτα δραστηριότητα, αποτέλεσμα που συνάδει με

μεγαλύτερη εμπλοκή/νοητική προσπάθεια και διαδικασίες μνήμης μακράς διάρκειας. Συνολικά, η ενσωμάτωση του περιβάλλοντος ενισχύει την εννοιολογική κατανόηση/μεταφορά, με κόστος χρόνου και αυξημένη αντιληπτή «δυσκολία». Η μελέτη αυτή συνέκρινε εικονικό περιβάλλον με παραδοσιακά μέσα (έντυπο κείμενο) που και έδωσε το έναυσμά για σύγκριση περιβαλλόντων VR με AR.

Οι Dan και Reiner (2017) έδειξαν ότι η παρακολούθηση οδηγιών σε δυσδιάστατο περιβάλλον (2D) συνεπάγεται υψηλότερο γνωστικό φόρτο σε σχέση με ένα τρισδιάστατο εικονικό περιβάλλον. Η έρευνα τους αποτέλεσε σημείο αναφοράς για τη μελέτη του γνωστικού φόρτου σε εμβυθιστικά περιβάλλοντα μάθησης. Οι συγγραφείς διερεύνησαν πώς η μορφή παρουσίασης επηρεάζει το γνωστικό φόρτο κατά την εκμάθηση διαδικασιών origami. Το δείγμα αποτέλεσαν 17 ενήλικες, οι οποίοι χωρίστηκαν σε δύο ομάδες. Η μία ξεκίνησε με βίντεο 2D και η άλλη με τρισδιάστατη (3D) στερεοσκοπική παρουσίαση του ίδιου του εκπαιδευτικού. Η διαδικασία περιλάμβανε δύο επίπεδα δυσκολίας (εύκολο κουτί και πιο απαιτητικό γερανό). Η διδασκαλία ήταν δομημένη σε επαναλαμβανόμενα μπλοκ: 20 δευτερόλεπτα παρατήρησης και 30 δευτερόλεπτα εκτέλεσης, τέσσερις φορές για κάθε διαδικασία. Η ηλεκτροεγκεφαλογραφική καταγραφή επικεντρώθηκε στη περιοχή θ στο σημείο Fz (frontal theta) και στη περιοχή α στο σημείο Pz (βρεγματικά alpha). Οι συγγραφείς υπολόγισαν έναν σύνθετο δείκτη γνωστικού φόρτου (Cognitive Load Index, CLI) ως λόγο θ/α. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο CLI ήταν σημαντικά υψηλότερος στη συνθήκη 2D σε σύγκριση με την 3D. Αυτό σημαίνει ότι οι στερεοσκοπικές τρισδιάστατες παρουσιάσεις μείωσαν το γνωστικό φόρτο, παρά το γεγονός ότι παρείχαν πλουσιότερο οπτικό ερέθισμα. Επιπλέον, οι συμμετέχοντες με χαμηλότερες χωρικές ικανότητες επωφελήθηκαν περισσότερο από τη 3D παρουσίαση, γεγονός που υποδεικνύει ότι οι εμβυθιστικές τεχνολογίες μπορούν να λειτουργήσουν αντισταθμιστικά για άτομα με χαμηλότερες δεξιότητες.

Η συστηματική ανασκόπηση των Gramouseni et al. (2023) περιέλαβε 82 δημοσιεύσεις που εντοπίστηκαν σε 32 βάσεις δεδομένων, εστιάζοντας σε τυχαιοποιημένες πρωτογενείς έρευνες από το 2013 και μετά, με χρήση ηλεκτροεγκεφαλογραφίας και head-mounted displays. Το 90% των μελετών αφορούσε την εικονική πραγματικότητα (VR), ενώ μόλις το 10% εξέτασε εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (AR), γεγονός που δείχνει ότι η ερευνητική εστίαση παραμένει ανισόρροπη. Σχετικά με τον εξοπλισμό, το 13% χρησιμοποίησε φορητούς εγκεφαλογράφους τύπου headset, ενώ το 87% βασίστηκε σε σταθερά συστήματα. Πάνω από τις μισές μελέτες

περιλάμβαναν καταγραφές με περισσότερα από 16 ηλεκτρόδια, επιδιώκοντας υψηλότερη χωρική ανάλυση. Παράλληλα, περίπου το 30% των ερευνών μελέτησε ρητά το γνωστικό φόρτο ως κύρια μεταβλητή, ενώ οι υπόλοιπες επικεντρώθηκαν σε άλλες γνωστικές λειτουργίες, όπως η προσοχή, η μνήμη ή η συναισθηματική εμπλοκή. Η χρήση ανάλογων ανασκοπήσεων δεν ενδείκνυται σε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση αλλά η συγκεκριμένη δίνει μια σαφή εικόνα και προτροπή για συγκριτικές έρευνες VR με AR, για να εξαχθούν πιο ακριβή και συγκρίσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη χρησιμότητά τους στη γνωστική νευροεπιστήμη.

Σε πιο στοχευμένες εφαρμογές, οι Vortmann, Kroll και Putze (2019) αξιοποίησαν SSVEP (Steady state visually evoked potential, οπτικά προκλητά δυναμικά σταθερής κατάστασης) για να διαχωρίσουν την εξωτερικά από την εσωτερικά κατευθυνόμενη προσοχή σε περιβάλλον επαυξημένης πραγματικότητας, δείχνοντας τη δυνατότητα εφαρμογής EEG για την μελέτη γνωστικών διεργασιών σε AR. Παράλληλα, η βιβλιογραφία για τη μάθηση σε πολυμεσικά περιβάλλοντα αναδεικνύει τη σημασία των δεικτών EEG ως μέτρα γνωστικού φόρτου. Μελέτες όπως των Scharinger και συνεργατών (2015) συνδύασαν κύματα με μετρήσεις διαστολής κόρης, καταδεικνύοντας τη συγκλίνουσα εγκυρότητα διαφορετικών βιοφυσιολογικών δεικτών. Άλλες εργασίες, όπως των Borghini και συνεργατών (2012), εφάρμοσαν δείκτες EEG σε ρεαλιστικά πλαίσια (σε πιλότους και οδηγούς) για την παρακολούθηση φόρτου, κόπωσης και υπνηλίας, επεκτείνοντας τη χρήση τους πέραν του εκπαιδευτικού πλαισίου.

Οι Candido και Cattaneo (2025) διερεύνησαν την εφαρμογή των αρχών της θεωρίας CTML στον σχεδιασμό εκπαιδευτικού υλικού σε περιβάλλον επαυξημένης πραγματικότητας με τη χρήση του παιχνιδιού Tangram σε δείγμα 88 συμμετεχόντων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, όταν το υλικό σχεδιάζεται σύμφωνα με τις αρχές της CTML, το εξωγενές γνωστικό φόρτο δεν αυξήθηκε σε σχέση με το βίντεο, ενώ η αύξηση του ενδογενούς φορτίου ανέδειξε τις γνωστικές απαιτήσεις της εργασίας. Όσον αφορά τα μαθησιακά αποτελέσματα, η διατήρηση γνώσεων ήταν ελαφρώς καλύτερη στο βίντεο, αλλά η μεταφορά γνώσεων δεν παρουσίασε σημαντικές διαφορές μεταξύ συνθηκών, υποδεικνύοντας ότι η ποιότητα σχεδιασμού ήταν πιο κρίσιμη από το ίδιο το μέσο παρουσίασης. Ο έλεγχος έγινε με την υποκειμενική μέθοδο των ερωτηματολογίων.

Η διερεύνηση του γνωστικού φόρτου μέσω EEG σε περιβάλλοντα εμπύθισης αποτελεί ένα αναδυόμενο ερευνητικό πεδίο με εφαρμογές στη μάθηση, την εκπαίδευση και τη διεπαφή ανθρώπου-υπολογιστή. Συνολικά, τα αποτελέσματα συγκλίνουν ότι οι δείκτες EEG (ιδιαίτερα οι

αλλαγές σε κύματα θ και α) είναι ευαίσθητοι στην αντίχρεωση του γνωστικού φόρτου σε ποικίλα περιβάλλοντα, με τα περιβάλλοντα εμβύθισης και 3D να παρουσιάζουν συνήθως μειωμένο φορτίο σε σχέση με 2D. Ωστόσο, τα περισσότερα έργα εστιάζουν είτε σε συγκρίσεις 2D και 3D είτε σε μεμονωμένα σενάρια AR ή VR, χωρίς να υπάρχει άμεση, συστηματική σύγκριση μεταξύ AR και VR με χρήση EEG και ταυτόχρονη αξιοποίηση υποκειμενικών μεθόδων όπως το εργαλείο NASA-TLX. Το κενό αυτό αναδεικνύει την ανάγκη για έρευνα που θα εξετάσει συγκριτικά τα δύο περιβάλλοντα, ώστε να αποσαφηνιστεί πώς διαφοροποιούνται οι νευροφυσιολογικοί δείκτες γνωστικού φόρτου και να συνδεθούν με τα υποκειμενικά δεδομένα αυτοαναφοράς (NasaTlx).

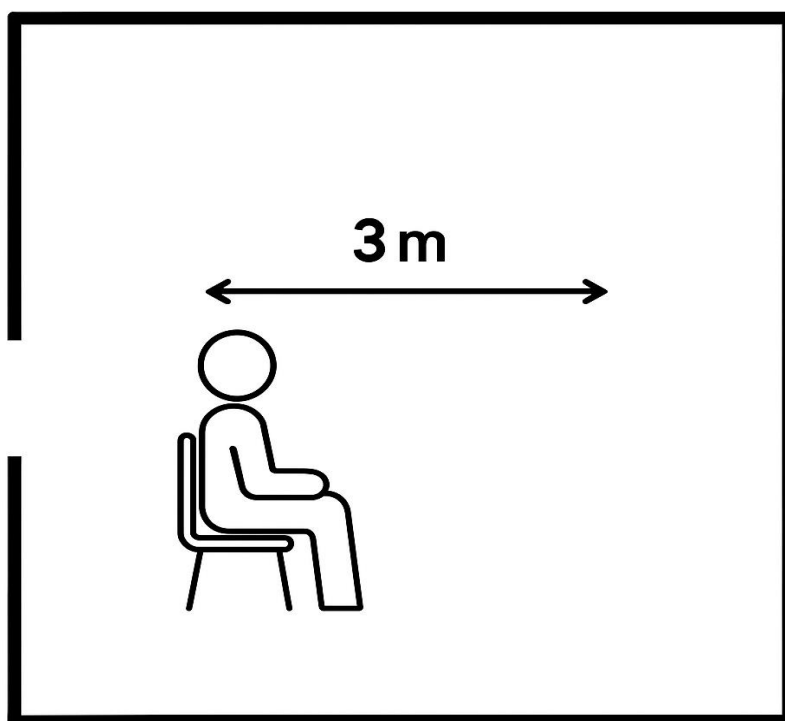
Κεφάλαιο 2^ο Μεθοδολογία

2.1 Σκοπός της έρευνας και ερευνητικά ερωτήματα

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η διερεύνηση γνωστικού φόρτου σε δύο διαφορετικά εκπαιδευτικά περιβάλλοντα εμπύθισης, ένα εικονικό και ένα επαυξημένης πραγματικότητας.

2.2 Δείγμα- διαδικασία συλλογής δεδομένων έρευνας

Το πείραμα στο οποίο βασίζεται η παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Εικονικής Πραγματικότητας του Παιδαγωγικού Τμήματος Δημοτικής Εκπαίδευσης του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Οι συμμετέχοντες, 25 άντρες και γυναίκες, ήταν φοιτητές του ιδίου τμήματος προπτυχιακού και μεταπτυχιακού επιπέδου. Ο χώρος διεξαγωγής αποτελείται από δωμάτιο 20 τετραγωνικών ειδικά διαμορφωμένο για σχετικά πειράματα (με δυνατότητα απομόνωσης από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως φως-ήχος). Ο χώρος προετοιμάστηκε κατάλληλα για να βρίσκεται ο/η συμμετέχων/ουσα συνεχώς καθισμένος/η σε σταθερό σημείο (τρία μέτρα μακριά από τον τοίχο) ώστε να μειθούν όσο γίνεται οι επιδράσεις των κινήσεων στην καταγραφή (Εικόνα 6). Στους συμμετέχοντες εξηγήθηκε αναλυτικά η ροή του πειράματος και τους ζητήθηκε να καθίσουν αναπαυτικά στην καρέκλα. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στο κεφάλι τους εναλλάξ οι συσκευές VR και AR (με τυχαία σειρά) καθώς και η συσκευή του εγκεφαλογράφου. Στις συσκευές εμπύθισης «έτρεξε» η εφαρμογή, ενώ παράλληλα άρχισε η καταγραφή των εγκεφαλικών σημάτων με τον εγκεφαλογράφο της G.tec. σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφετε σε παρακάτω κεφάλαιο.



Σχήμα 6 Σκαρίφημα του δωματίου καταγραφής.

2.3 Ερευνητικά εργαλεία

2.3.1 Συσκευή επαυξημένης πραγματικότητας (AR) MagicLeap

Για την εφαρμογή της μελέτης στην επαυξημένη πραγματικότητα χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Magic Leap 2. Πρόκειται για μια συσκευή υψηλών προδιαγραφών που συνδυάζει άριστη προβολή και χωρική “αντίληψη” με εργονομικό σχεδιασμό (Magic Leap, 2023). Αποτελείται δε από δύο βασικά μέρη: (α) τα γυαλιά που ενσωματώνουν οπτικά συστήματα στερεοσκοπικής προβολής, κάμερες ιχνηλάτησης ματιού, μικρόφωνα και μεγάφωνα και, (β) την επεξεργαστική μονάδα που συνδέεται με καλώδιο με τα γυαλιά και παρέχει όλες τις δυνατότητες επεξεργασίας, επικοινωνίας και αποθήκευσης (Magic Leap, 2023). Τα Magic Leap 2 παρέχουν γωνία προβολής περίπου 70° με ανάλυση 1440×1760 pixels ανά μάτι (Magic Leap, 2023). Παρέχεται δυναμική ρύθμιση της φωτεινότητας ώστε να διακρίνονται τα ψηφιακά αντικείμενα σε όλα τα περιβάλλοντα (Virtual Reality Times, 2022). Το μικρό βάρος της μάσκας (≈ 260 g), βοηθάει τους συμμετέχοντες στα πειράματα να την εφαρμόζουν πάνω τους για πολλή ώρα χωρίς ενοχλήσεις. Τέλος, το λειτουργικό

σύστημα που χρησιμοποιείται είναι Android και έτσι μπορούν σχετικά εύκολα να “τρέξουν” οι εφαρμογές που σχεδιάστηκαν σε Unity.



Σχήμα 7 Η συσκευή επαυξημένης πραγματικότητας Magic Leap 2

2.3.2 Συσκευή εικονικής πραγματικότητας (VR) Oculus

Για Τη μελέτη στο περιβάλλον της εικονικής πραγματικότητας (VR) χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Oculus Rift S. Η συσκευή πρέπει να είναι συνδεδεμένη συνεχώς με κάποιον υπολογιστή με ισχυρή κάρτα γραφικών ώστε να επεξεργάζεται τα δεδομένα που παρουσιάζονται στις οθόνες της συσκευής. Είναι σχεδιασμένη ώστε τα οπτικά συστήματα που έχει να είναι κάπως “ανετά” στο χρήστη. Η συσκευή χρησιμοποιεί lcd panels με ανάλυση 2560×1440 pixels (1280×1440 για κάθε μάτι) και συχνότητα ανανέωσης (refresh rate) 80Hz. Κατά τη λειτουργία της χρησιμοποιεί ένα σύστημα αναγνώρισης θέσης (tracking system) για τη θέση του χρήστη με έξι βαθμούς ελευθερίας (6_DOF), χωρίς να χρειάζονται εξωτερικοί προσθετοί αισθητήρες (Meta, 2019).



Σχήμα 8 Η συσκευή VR Oculus Rift S

2.3.3 Ο ασύρματος Εγκεφαλογράφος G.Tec g.Nautilus.

Για την συλλογή των εγκεφαλογραφημάτων χρησιμοποιήθηκε η συσκευή g.Nautilus της εταιρίας g.tec. Το συγκεκριμένο σύστημα είναι σχεδιασμένο περισσότερο για ερευνητική αξιοποίηση και συνδυάζει πληθώρα χαρακτηριστικών εστιασμένων σε ανάλογες εφαρμογές. Συγκεκριμένα είναι ασύρματος οπότε διευκολύνει σε περιπτώσεις που χρειάζεται ο εξεταζόμενος να κινηθεί ή να βρίσκεται μακριά από τον υπολογιστή που καταγράφει τα σήματα. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε η έκδοση με τα 16 κανάλια καταγραφής με “ξηρά” ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια αυτά είναι ενσωματωμένα στο “καπέλο” μαζί με την κινητή μονάδα g.Nautilus. Στη μονάδα αυτή γίνεται η πρώτη συλλογή των βιοσημάτων με δειγματοληψία 250hz, η προεπεξεργασία τους και η ασύρματη μετάδοση τους στη “σταθερή” μονάδα g.NAutilus που συνδέεται μέσω USB με τον υπολογιστή καταγραφής και επεξεργασίας. Η ασύρματη μετάδοση των καταγραφών γίνεται μέσω

δίαυλου Bluetooth Low Energy με χρονική “καθυστέρηση” μικρότερη από 2 ms ώστε να διαφυλάσσεται ο συγχρονισμός μεταξύ οπτικού (η άλλου) ερεθίσματος (stimulus) και στη συλλογή του εγκεφαλικού σήματος (g.tec, 2020). Η χρήση ξηρών ηλεκτροδίων παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα στη συγκεκριμένη εφαρμογή γιατί βοηθάει στη γρήγορη προετοιμασία των συμμετεχόντων χωρίς τη χρήση υγρών gel. Η συσκευή αυτή έχει ενσωματωμένο επιταχυνσιόμετρο και γυροσκόπιο ώστε να προστεθούν αυτές η πληροφορίες στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 9 Η συσκευή απαγωγής εγκεφαλογραφημάτων g.Nautilus research

Η καταγραφή των EEG γίνεται στον υπολογιστή μέσω του λογισμικού MATLAB και του πακέτου SIMULINK ώστε τελικά να αποθηκευτούν στον υπολογιστή σε μορφή αρχείο τύπου .mat (βασικό τύπο αρχείων του MATLAB)

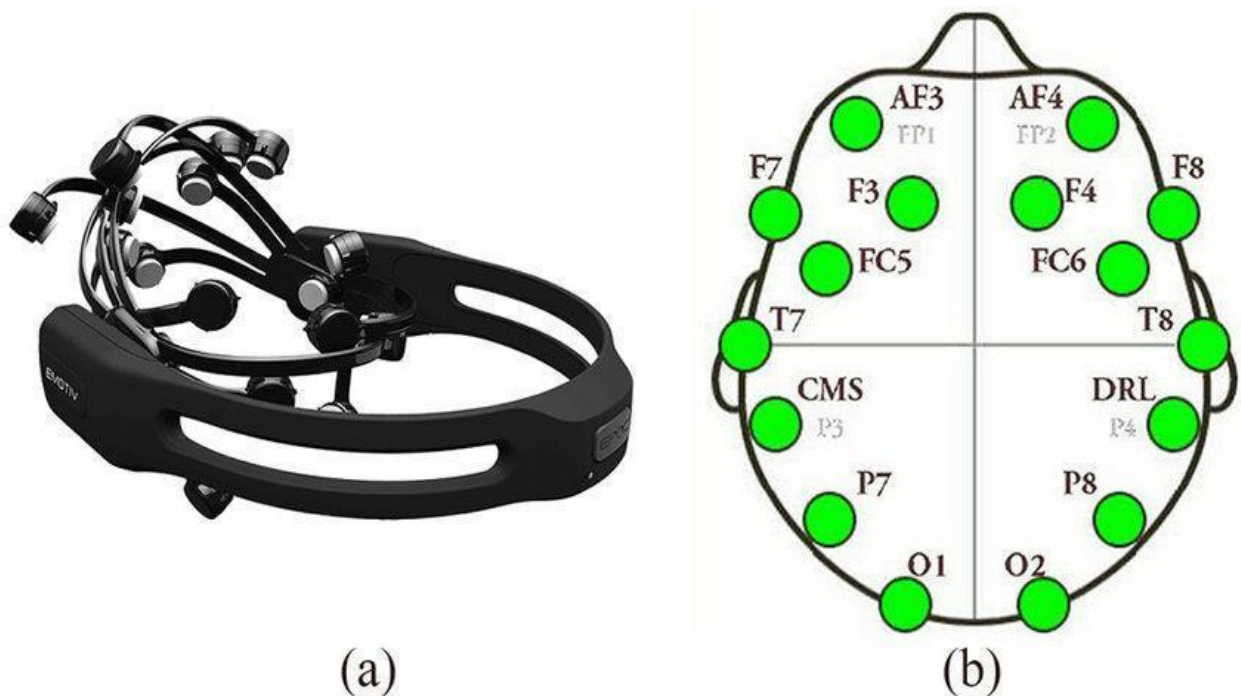
2.3.4 Ο εγκεφαλογράφοι της εταιρίας Emotiv.

Σε πιλοτική χρησιμοποιήθηκαν δύο ακόμα ηλεκτροεγκεφαλογράφοι χαμηλού κόστους της εταιρίας EMOTIV. Ο emotiv flex με 32 κανάλια και ο emotiv eroc με 14 κανάλια.



Σχήμα 10 Η συσκευή απαγωγής εγκεφαλογραφημάτων emotiv Flex

Ο ασύρματος εγκεφαλογράφος emotive flex όπως και ο emotiv Eroc εμφανίζονται συχνά στη βιβλιογραφία σε αρκετές έρευνες (Gramouseni et al., 2023).



Σχήμα 11 Η συσκευή απαγωγής εγκεφαλογραφημάτων emotiv Eroc

Οι Tsiara, Mikropoulos και Chalki (2019), μετά από μια συγκριτική μελέτη κατέληξαν ότι τα συστήματα χαμηλού κόστους όπως το EMOTIV έχουν πλεονεκτήματα στη χρηστικότητα και στη τιμή αλλά υστερούν σε ποιότητα σήματος σε σχέση με το G.tec που έχει σχεδιαστεί για ερευνητικούς σκοπούς. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή απορρίφθηκαν για την τελική μελέτη γιατί η χρήση του εγκεφαλογράφου GNautilus υπερτερεί σε ποιοτικό επίπεδο.

2.3.5 Ο αντιλαμβανόμενος γνωστικός φόρτος: το ερωτηματολόγιο NASA TLX .

Για τη συμπλήρωση των αντικειμενικών μετρήσεων EEG, χρησιμοποιήθηκε η κλίμακα NASA Task Load Index (NASA-TLX), προκειμένου να αποτυπωθεί ο αντιλαμβανόμενος γνωστικός φόρτος των συμμετεχόντων. Το NASA-TLX αποτελεί ένα πολυδιάστατο εργαλείο αυτοαναφοράς που αξιολογεί τον υποκειμενικό φόρτο εργασίας σε έξι διαστάσεις (Hart & Staveland, 1988, Κατσιρούμπα και συν., 2024)

- Νοητική απαίτηση: το επίπεδο γνωστικής δραστηριότητας που απαιτείται (σκέψη, απόφαση, μνήμη).
- Σωματική απαίτηση: το επίπεδο σωματικής προσπάθειας που απαιτείται.
- Χρονική πίεση: η αίσθηση πίεσης χρόνου κατά την εκτέλεση του έργου.
- Απόδοση: ο βαθμός επιτυχίας που αντιλαμβάνεται ο συμμετέχων στην ολοκλήρωση της εργασίας.
- Προσπάθεια: η συνολική προσπάθεια που απαιτείται για την επίτευξη της απόδοσης.
- Δυσανεμία/Απογοήτευση: ο βαθμός άγχους, ανασφάλειας ή εκνευρισμού που βιώνεται.

Κάθε διάσταση αποτιμάται μέσω οπτικής αναλογικής κλίμακας (0–100), με άγκυρες λεκτικές περιγραφές στα δύο άκρα (π.χ. «πολύ χαμηλό» – «πολύ υψηλό»). Οι συμμετέχοντες σημείωναν την απάντησή τους στη θέση που αντιπροσωπεύει καλύτερα την εμπειρία τους. Το NASA-TLX αναπτύχθηκε αρχικά τη δεκαετία του 1980 από τις Sandra Hart και Lowell Staveland στο NASA Ames Research Center, στο πλαίσιο ερευνών για την αεροπλοΐα και την ανθρώπινη απόδοση (Hart & Staveland, 1988).

Σκοπός του ήταν να παρέχει ένα τυποποιημένο μέσο αξιολόγησης του υποκειμενικού φόρτου εργασίας σε σύνθετα επιχειρησιακά περιβάλλοντα, όπως η πλοήγηση, ο έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας και οι υψηλού ρίσκου προσομοιώσεις. Έκτοτε, η NASA-TLX έχει εξελιχθεί σε ένα από τα πιο διαδεδομένα εργαλεία υποκειμενικής αξιολόγησης φόρτου, με εφαρμογές στην αεροπορία, την υγεία, τον στρατό, αλλά και στη μελέτη της αλληλεπίδρασης ανθρώπου–υπολογιστή και στις τεχνολογίες εμβύθισης (VR/AR).

Το ερωτηματολόγιο NASA-TLX αποτελεί την ψυχομετρική μέτρηση του γνωστικού φόρτου για τη σύγκριση (VR/AR) και η χρήση του στη συγκεκριμένη μελέτη βασίστηκε στην μεταφρασμένη

και σταθμισμένη έκδοση που προτάθηκε από τους Κατσιρούμπα και συν. (2024). Οι ερωτήσεις παρατίθενται στο πίνακα2.

Πίνακας 2 Πίνακας πρωτότυπης έκδοσης και ελληνικής μετάφρασης του NASA-TLX

Διάσταση	Ελληνική έκδοση	Πρωτότυπη αγγλική έκδοση
Νοητικό φορτίο	Πόσο απαιτητική είναι πνευματικά η εργασία σας;	How mentally demanding was the task?
Σωματικό φορτίο	Πόσο απαιτητική είναι σωματικά η εργασία σας;	How physically demanding was the task?
Χρονική πίεση	Πόσο σας πιέζει ο χρόνος στην εργασία σας;	How hurried or rushed was the pace of the task?
Απόδοση	Πόσο αποτελεσματικός/ή είστε στο να ολοκληρώνετε τις εργασίες που σας αναθέτουν;	How successful were you in accomplishing what you were asked to do?
Προσπάθεια	Πόσο σκληρά εργάζεστε για να ολοκληρώνετε τις εργασίες που σας αναθέτουν;	How hard did you have to work to accomplish your level of performance?
Δυσaréσκεια	Πόσο εκνευρισμένος/η, αγχωμένος/η και δυσαρεστημένος/η νιώθετε στην εργασία σας;	How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?

Questions Responses Settings

NASA-TLX μετά από Magic Leap

Παρακαλώ, βαθμολογήστε την απάντησή σας σε μια κλίμακα από 0 (καθόλου) έως 100 (πάρα πολύ)

Πόσο απαιτητική είναι πνευματικά η εργασία σας;
Short answer text

Πόσο απαιτητική είναι σωματικά η εργασία σας;
Short answer text

Πόσο σας πιέζει ο χρόνος στην εργασία σας;
Short answer text

Πόσο αποτελεσματικός(ή) είστε στο να ολοκληρώνετε τις εργασίες που σας αναθέτουν;
Short answer text

Πόσο σκληρά εργάζεστε για να ολοκληρώνετε τις εργασίες που σας αναθέτουν;
Short answer text

Πόσο εννευρισμένος(η), αγχωμένος(η) και δυσαρεστημένος(η) νιώθετε στην εργασία σας;
Short answer text

Σχήμα 12 Στιγμιότυπο της “ενσωμάτωσης” του ερωτηματολογίου σε διαδικτυακή μορφή

Το ερωτηματολόγιο Nasa TLX ενσωματώθηκε στη πλατφόρμα Google Forms και χρησιμοποιήθηκε για της ανάγκες του πειράματος όπως φαίνεται στο σχήμα 12.

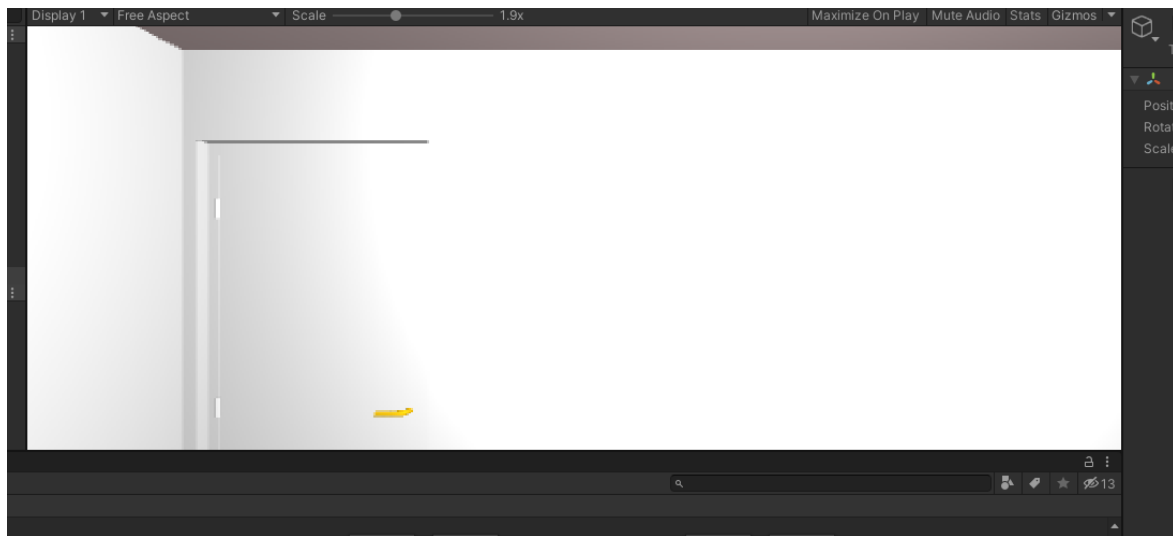
2.3.6 Το ψηφιακό περιβάλλον της μελέτης.

Για τις ανάγκες της μελέτης δημιουργήθηκε μία εκπαιδευτική εφαρμογή η οποία υλοποιήθηκε σε περιβάλλον εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας. Η εφαρμογή στηρίζεται στη προβολή συγκεκριμένου ψηφιακού αντικείμενο τρισδιάστατης εμψύχωσης (3d animation). Η σχεδιάσή έγινε στο λογισμικό UNITY σύμφωνα με τις αρχές της CMTL που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1.3.2. Η κεντρική ιδέα είναι να υπάρχουν τέσσερις εφαρμογές με αυξανόμενη πολυπλοκότητα η κάθε μία ώστε να προκαλούν μια διαβάθμιση στο γνωστικό φόρτο επηρεάζοντας το οπτικο-χωρικό μέρος της εργαζόμενης μνήμης και αναμένοντας τα ανάλογα αποτελέσματα τους δείκτες των ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων. Στο πρώτο τμήμα (G2,G3,G4,G5) εμφανίζεται κενό το δωμάτιο (σχήμα 13). Στο δεύτερο τμήμα της εφαρμογής (S1, διάρκεια 20 sec), εμφανίζονται σωματίδια σκόνης να αιωρούνται στο τρισδιάστατο χώρο(σχήμα 14). Στο τρίτο τμήμα (S2, 20 sec διάρκεια) της εφαρμογής, μαζί με τα προηγούμενα σωματίδια σκόνης, εμφανίζονται και σωματίδια «μούχλας» (σχήμα 15), παρουσιάζοντας μια πιο περίπλοκη κινούμενη εικόνα που κάνει την

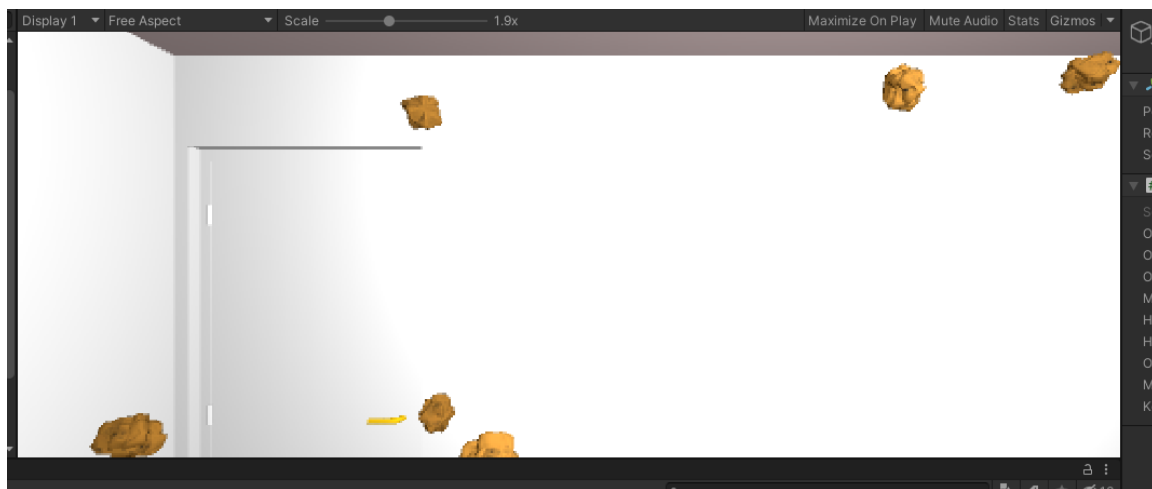
οπτική επεξεργασία πιο σύνθετη και επομένως πιο απαιτητική σε όρους γνωστικού φόρτου. Τέλος στο τέταρτο τμήμα της εφαρμογής, η περιπλοκότητα της προβολής αυξάνεται ακόμα πιο πολύ προσθέτοντας και αιωρούμενα ακάρεα προσκολλημένα σε σωματίδια σκόνης. Η διαδικασία παρουσιάζεται λεπτομερώς στο πίνακα 3.

Πίνακας 3 Περιγραφή της διαδικασίας του οπτικού ερεθίσματος (stimuli) του πειράματος.

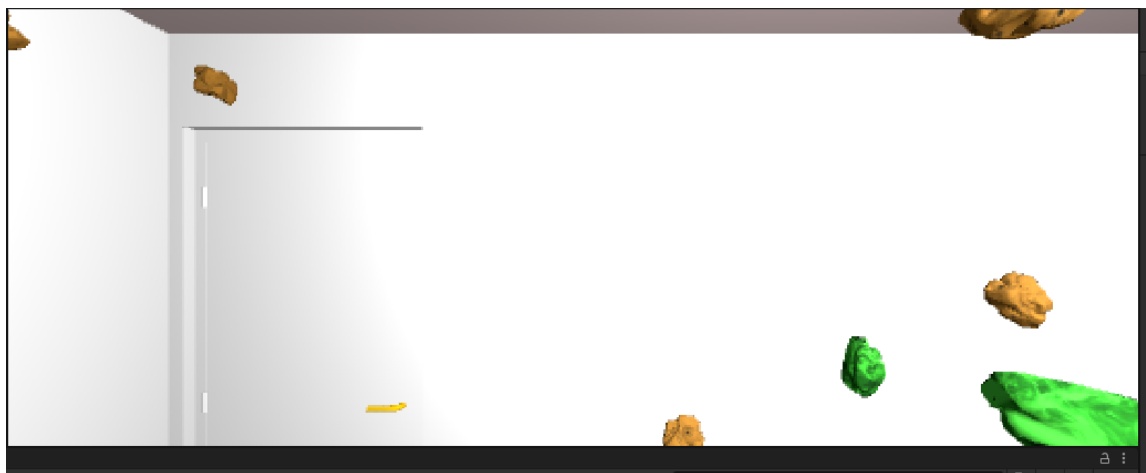
A/A	Τυπος	Μάτια	Σκοπός	Αναμενόμενα αποτελέσματα	(sec)	Κωδ. 1	Κωδ 2
1	Ηχητικό		Cue- Εντολή	Ακουστικό Ερέθισμα	2	A1	A1
2	Οπτικό)	Κλειστά	Baseline	Καταγραφή EEG “Υποβάθρου” (baseline)	60	G1	G1
3	Ηχητικό	-	Cue- Εντολή	Ακουστικό Ερέθισμα	2	A2	A2
4	Οπτικό	Ανοιχτά	Rest	Καταγραφή EEG “Ηρεμίας”	10	G2	S
5	Οπτικό	Ανοιχτά	Χαμηλό φορτίο	Καταγραφή EEG “Χαμηλού Γνωστικού Φόρτου”	20	S1	
6	Οπτικό	Ανοιχτά	Rest	Καταγραφή EEG “Ηρεμίας”	10	G3	
7	Οπτικό	Ανοιχτά	Μέσο φορτίο	Καταγραφή EEG “Μέσου Γνωστικού Φόρτου”	20	S2	
8	Οπτικό	Ανοιχτά	Rest	Καταγραφή EEG “Ηρεμίας”	10	G4	
9	Οπτικό	Ανοιχτά	Υψηλό φορτίο	Καταγραφή EEG “Υψηλού Γνωστικού Φόρτου”	20	S3	
10	Ηχητικό	-	Cue- Εντολή	Ακουστικό Ερέθισμα	2	A3	A3
11	Οπτικό	Κλειστά	Rest	Καταγραφή EEG “Ηρεμίας”	60	G5	G5



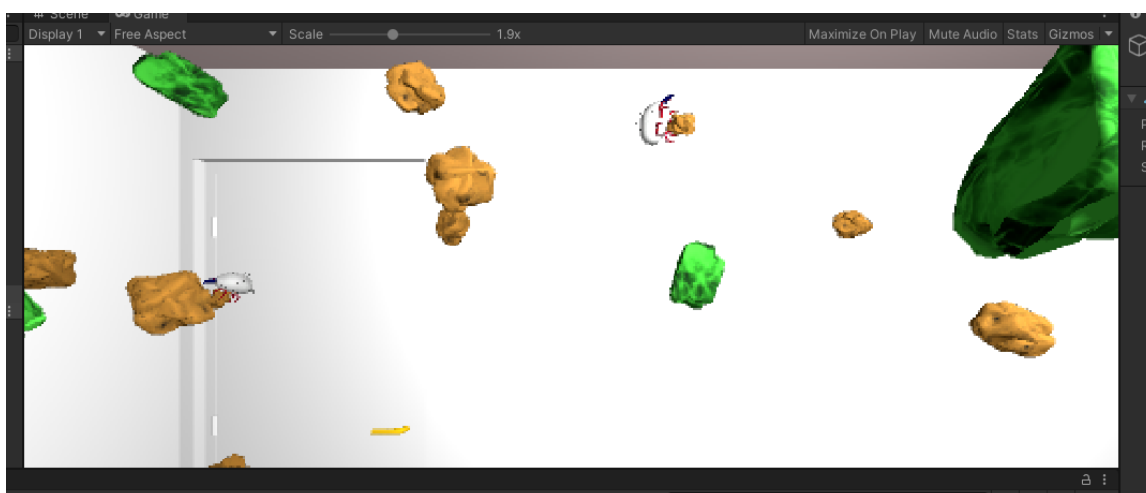
Σχήμα 13 Στιγμιότυπο της φάσης REST (Κωδικός G2,G3,G4,G5) του πειράματος



Σχήμα 14 Στιγμιότυπο της φάσης S1 του πειράματος



Σχήμα 15 Στιγμιότυπο της φάσης S2 του πειράματος



Σχήμα 16 Στιγμιότυπο της φάσης S3 του πειράματος

Μετά την καταγραφή ο συμμετέχοντας κατευθυνόταν εκτός του δωματίου καταγραφής για να συμπληρώσει το προσαρμοσμένο ερωτηματολόγιο NASA-TLX για την αντίστοιχη πλατφόρμα που χρησιμοποίησε (VR ή AR).

2.3.7 Η βιβλιοθήκη MNE-Python για την επεξεργασία των εγκεφαλογραφημάτων.

Η αρχική επεξεργασία και η ανάλυση των ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων έγινε με τη βιβλιοθήκη MNE της γλώσσας PYTHON. Η βιβλιοθήκη **MNE-Python** είναι ανοιχτού κώδικα εξειδικευμένη βιβλιοθήκη που έχει δημιουργηθεί για την επεξεργασία και ανάλυση ηλεκτροφυσιολογιών δεδομένων όπως EEG, MEG, iEEG, και fNIRS (Gramfort et al., 2013, 2014).

Παρέχει όλα τα αναγκαία “εργαλεία” για την ανάγνωση, αποκωδικοποίηση, επεξεργασία, στατιστική ανάλυση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των βιομετρικών μετρήσεων.

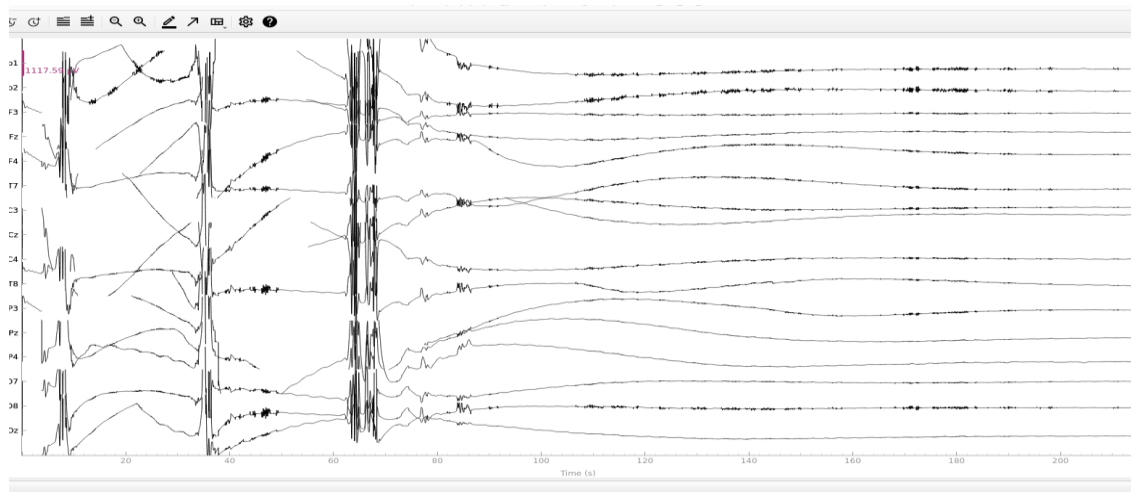
Η βιβλιοθήκη αυτή άρχισε να χρησιμοποιείται στη δεκαετία του 2000 με την ανάπτυξη της MNE-C, ενός εργαλείου γραμμένο σε γλώσσα C για την επεξεργασία σημάτων μαγνητοεγκεφαλογραφημάτων (MEG) και εγκεφαλογραφημάτων (EEG) από το ερευνητικό κέντρο **Martinos Center for Biomedical Imaging**. Στη συνέχεια εξελίχθηκε από τον Alexandre Gramfort και τους συνεργάτες του για να χρησιμοποιήσει τις βασικές βιβλιοθήκες της PYTHON (NumPy, SciPy, Matplotlib). Από την πρώτη έκδοση (Gramfort et al., 2013), η MNE-Python έχει γίνει ένα από τα πιο χρησιμοποιούμενα “εργαλεία” ανάλυσης EEG/MEG.

Στα πλεονεκτήματα της χρήσης της MNE θα μπορούσε να αναφερθεί η ανοιχτή της χρήση, η δυνατότητα εισαγωγής και εξαγωγής πολλαπλών διαφορετικών πρωτοκόλλων δεδομένων και αρχείων EEG (π.χ. BrainVision, EDF, BDF, MATLAB,). Η εύκολη χρήση και εφαρμογή φίλτρων και διαδικασιών εκκαθάρισης τεχνουργημάτων και άλλα. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή των αρχείων.mat σε .fif (βασικός τύπος αρχείων στο MNE), στο φιλτράρισμα και στη τμηματοποίηση καθώς και στη φασματική ανάλυση (psd) και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Οι διαδικασίες και οι κώδικες περιγράφονται σε επόμενη ενότητα.

2.3.7.1 Μετατροπή των αρχείων καταγραφής από του g.Nautilus.

Για την καταγραφή ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος (EEG) χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι αρχείων, οι οποίοι εξυπηρετούν ποικίλους σκοπούς στην επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων. Τα πρωτογενή αρχεία προέρχονται απευθείας από τον εγκεφαλογράφο και περιέχουν τα ακατέργαστα σήματα (raw data) μαζί με πληροφορίες για τα ηλεκτρόδια, τη συχνότητα δειγματοληψίας και το είδος της μελέτης που λαμβάνει χώρα. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται σε τυποποιημένες μορφές, όπως το αρχείο .edf (European Data Format), που χρησιμοποιείται στις συσκευές της EMOTIV ή το .bdf (BioSemi Data Format), που επιτρέπουν

τη συμβατότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων. Άλλη διαδεδομένη μορφή είναι τα αρχεία .fif (Functional Imaging Format) που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό MNE και περιλαμβάνουν τόσο σήματα όσο και μεταδεδομένα από τον πειραματικό σχεδιασμό. Επιπλέον, συναντώνται αρχεία τύπου .mat (MATLAB format), τα οποία διευκολύνουν την επεξεργασία μέσω μαθηματικών εργαλείων, και αρχεία .set ή .vhdr/.eeg/.vmrk, που είναι τυπικά στο πακέτο EEGLAB. Το EEGLAB είναι ένα toolkit (ευρέως χρησιμοποιούμενο) σχεδιασμένο να λειτουργεί με το MATLAB για την επεξεργασία ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων. Στο συγκεκριμένο πείραμα τα δεδομένα από το gNautilus πρέπει να μετατραπούν από την μορφή .mat στη μορφή .fif που χρησιμοποιείται από το MNE-PYTHON. Η διαδικασία αυτή γίνεται με τον κώδικα `mat2fif.py` που παρατίθεται στο παράρτημα. Βασικό σημείο του κώδικα είναι ότι θα πρέπει ο χρήστης να ενσωματώσει και την πληροφορία για την ονοματοδοσία των ηλεκτροδίων καθώς και τεχνικές παραμέτρους όπως η ευαισθησία του ενισχυτή βιοσημάτων ($\pm 750\text{mV}$) και τυχόν hardware φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν στο στάδιο της προεπεξεργασίας. Στην κατάσταση αυτή τα σήματα περιέχουν αρκετό θόρυβο και χρήζουν περαιτέρω επεξεργασίας και εφαρμογής φίλτρων. Στην εικόνα 17 φαίνεται η κατάσταση ενός δείγματος μετά την εφαρμογή του `mat2fif.py`.

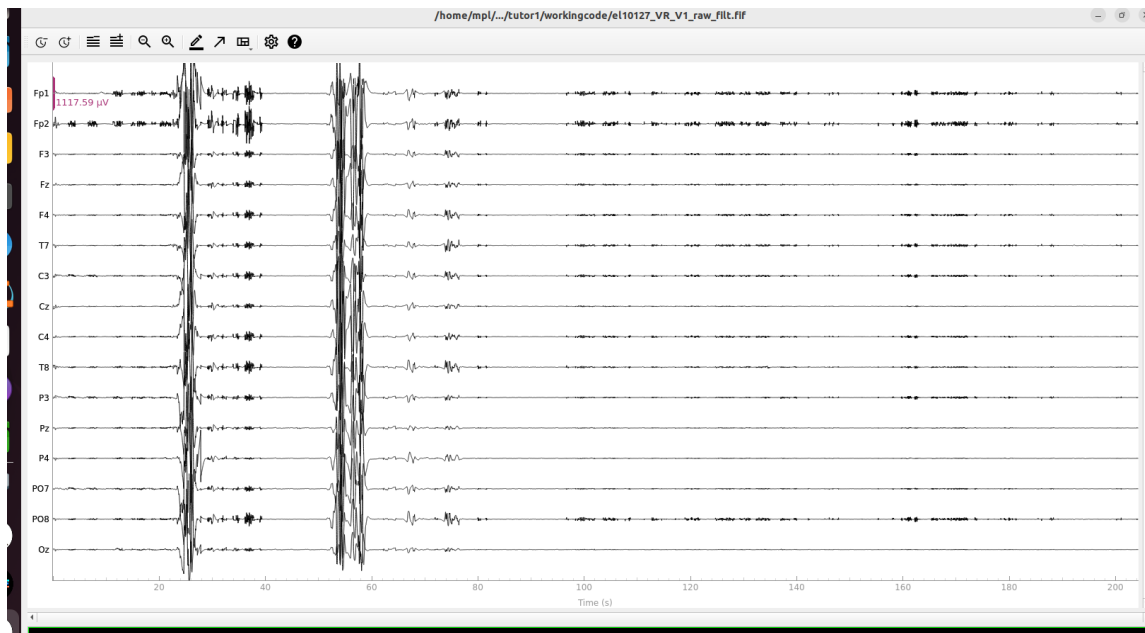


Σχήμα 17 Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα τυχαίου δείγματος χωρίς κάποια επεξεργασία (raw)

2.3.7.2 Η επεξεργασία των εγκεφαλογραφημάτων

Στη συνέχεια εφαρμόζεται το πρόγραμμα `filter_eeg.py` που περιορίζει το φάσμα συχνοτήτων μεταξύ 1Hz και 45Hz. Η διαδικασία της εφαρμογής φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (με συχνότητα αποκοπής 1Hz) χρησιμοποιείται κατά κόρον στην επεξεργασία ιατρικού σήματος για

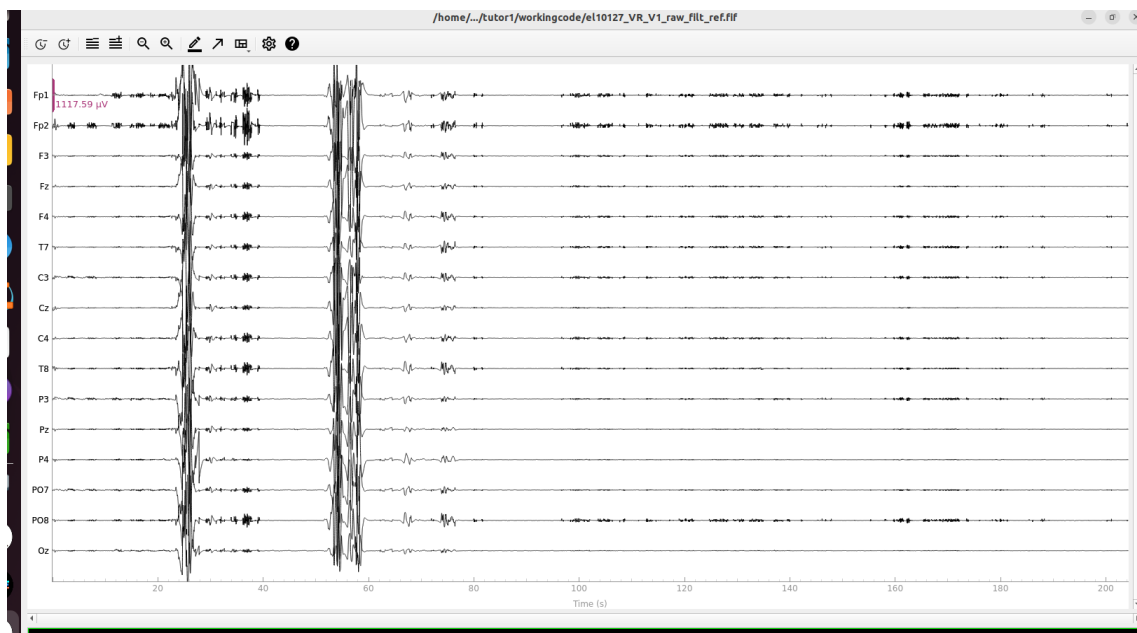
να αφαιρεθούν οι συνεχείς συνιστώσες του σήματος. Αντιστοίχως το φίλτρο αποκοπής υψηλών συχνοτήτων (πάνω από τη συχνότητα αποκοπής που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι στα 45 Hz) χρησιμοποιείται για να αποκόψει της συχνότητες που δεν χρειάζονται αφού οι εγκεφαλικοί ρυθμοί που μελετώνται βρίσκονται σε συχνότητες μικρότερες των 45 Hz. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται από το MNE είναι ψηφιακά τύπου FIR (Finite Impulse Response). Πρώτα απ' όλα μπορούν να έχουν γραμμική φάση, πράγμα που σημαίνει ότι δεν παραμορφώνουν το σήμα στον χρόνο. Είναι πάντα σταθερά, γιατί δεν περιέχουν αναδρομικούς βρόχους (feedback). Δίνουν πολύ καλό έλεγχο στην απόκριση συχνότητας, με σαφή όρια μεταξύ passband και stopband. Ο σχεδιασμός τους είναι σχετικά απλός και καλά μελετημένος στη θεωρία σημάτων. Για EEG δεδομένα θεωρούνται ιδανικά, αφού προστατεύουν τη χρονική πληροφορία που είναι κρίσιμη.



Σχήμα 18 Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα τυχαίου δείγματος μετά την εφαρμογή φίλτρων.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο κώδικας **ref_eeg.py** του παραρτήματος, ο οποίος υλοποιεί τη μέθοδο average reference. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται εκτενώς στην ανάλυση ηλεκτροεγκεφαλογραφημάτων, καθώς παρέχει έναν ουδέτερο και ισορροπημένο τρόπο αναφοράς για όλα τα κανάλια. Συγκεκριμένα, σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται ο μέσος όρος του σήματος από όλα τα ηλεκτρόδια και αφαιρείται από κάθε κανάλι ξεχωριστά. Με τον τρόπο αυτόν,

το κάθε ηλεκτρόδιο εκφράζεται πλέον ως η απόκλιση του από τον συνολικό μέσο όρο, γεγονός που επιτρέπει την καλύτερη απομόνωση των σχετικών εγκεφαλικών δραστηριοτήτων. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι συμβάλλει στη μείωση του κοινού θορύβου που εμφανίζεται σε όλα τα κανάλια, όπως ηλεκτρικές παρεμβολές ή γενικευμένα μυϊκά τεχνουργήματα. Έτσι, τα δεδομένα αποκτούν μεγαλύτερη καθαρότητα, διευκολύνοντας την ανίχνευση των πραγματικών εγκεφαλικών ρυθμών. Παράλληλα, η χρήση average reference εξισορροπεί τις αποκλίσεις μεταξύ διαφορετικών ηλεκτροδίων, προσφέροντας μία πιο ομοιόμορφη και συγκρίσιμη βάση για τη στατιστική ανάλυση.



Σχήμα 19 Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα τυχαίου δείγματος μετά την αφαίρεση μέσου όρου σήματος.

Το επόμενο στάδιο στην επεξεργασία των εγκεφαλογραφικών σημάτων ήταν η τμηματοποίηση και προσεκτική επιλογή του τμήματος της βασικής δραστηριότητας (BASELINE) και της δραστηριότητας (TASK). Για την επιλογή της βασικής δραστηριότητας επιλέχθηκε μέρος του σήματος όπου ο/η συμμετέχων/ουσα είχε κλειστά μάτια για 60 δευτερόλεπτα πριν την παρουσίαση της ψηφιακής εφαρμογής. Αντίστοιχα για την επιλογή της δραστηριότητας ελέγχου (TASK),

επιλέχθηκε μέρος της καταγραφής όπου ο/η συμμετέχων/ουσα είχε ανοιχτά μάτια και έβλεπε την ψηφιακή εφαρμογή και τα εικονικά σωματίδια να κυκλοφορούν γύρω του.

2.3.7.2 Η φασματική ανάλυση των εγκεφαλογραφημάτων.

Στη συνέχεια στα αρχεία .fif που έγινε η προεπεξεργασία, εφαρμόζεται η φασματική μελέτη μέσω του κώδικα psd.py του παραρτήματος. Με τον κώδικα αυτό η βιβλιοθήκη MNE υπολογίζει τις φασματικές πυκνότητες για κάθε ζώνη συχνοτήτων (delta 1-4Hz, theta 4-7Hz, alpha 8-12Hz, beta 13-30Hz, gamma 30-45Hz) και αποθηκεύει όλα σε αρχείο csv. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη φασματική ανάλυση είναι η μέθοδος welsh που τεμαχίζει το αρχικό σήμα σε επικαλυπτόμενα μικρότερα (μήκους 1024 δείγματα) και εφαρμόζει μετασχηματισμό Fourier με μήκος 2048 σημεία και με επικάλυψη 50%. Μετά τη φασματική ανάλυση του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος στις επιλεγμένες περιοχές συχνοτήτων (θήτα και άλφα), προκύπτει μια ολοκληρωμένη εικόνα της απόλυτης και σχετικής ισχύος κάθε εγκεφαλικού ρυθμού. Η απόλυτη ισχύς (absolute power) αντιπροσωπεύει το συνολικό επίπεδο ενεργοποίησης ενός ρυθμού σε συγκεκριμένη περιοχή, ενώ η σχετική ισχύς (relative power) εκφράζει τη συνεισφορά της κάθε ζώνης στη συνολική φασματική ενέργεια, επιτρέποντας τη σύγκριση μεταξύ περιοχών ή συνθηκών (π.χ. AR έναντι VR).

Κεφάλαιο 3ο Αποτελέσματα

3.1 Επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων

Στο παρακάτω πίνακα 20 συνοψίζονται τα αποτελέσματα του psd.py εφαρμοσμένα σε έναν από τους συμμετέχοντες.

Πίνακας 4 Σχετική Ισχύς Ζωνών ανά Ηλεκτρόδιο για τυχαίο συμμετέχοντα

	δ (σχετ)	θ (σχετ)	α (σχετ)	β (σχετ)	γ (σχετ)
FP1	0.9353	0.0410	0.0090	0.0062	0.0004
FP2	0.7500	0.1624	0.0407	0.0179	0.0015
F3	0.8424	0.0704	0.0349	0.0330	0.0023
Fz	0.8081	0.1068	0.0365	0.0279	0.0011
F4	0.6531	0.1374	0.0722	0.0927	0.0065
T7	0.9627	0.0276	0.0037	0.0035	0.0003
T8	0.9067	0.0484	0.0166	0.0191	0.0011
C3	0.7993	0.0997	0.0362	0.0398	0.0025
Cz	0.8510	0.0747	0.0270	0.0270	0.0016
C4	0.7651	0.0759	0.0535	0.0758	0.0062
P3	0.9295	0.0354	0.0100	0.0159	0.0015
Pz	0.7246	0.1153	0.0529	0.0753	0.0043
P4	0.8600	0.0696	0.0249	0.0326	0.0018
PO7	0.9330	0.0463	0.0086	0.0049	0.0006
PO8	0.9170	0.0413	0.0134	0.0138	0.0009
Oz	0.8811	0.0664	0.0194	0.0212	0.0008

Στη συνέχεια εξετάστηκαν οι ισχύεις στις περιοχές συχνοτήτων *άλφα* και *θήτα*.

Αρχικά υπολογίστηκε η απολυτή ισχύς για τις ζώνες *άλφα* και *θήτα*.

***P(alpha)*: απολυτη ισχυς της ζωνης συχνοτητων αλφα(8 – 12Hz). (1)**

***P(theta)*: απολυτη ισχυς της ζωνης συχνοτητων θητα(4 – 7Hz).(2)**

***P(total)*: απολυτη ισχυς της ζωνης συχνοτητων (1 – 45Hz). (3)**

Στη συνέχεια οι σχετικές ισχύεις διαιρώντας δια ***P(total)*** .

$$P(alpha)\sigma\chi = \frac{P(alpha)}{P(total)} \text{ (4) και } P(theta)\sigma\chi = \frac{P(theta)}{P(total)} \text{ (5)}$$

Αυτό έγινε για το αρχείο TASK αλλά και για το REST αλλά και για τις συνθήκες και VR/AR.

Έτσι σχηματίστηκαν τα παρακάτω μεγέθη.

$$P(alpha)\sigma\chi(TASK)(VR) = \frac{P(alpha)(TASK)(VR)}{P(total)(TASK)(VR)} \text{ (6)}$$

$$P(theta)\sigma\chi(TASK)(VR) = \frac{P(theta)(TASK)(VR)}{P(total)(TASK)(VR)} \text{ (7)}$$

$$P(alpha)\sigma\chi(REST)(VR) = \frac{P(alpha)(REST)(VR)}{P(total)(REST)(VR)} \text{ (8)}$$

$$P(theta)\sigma\chi(REST)(VR) = \frac{P(theta)(REST)(VR)}{P(total)(REST)(VR)} \text{ (9)}$$

$$P(alpha)\sigma\chi(TASK)(AR) = \frac{P(alpha)(TASK)(AR)}{P(total)(TASK)(AR)} \text{ (10)}$$

$$P(theta)\sigma\chi(TASK)(AR) = \frac{P(theta)(TASK)(AR)}{P(total)(TASK)(AR)} \text{ (11)}$$

$$P(alpha)\sigma\chi(REST)(AR) = \frac{P(alpha)(REST)(AR)}{P(total)(REST)(AR)} \text{ (12)}$$

$$P(theta)\sigma\chi(REST)(AR) = \frac{P(theta)(REST)(AR)}{P(total)(REST)(AR)} \text{ (13)}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζεται η διαφορά της ισχύος στη κατάσταση εργασίας(TASK) μείον την ισχύ στη κατάσταση ηρεμίας(REST) για κάθε συνθήκη(VR/AR) και κάθε ηλεκτρόδιο.

$$(6),(8) \Rightarrow \Delta(alpha)VR = P(alpha)\sigma\chi(TASK)(VR)-P(alpha)\sigma\chi(REST)(VR) \text{ (14)}$$

$$(7),(9) \Rightarrow \Delta(theta)VR = P(theta)\sigma\chi(TASK)(VR)-P(theta)\sigma\chi(REST)(VR) \text{ (15)}$$

$$(10),(12) \Rightarrow \Delta(alpha)AR = P(alpha)\sigma\chi(TASK)(AR)-P(alpha)\sigma\chi(REST)(AR) \text{ (16)}$$

$$(11),(13) \Rightarrow \Delta(theta)AR = P(theta)\sigma\chi(TASK)(AR)-P(theta)\sigma\chi(REST)(AR) \text{ (17)}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος ορός των διαφορών (14,15,16,17) για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος (Frontal, Central, Temporal, Parietal, Occipital). Τέλος, υπολογίζεται ο λόγος TAR(theta/alpha ratio), θήτα προς άλφα για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος.

$$TAR(VR) = \frac{\Delta(\theta)_{VR}}{\Delta(\alpha)_{VR}}(18)$$

$$TAR(AR) = \frac{\Delta(\theta)_{AR}}{\Delta(\alpha)_{AR}}(19)$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Εικόνα 1 Τα αποτελέσματα για όλους τους συμμετέχοντες για Θ/Α

	Frontal		Central		Temporal		Parietal		Occipital	
	AR	VR	AR	VR	AR	VR	AR	VR	AR	VR
sub1	2.675	2.393	3.275	3.240	8.309	1.230	-0.355	3.527	-3.424	8.371
sub2	2.051	2.335	2.675	2.342	-3.911	2.347	2.211	2.227	1.944	2.364
sub3	-2.396	2.987	1.851	1.163	0.254	-45.487	2.130	2.747	-0.695	1.544
sub4	2.270	0.463	1.670	0.849	2.587	1.339	2.353	1.491	1.441	0.095
sub5	1.174	4.333	1.482	3.046	1.825	4.077	1.669	4.597	0.255	0.904
sub6	-14.900	1.708	0.477	1.456	2.213	1.436	0.287	1.448	-101.825	1.445
sub7	0.719	12.727	0.818	5.791	0.980	3.705	2.261	47.328	0.910	-1.990
sub8	1.213	0.068	0.783	0.721	0.928	3.109	1.857	-0.175	4.054	0.399
sub9	0.720	3.653	0.706	2.574	1.917	2.709	0.859	2.965	1.727	-4.149
sub10	0.471	-12.692	1.002	17.278	0.228	0.136	1.255	40.858	1.103	2.782
sub11	4.691	-4.317	3.254	-12.038	4.168	-0.414	4.491	-3.485	3.232	-0.338
sub12	7.622	-0.024	-0.326	-0.469	1.431	12.195	0.006	-0.672	-0.518	0.970
sub13	1.082	3.195	0.634	3.815	1.345	3.058	0.693	3.625	1.014	3.070
sub14	1.126	6.005	0.251	4.510	0.769	-10.924	0.412	19.583	0.147	-0.056

Στο παραπάνω πίνακα παρατηρούνται αρνητικές τιμές γεγονός που προκύπτει από τις εξισώσεις 14,15,16 και 17.

Στη συνέχεια έγινε έλεγχος κανονικότητας για τις διάφορες AR-VR με το κριτήριο Kolmogorov-Smirnov και Shapiro-Wilk στο SPSS

Πίνακας 1 Αποτελέσματα ελέγχου κανονικότητας στις μετρήσεις των εγκεφαλογραφημάτων.

Μέγεθος	Kolmogorov-Smirnov		Shapiro-Wilk	
	Δείγματα	p-value	Δείγματα	p-value
Frontal	14	.200	14	.867
Central	14	<.001	14	.004
Temporal	14	.006	14	<.001
Parietal	14	<.001	14	<.001
Occipital	14	<.001	14	<.001

Όπως φαίνεται από το παραπάνω πίνακα μόνο οι μέσοι όροι της frontal περιοχής έχουν κανονική κατανομή και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί t-test. Οπότε χρησιμοποιήθηκε το Wilcoxon signed-rank test για κάθε περιοχή.

Τα αποτελέσματα στον παρακάτω πίνακα 5.

Πίνακας 5 Αποτελέσματα του τεστ σύγκρισης μέσων Wilcoxon για VR vs AR

ROI	Test	N	p-value	Συμπέρασμα
Frontal	Wilcoxon	14	0,510	Μη σημαντικό
Central	Wilcoxon	14	0,245	Μη σημαντικό
Temporal	Wilcoxon	14	0,925	Μη σημαντικό
Parietal	Wilcoxon	14	0,074	Τάση (VR > AR)
Occipital	Wilcoxon	14	0,730	Μη σημαντικό

Τα αποτελέσματα των τεστ σύγκρισης μέσων όρων δείχνουν ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στα δύο περιβάλλοντα (AR/VR) εκτός από την βρεγματική περιοχή (Parietal) όπου φαίνεται το VR να προκαλεί μεγαλύτερο γνωστικό φόρτο (και σε αυτή τη περίπτωση μη στατιστικά σημαντικό). Το επόμενο στάδιο της στατιστικής ανάλυσης έχει να κάνει με τα δεδομένα από το ερωτηματολόγιο Nasa TLX που φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 6 Πίνακας Αποτελεσμάτων Nasa-TLX για όλους τους συμμετέχοντες.

	Νοητική(1)		Σωματική(2)		Χρονική (3)		Απόδοση		Προσπάθεια		Απογοήτευση	
subject	AR	VR	AR	VR	AR	VR	AR	VR	AR	VR	AR	VR
sub1	10	10	0	10	10	40	50	60	60	40	40	50
sub2	20	5	10	0	10	10	100	50	80	90	50	10
sub3	10	10	0	20	60	0	50	90	70	71	40	0
sub4	80	30	60	10	50	40	90	80	85	80	100	40
sub5	0	5	0	0	1	1	90	90	85	90	40	40
sub6	50	80	20	60	20	50	60	95	65	70	30	85
sub7	10	0	0	0	0	0	0	100	80	90	100	0
sub8	2	5	1	0	3	10	99	50	30	60	1	10
sub9	0	8	0	1	0	5	100	95	40	50	0	5
sub10	0	0	0	0	0	0	10	10	10	60	1	0
sub11	80	50	15	10	50	30	90	90	80	80	40	30
sub12	50	85	0	85	0	20	60	80	100	85	0	15
sub13	10	40	10	10	40	50	70	70	100	100	40	20
sub14	36	27	53	47	57	68	92	92	94	93	50	54

Πίνακας 7 Μέσοι όροι Nasa-tlx για AR Και VR για όλους τους συμμετέχοντες

	Νοητική Απαίτηση 1	Σωματική Απαίτηση 2	Χρονική Απαίτηση 3	Απόδοση 4	Προσπάθεια 5	Απογοήτευση 6
AR	27.533	14.933	24.067	69.733	69.928	35.467
VR	27.667	17.533	21.600	76.800	75.642	23.933

Πίνακας 8 Ο έλεγχος κανονικότητας των κατανομών για τα ερωτηματολόγια Nasa-TLX

Μέγεθος	Kolmogorov-Smirnov		Shapiro-Wilk	
	Δείγματα	p-value	Δείγματα	p-value
Ερώτηση 1	14	.200	14	.449
Ερώτηση 2	14	<.004	14	.008
Ερώτηση 3	14	.013	14	<.030
Ερώτηση 4	14	<.086	14	<.061
Ερώτηση 5	14	<.003	14	<.022
Ερώτηση 6	14	.187	14	.291

Όπως φαίνεται από το παραπάνω πίνακα δεν υπάρχουν κανονικές κατανομές σε όλες τις διαστάσεις του ερωτηματολογίου οπότε για τον έλεγχο μέσων όρων θα χρησιμοποιηθεί πάλι η μέθοδος Wilcoxon signed-rank.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον επόμενο πίνακα (πίνακας 11).

Πίνακας 9 Αποτελέσματα ερωτηματολογίου NASA-TLX (AR vs VR)

Διάσταση	Τεστ	p-value	Αποτέλεσμα
Νοητική Απαίτηση	Wilcoxon	.929	Μη σημαντικό
Σωματική Απαίτηση	Wilcoxon	.646	Μη σημαντικό
Χρονική Απαίτηση	Wilcoxon	.444	Μη σημαντικό
Απόδοση	Wilcoxon	.635	Μη σημαντικό
Προσπάθεια	Wilcoxon	.254	Μη σημαντικό
Απογοήτευση	Wilcoxon	.363	Μη σημαντικό

Κεφάλαιο 4^ο Συμπεράσματα- Συζήτηση

4.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της μελέτης ήταν ο προσδιορισμός του γνωστικού φόρτου δυο διαφορετικών περιβαλλόντων εμβύθισης με εγκεφαλογραφικές τεχνικές (HEΓ) και με μεθόδους αυτοαναφοράς (ερωτηματολόγιο NASA-TLX).

Ενδιαφέρον εύρημα της παρούσας μελέτης αποτελεί η διαφοροποίηση των ηλεκτροεγκεφαλικών σημάτων μεταξύ των δύο περιβαλλόντων AR και VR στο βρεγματικό λοβό, όπου παρατηρήθηκαν υψηλότερες τιμές λόγου TAR (θ/α) στη εικονική πραγματικότητα. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι η VR επιβαρύνει περισσότερο τις οπτικοχωρικές διεργασίες που εντοπίζονται στον βρεγματικό λοβό, πιθανόν λόγω της ανάγκης πλήρους προσανατολισμού και πλοήγησης σε ένα εικονικό περιβάλλον. Αντίθετα, η AR ενσωματώνει τις ψηφιακές πληροφορίες στο πραγματικό κόσμο, μειώνοντας ενδεχομένως την «καταστολή» της ζώνης άλφα στη περιοχή.

Το εύρημα αυτό συμπληρώνει τη μελέτη των Chikhi et al. (2022), η οποία αναγνώρισε τη μείωση της βρεγματικής δραστηριότητας άλφα ως αξιόπιστο δείκτη γνωστικού φόρτου, χωρίς ωστόσο να εξετάσει διαφορές μεταξύ τεχνολογιών εμβύθισης. Η συμβολή της παρούσας μελέτης έγκειται στην ανάδειξη ότι η VR οδηγεί σε ισχυρότερη βρεγματική «καταστολή άλφα» (alpha suppression) σε σχέση με την AR, γεγονός που καταδεικνύει τις διαφοροποιήσεις των δύο μέσων σε όρους νευροφυσιολογικής επιβάρυνσης.

Η επιλογή να υπολογιστεί ο δείκτης (θ/α) (TAR) μετά από αφαίρεση της γραμμής βάσης ακολουθεί προηγούμενες μελέτες που έχουν προτείνει αντίστοιχες μεθοδολογίες για την εκτίμηση του γνωστικού φόρτου. Συγκεκριμένα, οι Holm, Lukander, Korpela, Sallinen και Müller (2009) εισήγαγαν τον δείκτη Cognitive Load Index (CLI), ο οποίος βασίζεται στον λόγο της μετωπιαίας δραστηριότητας θήτα (F_z) προς τη βρεγματική άλφα (P_z). Στην ανάλυσή τους, τα δεδομένα EEG συγκρίθηκαν με τιμές αναφοράς (baseline condition), ώστε να αποτυπώνονται οι σχετικές μεταβολές κατά την εκτέλεση γνωστικά απαιτητικών εργασιών. Οι συγγραφείς έδειξαν ότι το CLI αυξάνεται συστηματικά με την αύξηση των γνωστικών απαιτήσεων και με το χρόνο αφύπνισης, ενώ η χρήση baseline correction βελτίωσε την ευαισθησία του δείκτη. Έτσι, η παρούσα εργασία υιοθέτησε την ίδια λογική, υπολογίζοντας το TAR σε σχέση με την περίοδο ηρεμίας (REST), ώστε

να αναδειχθούν οι σχετικές αλλαγές στην εγκεφαλική δραστηριότητα μεταξύ AR και VR συνθηκών.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των ερωτηματολογίων NASA-TLX φαίνεται ότι δεν παρουσιάζεται στατιστικά σημαντική διαφορά στη χρήση των δύο τεχνολογιών εμβύθισης (AR/VR). Από τις τιμές που παρουσιάζονται στο Πίνακα 9 (σελίδα 52) και απεικονίζουν τα αποτελέσματα των ελέγχων κατά Wilcoxon για συζευγμένα δείγματα τα *p. values* είναι μεγαλύτερα από το στατιστικό όριο των 0.05 αν και δεν απέχουν πάρα πολύ. Παρότι οι περισσότερες υποκλίμακες του NASA-TLX δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές μεταξύ AR και VR, η υποκλίμακα της προσπάθειας εμφάνισε μια τάση διαφοροποίησης ($p = .254$), η οποία ωστόσο δεν ήταν στατιστικά σημαντική. Το εύρημα αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως ένδειξη ότι οι συμμετέχοντες ενδεχομένως αντιλαμβάνονταν την εκτέλεση της δραστηριότητας στη VR ως ελαφρώς πιο απαιτητική σε σχέση με την AR, χωρίς όμως το αποτέλεσμα να είναι αρκετά «ισχυρό» ώστε να θεωρηθεί στατιστικά τεκμηριωμένο. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων οι περισσότεροι συμμετέχοντες έδειξαν μια “προτίμηση” στη χρήση της τεχνολογίας εμβάθυνσης AR ως προς την ευκολία χρήσης. Αυτό θα μπορούσε να συνδυαστεί με την τάση στα στατιστικά των δειγμάτων Nasa TLX, και ενδεχομένως να ερμηνεύεται με την δυσκολία που παρουσιάζει η συσκευή VR (Oculus) που είναι βαριά και προκαλεί ελαφριά δυσφορία στη κεφαλή όταν συνδυάζεται με τα ξηρά ηλεκτρόδια του g.Nautilus. Η συσκευή AR (Magic Leap2) φάνηκε ότι είναι αρκετά πιο «άνετη στη χρήση».

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα, θα μπορούσε να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η επαυξημένη πραγματικότητα υπερτερεί ελαφρώς της εικονικής πραγματικότητας στο επίπεδο της επιβάρυνσης της εργαζόμενης μνήμης αλλά και στο επίπεδό της ευκολίας στη χρήση. Αυτά τα συμπεράσματα όμως είναι εξαρτώμενα από την τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα. Μια μικρή αναβάθμιση στις φυσικές παραμέτρους των συσκευών (βάρος, δυσκολία στήριξης) είτε μια ανάλογα μικρή αναβάθμιση στο λογισμικό (αληθοφάνεια γραφικών κλπ.) μπορεί εύκολα να αλλάξει τους συσχετισμούς.

Επίσης, θα μπορούσε να αναφερθεί ότι οι ποιοτικές μέθοδοι με ερωτηματολόγια (όπως το NASA TLX) μπορούν να συνδυαστούν με καθαρά νευροφυσιολογικές μετρήσεις (EEG) για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετιζόμενων με θεωρίες εκπαιδευτικής και γνωστικής ψυχολογίας όπως η

θεωρία του γνωστικού φόρτου(CLT). Η πολύπλευρη αυτή προσέγγιση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ενδεχομένως για αξιολόγηση εκπαιδευτικών ψηφιακών περιβαλλόντων.

4.2 Μελλοντική έρευνα

Ως μελλοντικές προτάσεις προτείνονται:

α. ως προς τις ηλεκτροεγκεφαλικές μετρήσεις:

- Περαιτέρω καθαρισμός και επεξεργασία των σημάτων EEG και με πιο προηγμένα εργαλεία.
- Έλεγχος της φασματικής μελέτης και σε υπόλοιπες ζώνες συχνοτήτων.
- Έλεγχος με πιο εξελιγμένες μεθόδους μηχανικής μάθησης για την εξαγωγή ευρημάτων από την μεταβαλλόμενη αύξηση του γνωστικού φορτίου (τμήματα S1,S2,S2 των οπτικών ερεθισμάτων) όπως περιγράφονται στο πίνακα 3 της παραγράφου 2.3.7.

β. Ως προς επόμενες μελέτες:

- Περισσότερα δείγματα (συμμετέχοντες) και μεγαλύτερη διάρκεια πειραμάτων.
- Χρήση προκλητών δυναμικών και ενεργών δράσεων των συμμετεχόντων.

Βιβλιογραφική λίστα αναφορών

- Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- Borghini, G., Astolfi, L., Vecchiato, G., Mattia, D., & Babiloni, F. (2012). Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 58–75. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.10.003>
- Buchner, J., Buntins, K., & Kerres, M. (2022). The impact of augmented reality on cognitive load and performance: A systematic review. *Journal of Computer Assisted Learning*, 38(1), 285–303. <https://doi.org/10.1111/jcal.12617>
- Baceviciute, S., Terkildsen, T., & Makransky, G. (2021). Remediating learning from non-immersive to immersive media: Using EEG to investigate the effects of environmental embeddedness on reading in Virtual Reality. *Computers & Education*, 164, 104122. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104122>
- Cavanagh, J. F., & Frank, M. J. (2014). Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(8), 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.04.012>
- Candido, V., & Cattaneo, A. (2025). Applying cognitive theory of multimedia learning principles to augmented reality and its effects on cognitive load and learning outcomes. *Computers in Human Behavior Reports*, 18, 100678. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2025>
- Criollo-C, S., Cerezo Uzcátegui, J. E., Guerrero-Arias, A., Samala, A. D., Rawas, S., & Luján-Mora, S. (2024). Analysis of the mental workload associated with the use of virtual reality technology as support in the higher educational model. *IEEE Access*, 12, 114370–114381. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3445301>
- Chikhi, S., Matton, N., & Blanchet, A. (2022). EEG power spectral measures of cognitive workload: A meta-analysis. *Psychophysiology*, 59(11), e14108. <https://doi.org/10.1111/psyp.14108>

- Dan, A., & Reiner, M. (2017). EEG-based cognitive load of processing events in 3D virtual worlds is lower than processing events in 2D displays. *International Journal of Psychophysiology*, 122, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2016.08.013>
- 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. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00154>
- Gramouseni, F., Tzimourta, K. D., Angelidis, P., Giannakeas, N., & Tsipouras, M. G. (2023). Cognitive assessment based on electroencephalography analysis in virtual and augmented reality environments, using head mounted displays: A systematic review. *Big Data and Cognitive Computing*, 7(4), 163. <https://doi.org/10.3390/bdcc7040163>
- Gramfort, A., Luessi, M., Larson, E., Engemann, D. A., Strohmeier, D., Brodbeck, C., Goj, R., Jas, M., Brooks, T., Parkkonen, L., & Hämäläinen, M. S. (2013). MEG and EEG data analysis with MNE-Python. *Frontiers in Neuroscience*, 7, 267. <https://doi.org/10.3389/fnins.2013.00267>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*, 52, 139–183. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Heilig, M. (1955–1962). Sensorama Simulator [Συσκευή – Πατέντα]. U.S. Patent No. 3,050,870.
- Holm, A., Lukander, K., Korpela, J., Sallinen, M., & Müller, K. M. I. (2009). Estimating brain load from the EEG. *The Scientific World Journal*, 9, 639–651. <https://doi.org/10.1100/tsw.2009.83>
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (2005). Νευροεπιστήμη και συμπεριφορά [Essentials of neural science and behavior] (Στ. Α. Τραχανάς, Χ. Ε.
- Katsiroumpa, A., Vraka, E., Moisoglou, I., Konstantakopoulou, O., Tsakalaki, A., & Galanis, P. (2024). Translation and validation of the NASA Task Load Index in Greek. *Archives of Hellenic Medicine*, 41(5), 663–669.
- Kelly, S. P., Lalor, E. C., Reilly, R. B., & Foxe, J. J. (2006). Increases in alpha oscillatory power reflect an active retinotopic mechanism for distracter suppression during sustained visuospatial attention. *Journal of Neurophysiology*, 95(6), 3844–3851. <https://doi.org/10.1152/jn.01234.2005>

- 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>
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3)
- Magic Leap. (2022). Magic Leap 2 product overview. Magic Leap. <https://www.magicleap.com/magic-leap-2>
- Magic Leap. (2023). Magic Leap 2 technology specifications [White paper]. TD Synnex. https://www.tdsynnex.com/na/us/magic-leap/wp-content/uploads/sites/85/2024/05/Magic-Leap-2_Full-Technology-Specifications_190224_English_5.9.pdf
- Mayer, R. E. (2002). Multimedia learning. *The Psychology of Learning and Motivation*, 41, 85–139. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(02\)80005-6](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(02)80005-6)
- Meta. (2019). *Oculus Rift S: Product description*. Meta Platforms, Inc. <https://www.oculus.com/rift-s/>
- Mikropoulos, T. A., & Natsis, A. (2011). Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999–2009). *Computers & Education*, 56(3), 769–780. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.10.020>
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E77-D(12), 1321–1329.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 167–202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
- Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2003). Cognitive load theory and instructional design: Recent developments. *Educational Psychologist*, 38(1), 1–4. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_1
- Pfurtscheller, G., & Lopes da Silva, F. H. (1999). Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: Basic principles. *Clinical Neurophysiology*, 110(11), 1842–1857. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(99\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(99)00141-8)

- Scharinger, C., Kammerer, Y., & Gerjets, P. (2015). Pupil dilation and EEG alpha frequency band power reveal load on executive functions for link-selection processes during text reading. *PLoS ONE*, 10(6), e0130608. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130608>
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6), 603–616. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>
- Slobounov, S. M., Ray, W., Johnson, B., Slobounov, E., & Newell, K. M. (2015). Modulation of cortical activity in 2D versus 3D virtual reality environments: An EEG study. *International Journal of Psychophysiology*, 95(3), 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.11.003>
- Steuer, J. (1992). Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *Journal of Communication*, 42(4), 73–93. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x>
- Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three-dimensional display. *Proceedings of the AFIPS Fall Joint Computer Conference*, 757–764. <https://doi.org/10.1145/1476589.1476686>
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- Sweller, J. (2010). Element interactivity and intrinsic, extraneous, and germane cognitive load. *Educational Psychology Review*, 22(2), 123–138. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9128-5>
- Teplan, M. (2002). Fundamentals of EEG measurement. *Measurement Science Review*, 2(2), 1–11. <https://www.researchgate.net/publication/228599963>
- Tsiara, A., Mikropoulos, T. A., & Chalki, P. (2019). EEG systems for educational neuroscience. In M. Antona & C. Stephanidis (Eds.), *Universal access in human–computer interaction. Multimodality and assistive environments* (pp. 575–586). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23563-5_45
- Tsiara, A., (2021). Χρήση ψυχοφυσιολογικών μετρήσεων για την αξιολόγηση γνωστικών και συναισθηματικών καταστάσεων εκπαιδευομένων σε MOOC βασισμένων σε θεωρίες παιχνιδιοποίησης [Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων]. Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών. <https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/50132>

Virtual Reality Times. (2022, January 29). Fresh details revealed about Magic Leap 2 technology. Virtual Reality Times. <https://virtualrealitytimes.com/2022/01/29/fresh-details-revealed-about-magic-leap-2-technology>

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. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00348>

Δελημήτρος, Μ. Ε. (2023). Επαυξημένη πραγματικότητα και ειδική αγωγή και εκπαίδευση: Μελέτη αποδοχής και ένα μοντέλο σχεδίασης εφαρμογών (Doctoral dissertation, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων). Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών. <https://hdl.handle.net/10442/hedi/54928>

Καζλαρής, Α. Α. Καραμανλίδης & κ.ά., Μετφ.). Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης. (Πρωτότυπο δημοσιεύτηκε 1997)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Α. Κώδικας Python για την επεξεργασία EEG

A1. Μετατροπή αρχείων .mat σε .fif mat2fif.py

```
#!/usr/bin/env python3

# Metatropi mat se fif arxeio

import argparse, os, h5py, numpy as np, mne

# sensitivity ±750 mV (Πυθμιση απο την εφαρμογη :

# μV/count = 0.750 / 2^23 * 1e6 => 0.089406967 μV/count

# V/count = 0.089406967e-6

def lsb_volts(sensitivity_volts):

    return sensitivity_volts / (2**23) # V per count (signed 24-bit)

# EEG channel names based on experimental setup
```

```

CH_NAMES =
["Fp1", "Fp2", "F3", "Fz", "F4", "T7", "C3", "Cz", "C4", "T8", "P3", "Pz", "P4", "PO7", "PO
8", "Oz"]

def load_mat_counts(path):

    with h5py.File(path, "r") as f:

        Y = f["y"][:]

        t = Y[:, 0]

        data_counts = Y[:, 1:17].T    # (16, n_times)

        return t, data_counts

def mat_to_fif(mat_path, out_path=None, sfreq=None, sensitivity_v=0.750,
montage="standard_1005",

                overwrite=True):

    # 1) Load mat dat (sampling is 250Hz)

    t, counts = load_mat_counts(mat_path)

    sfreq = 250.0 if sfreq is None else float(sfreq)

    # 2) Scale counts -> Volts (sensitivity: 750mV for dry electrodes selected
on SIMULINK app for nautilus)

    V_per_count = lsb_volts(sensitivity_v)

    data_volts = counts * V_per_count

    # 3) Build Raw

    info = mne.create_info(ch_names=CH_NAMES, sfreq=sfreq, ch_types="eeg")

    raw = mne.io.RawArray(data_volts, info, verbose=False)

    raw.set_eeg_reference("average", projection=False, verbose=False)

    # 4) Montage (electrode position based on 10-20 protokol)

    # 'standard_1005' περιέχει όλα (Fp1, PO7, PO8, Oz κ.λπ.)

    try:

```

```

        raw.set_montage(montage, on_missing="ignore")

except Exception as e:

    print(f"[WARN] montage '{montage}' failed: {e}")

    # 5) Setting average reference

raw.set_eeg_reference("average", projection=False, verbose=False)

# 6) Save FIF

if out_path is None:

    base = os.path.splitext(os.path.basename(mat_path))[0]

    out_path = base + "_raw.fif"

raw.save(out_path, overwrite=overwrite, verbose=False)

print(f"[OK]         Saved         FIF:         {out_path}         (sfreq={sfreq},
V/count={V_per_count:.3e})")

# 7) Return raw object so it can be plotted outside

return raw

if __name__ == "__main__":

    ap = argparse.ArgumentParser(description="Convert g.Nautilus .mat (y:
time+16ch counts) to MNE .fif")

    ap.add_argument("mat", help="input .mat file (with dataset 'y')")

    ap.add_argument("--sens", type=float, default=0.750, help="±Sensitivity in
Volts (default: 0.750 for ±750 mV)")

    ap.add_argument("--out", default=None, help="output FIF filename")

    ap.add_argument("--plot", action="store_true", help="raw.plot() and PSD")

    ap.add_argument("--no-overwrite", action="store_true", help="do not
overwrite output file if exists")

    args = ap.parse_args()

    raw = mat_to_fif(

```

```

        args.mat,

        out_path=args.out,

        sensitivity_v=args.sens,

        overwrite=(not args.no_overwrite)

    )

    if args.plot:

        print(">> Opening interactive plots...")

        raw.plot(n_channels=16,      scalings='auto',      duration=300,      start=0,
block=True)

        raw.plot_psd(fmax=45)

```

A2. Κώδικας Python για φιλτράρισμα filter_eeg.py

```

#!/usr/bin/env python3

import argparse

import mne

import os

def main():

    parser = argparse.ArgumentParser(description="Φιλτράρισμα EEG αρχείων FIF
με προβολή πριν το φίλτρο")

    parser.add_argument("fif_path", type=str, help="Input .fif αρχείο")

    parser.add_argument("--hp", type=float, default=1.0, help="High-pass Hz
(default 1.0)")

    parser.add_argument("--lp", type=float, default=45.0, help="Low-pass Hz
(default 45)")

    parser.add_argument("--notch", type=float, nargs="*", default=[50.0,
100.0],

                                help="Notch συχνότητες (default 50 100)")

```

```

parser.add_argument("--duration", type=float, default=300.0,

                    help="Διάρκεια παραθύρου στο plot (default 30s)")

args = parser.parse_args()

infile = args.fif_path

if not os.path.exists(infile):

    raise FileNotFoundError(f"Δε βρέθηκε το αρχείο: {infile}")

print(f"[INFO] Φόρτωση {infile}")

raw = mne.io.read_raw_fif(infile, preload=True)

# --- Εμφάνιση αρχικών δεδομένων ---

print("[INFO] Προβολή original raw (άφιλτρο)")

raw.plot(n_channels=16,          duration=args.duration,          scalings="auto",
block=True)

# --- Κόψιμο πρώτων 10s ---

print("[INFO] Κόψιμο πρώτων 10s για να φύγει πιθανός θόρυβος")

raw.crop(tmin=10)

# --- Αντιγραφή & φιλτράρισμα ---

raw1 = raw.copy()

print(f"[INFO] High-pass={args.hp} Hz, Low-pass={args.lp} Hz")

raw1.filter(l_freq=args.hp, h_freq=args.lp)

if args.notch:

    print(f"[INFO] Notch filter στις {args.notch} Hz")

    raw1.notch_filter(freqs=args.notch)

# --- Αποθήκευση ---

outfile = infile.replace(".fif", "_filt.fif")

```

```

print(f"[INFO] Αποθήκευση σε {outfile}")

raw1.save(outfile, overwrite=True)

# --- Εμφάνιση αρχικών δεδομένων ---

print("[INFO] Προβολή original raw (άφιλτρο)")

raw1.plot(n_channels=16, duration=args.duration, scalings="auto",
block=True)

print("[DONE] Τέλος!")

if __name__ == "__main__":

    main()

```

A3. Κώδικας Python για average refering ref_eeg.py

```

#!/usr/bin/env python3

import argparse

import mne

import os

def main():

    parser = argparse.ArgumentParser(description="Φιλτράρισμα EEG αρχείων FIF με προβολή πριν το φίλτρο")

    parser.add_argument("fif_path", type=str, help="Input .fif αρχείο")

    args = parser.parse_args()

    infile = args.fif_path

    if not os.path.exists(infile):

        raise FileNotFoundError(f"Δε βρέθηκε το αρχείο: {infile}")

    print(f"[INFO] Φόρτωση {infile}")

```

```

raw = mne.io.read_raw_fif(infile, preload=True)

# --- Εμφάνιση αρχικών δεδομένων ---

print("[INFO] Προβολή original raw (άφιλτρο)")

#raw.plot(n_channels=16, duration=300,scalings={"eeg": 50e-6}, block=True)

# Αντιγραφή & re-reference

raw1 = raw.copy()

raw1.set_eeg_reference('average')

# --- Αποθήκευση ---

outfile = infile.replace(".fif", "_ref.fif")

print(f"[INFO] Αποθήκευση σε {outfile}")

raw1.save(outfile, overwrite=True)

# --- Εμφάνιση τελικών δεδομένων ---

print("[INFO] Προβολή original raw (άφιλτρο)")

raw1.plot(n_channels=16, duration=300,scalings={"eeg": 50e-6}, block=True)

print("[DONE] Τέλος!")

if __name__ == "__main__":

    main()

```

A4. Κώδικας psd.py υπολογισμού psd και εξόδου csv αποτελεσμάτων

```

#import mne

import numpy as np

import csv

import sys

# Διάβασε subjectname από τη γραμμή εντολών

if len(sys.argv) < 2:

    print("Χρήση: python psd_v5.py <subjectname>")

    sys.exit(1)

```

```

print(sys.argv[1])

subjectdirectory = "/home/mpl/mne_data/all_fif/"
subjectname = sys.argv[1]
methodname = ["_VR", "_AR"]
eegtype = ["_", "_baseline"]

resultscsvname = f"{subjectdirectory}/allcsv/Results_{subjectname}.csv"
# Σταθερή σειρά καναλιών στις στήλες (προσαρμόσ' το αν χρειάζεται)
ch_names = ["Fp1", "Fp2", "F3", "Fz", "F4", "T7", "C3", "Cz", "C4", "T8",
            "P3", "Pz", "P4", "PO7", "PO8", "Oz"]

BANDS = {
    "delta": (1, 4),
    "theta": (4, 7),
    "alpha": (8, 12),
    "beta" : (13, 30),
    "gamma": (30, 45),
}

# paths
names1 = {}

for x in range(2):
    for y in range(2):
        eegfilename = subjectdirectory + subjectname + methodname[x] +
eegtype[y] + ".fif"

        names1[(x, y)] = eegfilename

with open(resultscsvname, "w", newline="", encoding="utf-8") as f:
    writer = csv.writer(f)
    header = ["condition", "metric"] + ch_names
    writer.writerow(header)
    for (x, y), eegfilename in names1.items():
        condition = subjectname + methodname[x] + eegtype[y]
        print("Start Working with:", eegfilename)

```

```

raw = mne.io.read_raw_fif(eegfifname, preload=True, verbose="ERROR")

# PSD (αν θες delta 0.5-4 Hz, βάλε fmin=0.5 εδω)
spec = raw.compute_psd(fmin=1, fmax=45, picks="eeg",
                        n_fft=2048, n_per_seg=1024, n_overlap=512,
verbose="ERROR")

psd, freqs = spec.get_data(return_freqs=True)
dfreq = float(np.mean(np.diff(freqs)))
to_uV2 = 1e12

# Υπολογισμός για ΟΛΑ τα διαθέσιμα κανάλια του αρχείου
# vals[ch] = dict με όλες τις μπάντες + total
vals = {ch: {} for ch in spec.ch_names}

# total power για relative
total_per_ch = (psd * dfreq).sum(axis=1) * to_uV2 # shape (n_ch,)
# Absolute per band
for band_name, (lo, hi) in BANDS.items():
    idx = (freqs >= lo) & (freqs <= hi)
    band_abs = (psd[:, idx] * dfreq).sum(axis=1) * to_uV2 # (n_ch,)
    for i, ch in enumerate(spec.ch_names):
        vals[ch][f"{band_name}_uV2"] = band_abs[i]

# Relative per band
eps = 1e-20
for i, ch in enumerate(spec.ch_names):
    vals[ch]["total_uV2"] = total_per_ch[i]
    for band_name in BANDS.keys():
        abs_val = vals[ch][f"{band_name}_uV2"]
        vals[ch][f"{band_name}_rel"] = abs_val / max(total_per_ch[i],
eps)

# Γράψιμο στο CSV (οριζόντια)
# 1) όλες οι absolute σειρές
for band_name in BANDS.keys():

```

```

        row = [condition, f"{band_name}_uV2"]
        for ch in ch_names:
            row.append(vals[ch][f"{band_name}_uV2"] if ch in vals else
np.nan)

        writer.writerow(row)

# 2) total σειρά
row_total = [condition, "total_uV2"]
for ch in ch_names:
    row_total.append(vals[ch]["total_uV2"] if ch in vals else np.nan)
writer.writerow(row_total)

# 3) όλες οι relative σειράς
for band_name in BANDS.keys():
    row = [condition, f"{band_name}_rel"]
    for ch in ch_names:
        row.append(vals[ch][f"{band_name}_rel"] if ch in vals else
np.nan)

    writer.writerow(row)

    print("Stop Working with:", eegfifname)

print(f"[OK] Saved -> {resultscsvname}")

```

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 .