



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«ΚΛΙΝΙΚΗ ΕΡΓΟΣΠΙΡΟΜΕΤΡΙΑ ΑΣΚΗΣΗ,  
ΠΡΟΗΓΜΕΝΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ  
ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ»

Αναγνώριση προτύπων σε σήματα από φορητό ηλεκτροεγκεφαλογράφο με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης και εφαρμογή σε ασθενείς σε αποκατάσταση.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΛΕΒΕΝΤΑΚΗ

Επιβλέπουσα καθηγήτρια:

Σταυρούλα Γεωργοπούλου, Καθηγήτρια,  
Διευθύντρια Εργαστηρίου Τεχνολογίας  
Ομιλίας, Φωνής και Επαυξητικής  
Εναλλακτικής Επικοινωνίας, Τμήμα  
Λογοθεραπείας, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας

ΑΘΗΝΑ, 2020



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

**«ΚΛΙΝΙΚΗ ΕΡΓΟΣΠΙΡΟΜΕΤΡΙΑ ΑΣΚΗΣΗ,  
ΠΡΟΗΓΜΕΝΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ  
ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ»**

**Αναγνώριση προτύπων σε σήματα από φορητό ηλεκτροεγκεφαλογράφο με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης και εφαρμογή σε ασθενείς σε αποκατάσταση.**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ**

**ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΛΕΒΕΝΤΑΚΗ**

Μέλη Συμβουλευτικής Επιτροπής:

1<sup>ο</sup>: Σταυρούλα Γεωργοπούλου, Καθηγήτρια, Διευθύντρια Εργαστηρίου Τεχνολογίας Ομιλίας, Φωνής και Επαυξητικής Εναλλακτικής Επικοινωνίας, Τμήμα Λογοθεραπείας, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου

2<sup>ο</sup>: Ιωάννης Βασιλειάδης, Παθολόγος - Εντατικολόγος, Επίκουρος Καθηγητής, Ιατρική Σχολή ΕΚΠΑ

3<sup>ο</sup>: Νεφέλη Δημητριάδη, Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Κινηματογράφου Σχολής Καλών Τεχνών, Εικονική - Επαυξημένη και Μεικτή Πραγματικότητα, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΑΘΗΝΑ, 2020

«Δόξα τῷ Θεῷ πάντων ἕνεκεν»

(αγ. Ιω. Χρυσόστομος)

*Στην αγαπημένη μου σύζυγο*

*Εμμέλεια*

*και στα παιδιά μας*

*Γιάννη, Μαρίνα, Σεραφείμ και Αθηνά*

## Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί το επιστέγασμα των μεταπτυχιακών μου σπουδών τις οποίες δε θα μπορούσα να ολοκληρώσω χωρίς την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη της αγαπημένης μου συζύγου, Εμμέλειας. Για το λόγο αυτό επιθυμώ να της αφιερώσω το παρόν πόνημα, ως ελάχιστη αναγνώριση και ένδειξη ευγνωμοσύνης.

Ιδιαίτερος και θερμότατα οφείλω να ευχαριστήσω το Διευθυντή του ΠΜΣ «Κλινική Εργοσπιρομετρία, Άσκηση, Προηγμένη Τεχνολογία και Αποκατάσταση» κ. Σεραφείμ Νανά, ο οποίος υπήρξε από την πρώτη στιγμή μέντορας μου, πηγή έμπνευσης, πρότυπο ακαδημαϊκό και επαγγελματικό και τον οποίο ευχαριστώ θερμά για όλη την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ευχαριστίες βεβαίως οφείλω και στους γονείς μου για την πολύτιμη στήριξη και πολλαπλή συμπαράσταση που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια στις σπουδές μου. Ξεχωριστά θα ήθελα να αναφερθώ στον αγαπητό μου αδερφό Ανδρέα Λεβεντάκη, τον οποίο είχα την ιδιαίτερα χαρά και τιμή να έχω συμφοιτητή και συνοδοιπόρο στο συγκεκριμένο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών. Εκφράζω την αδυναμία να τις συμπυκνώσω στις λίγες αυτές γραμμές τις ευχαριστίες μου ξεχωριστά προς το υπόλοιπο οικογενειακό μου περιβάλλον, η εκτίμηση μου και η ευγνωμοσύνη μου παραμένει δεδομένη.

Ευχαριστίες οφείλω ακόμη και στην τριμελή επιτροπή της μεταπτυχιακής μου εργασίας, την επιβλέπουσα καθηγήτρια κα Σταυρούλα Γεωργοπούλου, τον καθηγητή κ. Ιωάννη Βασιλειάδη και την καθηγήτρια κα Δημητριάδη Νεφέλη, οι οποίοι μου πρόσφεραν δεξιότητες και τεχνογνωσία όχι μόνο για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης αλλά και για την υπόλοιπη επαγγελματική μου σταδιοδρομία.

Για τους ίδιους λόγους ευχαριστώ και το λοιπό Διδακτικό και Ερευνητικό Προσωπικό του Μεταπτυχιακού, με το οποίο είχα την ιδιαίτερη τιμή να συνεργαστώ κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος δε θα παραλείψω να ευχαριστήσω θερμά και την ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου «Κλινικής Εργοσπιρομετρίας, Άσκησης και Αποκατάστασης» μέσα στην οποία δραστηριοποιήθηκα ερευνητικά από την αρχή των σπουδών μου και συγκεκριμένα θα αναφέρω του αγαπητούς Λευτέρη Καρατζάνο, Δήμητρα Τζούμη, Ειρήνη Πατσάκη, Ακυλίνα Δεσπότη και Ρένια Παπαθανασίου. Η συνεργασία που αναπτύχθηκε και η ανταλλαγή εμπειριών και γνώσεων ήταν καταλυτική για την επιτυχή ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών σπουδών και ιδιαίτερα για την εκπόνηση της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας.

Νικόλαος Ι. Λεβεντάκης

Φθινόπωρο 2020

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	4
Κατάλογος Εικόνων .....	7
Κατάλογος Πινάκων .....	8
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια .....	9
Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα .....	10
Περίληψη .....	11
Abstract .....	12
Λέξεις κλειδιά .....	13
1 Γενικό Μέρος .....	14
1.1 Εισαγωγή .....	14
1.2 Εικονική Πραγματικότητα (VR) .....	14
1.3 Διεπαφές Εγκεφάλου Υπολογιστή .....	17
1.4 Η χρησιμότητα της ανασκόπησης .....	20
2 Ειδικό Μέρος .....	21
2.1 Σκοπός .....	21
2.2 Ερευνητικά Ερωτήματα .....	21
2.3 Ερευνητική Υπόθεση .....	21
2.4 Μεθοδολογία .....	22
2.4.1 Όροι αναζήτησης .....	22
2.4.2 Λογικοί Συνδυασμοί των όρων αναζήτησης .....	23
2.4.3 Στρατηγική Αναζήτησης .....	23
2.4.5 Κριτήρια εισαγωγής ή αποκλεισμού .....	24
2.5 Αποτελέσματα Αναζήτησης .....	26
2.6 Συνοπτική Παρουσίαση δημοσιεύσεων .....	27
2.6.1 SSVEP response on Oculus Rift, 2015 .....	27
2.6.2 Immersive BCI with SSVEP in VR Head-Mounted Display (2015) .....	29
2.6.3. Investigating Spatial Awareness within an SSVEP-based BCI in Virtual Reality (2018) .....	31
2.6.4 High-Speed Spelling in Virtual Reality with Sequential Hybrid BCIs (2018) ...	33
2.6.5 Comparison of Visual Stimuli for Steady-State Visual Evoked Potential-Based	

Brain-Computer Interfaces in Virtual Reality Environment in terms of Classification Accuracy and Visual Comfort (2019).....	35
2.6.6 An online brain-computer interface in mobile virtual reality environments 2019 .....	38
2.7 Συζήτηση .....	41
2.7.1 Συγκριτική Αξιολόγηση .....	41
2.7.2 Συνολική αξιολόγηση .....	43
2.7.3 Προοπτικές .....	44
3 Επιβεβαίωση της Αρχής των SSVEP με τη χρήση ασύρματου ηλεκτροεγκεφαλογράφου (Proof of Concept).....	47
3.1 Σχεδιασμός πειράματος.....	47
3.2 Εξοπλισμός (Hardware) .....	47
3.3 Λογισμικό (Software) .....	48
3.4 Δειγματοληψία .....	48
3.5 Αποτελέσματα .....	48
4. Βιβλιογραφία .....	52

## Κατάλογος Εικόνων

<b>Εικόνα 1:</b> Τεχνολογίες για προβολή εικονικών κόσμων χωρίς εμβύθιση. Α: Οθόνη υπολογιστή, Β: Smartphone και Tablet, Γ: προβολέας - projector, Δ: Τηλεόραση.....	15
<b>Εικόνα 2:</b> Τεχνολογίες για προβολή εικονικών κόσμων με εμβύθιση. Α: Οθόνη στερεοσκοπικού 3D, Β: 3D cinema, Γ: Κυρτή οθόνη με μεγάλη διάμετρο, Γ και Δ: Projection VR, Ζ και Η: HMD VR.....	16
<b>Εικόνα 3:</b> Αποτελέσματα ανά έτος από pubmed για το λήμμα ((immersive) OR (headset) OR (HMD) OR (head-mounted display)) AND (VR) AND (eeg) AND (BCI) .....	25
<b>Εικόνα 4:</b> Αποτελέσματα ανά έτος από pubmed για το λήμμα ((immersive) OR (headset) OR (HMD) OR (head-mounted display)) AND (VR) AND (eeg).....	25
<b>Εικόνα 5:</b> Σχηματική απεικόνιση της κάτοψης του κεφαλιού με τις θέσεις των ηλεκτροδίων λήψης του eeg σήματος. ....	28
<b>Εικόνα 6:</b> Διάγραμμα χρόνου όπου παρουσιάζεται η χρονική αλληλουχία των μετρήσεων στο πρωτόκολλο της πρώτης δημοσίευσης.....	29
<b>Εικόνα 7:</b> Στιγμιότυπο από το εικονικό περιβάλλον και το μηχανισμό διάδρασης. Αριστερά τρεμοσβήνουν τα πλακίδια γύρω από τη σφαίρα στα οποία έχει δυνατότητα να μετακινήσει ο χρήστης τη σφαίρα. Δεξιά η εκτέλεση της εντολής κατά την οποία τα πλακίδια σταματούν να τρεμοσβήνουν και η σφαίρα μετακινείται. ....	30
<b>Εικόνα 8:</b> Το εικονικό περιβάλλον (αριστερά) και το σύστημα (δεξιά) εφαρμοσμένο στο χρήστη.....	32
<b>Εικόνα 9:</b> Διάγραμμα στοιχείων (component mapping) του συστήματος πληκτρολόγησης με SSVEP BCI και HMD VR.....	34
<b>Εικόνα 10:</b> Όψη του εικονικού πληκτρολογίου 40 στόχων που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη. ....	34
<b>Εικόνα 11:</b> Τα δύο διαφορετικά μοτίβα οπτικού ερεθίσματος που χορηγήθηκαν στους χρήστες, όπως εμφανίζονταν κατά τη φάση της εκπαίδευσης και επιλογής του βολικότερου στο χρήστη. Στην αρχή είναι τα 2s με την οδηγία επιλογής στόχου και μετά ακολουθούν 4s για την επιλογή του στόχου τόσο με το ένα όσο και με το άλλο μοτίβο. ....	36
<b>Εικόνα 12:</b> Στιγμιότυπο που παιχνιδιού με μοτίβα Α) PRCS και Β) GSS. Διακρίνεται ο ακόμη ο λαβύρινθος και το avatar.....	37
<b>Εικόνα 13:</b> Η διάταξη του συστήματος Α) Φωτορεαλιστική οπτικοποίηση του χρήστη πάνω στον κυλιόμενο τάπητα φορώντας την HMD VR και του υπόλοιπου χώρου διεξαγωγής των μετρήσεων Β) Φωτογραφία από χρήστη κατά την μέτρηση C) Διάγραμμα υποσυστημάτων, εικονικής πραγματικότητας, επεξεργασίας δεδομένων και καταγραφής eeg σήματος.....	39
<b>Εικόνα 14:</b> Το εικονικό δωμάτιο στο οποίο μεταφερόταν κάθε χρήστης μέσω της HMD VR. ....	40

<b>Εικόνα 15:</b> Στιγμιότυπο του πειράματος. Διακρίνεται ο συμμετέχων φορώντας το φορητό ηλεκτροεγκεφαλογράφο καθώς και τα δύο LEDs (μπλε και άσπρο) τα οποία κοιτάζει μέσα σε σκοτεινό δωμάτιο.....	47
<b>Εικόνα 16:</b> Ο φορητός ηλεκτροεγκεφαλογράφος EPOC Flex της Emotiv σε πλάγια όψη και πίσω όψη.....	48
<b>Εικόνα 17:</b> Τα φάσματα ισχύος για διέγερση μόνο με 4Hz με το μπλε LED (μπλε γραμμή) και μόνο με 10Hz με το λευκό LED (κόκκινη γραμμή). Διακρίνονται εμφανώς οι αιχμές ισχύος στις συχνότητες διέγερσης και στην πρώτη αρμονική τους. Συγκεκριμένα στην μπλε γραμμή διακρίνονται αιχμές στα 4Hz και στην πρώτη αρμονική $2 \times 4 = 8\text{Hz}$ . Ομοίως στην κόκκινη γραμμή διακρίνονται οι αιχμές στα 10Hz και στην πρώτη αρμονική $10 \times 2 = 20\text{Hz}$ .	49
<b>Εικόνα 18:</b> Ανάλυση χρόνου - συχνότητας (time-frequency) του ηλεκτροεγκεφαλικού σήματος για ταυτόχρονη διέγερση με 4Hz και με 10Hz. Πάνω το διάγραμμα αυτούσιο και κάτω το ίδιο διάγραμμα με επισήμανση στις περιοχές με διέγερση. Το μοβ πλαίσιο στην κάτω εικόνα αντιστοιχεί σε διέγερση στα 4Hz και στα 8Hz που αντιστοιχεί σε οπτική εστίαση στο μπλε LED στα αριστερά του χρήστη. Ομοίως το κόκκινο πλαίσιο αντιστοιχεί σε διέγερση στα 10Hz και οπτική εστίαση στο άσπρο LED στα δεξιά του χρήστη. ....	50

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 1:</b> Τα αποτελέσματα της αναζήτησης κατά σειρά δημοσίευσης μαζί με σχετικά μεταδεδομένα.....	27
<b>Πίνακας 2:</b> Σύγκριση των επιδόσεων σε οθόνη υπολογιστή και HMD VR ως προς το χρόνο ολοκλήρωσης του παιχνιδιού και το ρυθμό μεταφοράς πληροφορίας (ITR).....	31
<b>Πίνακας 3:</b> τα αποτελέσματα επίδοσης σε εικονικό λαβύρινθο με χρήση HMD VR και συμβατική οθόνη laptop.....	33
<b>Πίνακας 4:</b> Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για πληκτρολόγηση σε εικονικό πληκτρολόγιο μέσα σε περιβάλλον HMD VR με τη χρήση SSVEP BCI και eye gaze.....	35
<b>Πίνακας 5:</b> Αποτελέσματα ακρίβειας για τα μοτίβα PRCS και GSS σε κατηγορίες χρηστών με προτίμηση στο ένα ή στο άλλο ή εξίσου και στα δύο. ....	38
<b>Πίνακας 6:</b> Η ακρίβεια επιλογής στόχου και ο ρυθμός μεταφοράς πληροφορίας (ITR) ανά ταχύτητα βάδισης ως προς τη θέση των στόχων στην online δοκιμή.....	41
<b>Πίνακας 7:</b> Σύγκριση τεχνικών χαρακτηριστικών εξοπλισμού ανά δημοσίευση. ....	41
<b>Πίνακας 8:</b> Σύγκριση δημοσιεύσεων με κριτήρια PICO. ....	43



## Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ΕΚΠΑ	Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
ΜΔΕ	Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία
VR	Virtual Reality / Εικονική Πραγματικότητα
BCI	Brain Computer Interface / Διεπαφή Εγκεφάλου Υπολογιστή
HMD	Head Mounted Display / μάσκα - οθόνη
SSVEP	Steady State Visual Evoked Potentials / Οπτικά Δυναμικά Σταθερής Κατάστασης
EEG	Ηλεκτροεγκεφαλικά σήματα
3D	Τρισδιάστατος

## **Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα**

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος «Κλινική Εργοσπιρομετρία, Άσκηση, Προηγμένη Τεχνολογία και Αποκατάσταση» της Ιατρικής Σχολής του Εθνικού & Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας και προσωπικά δεδομένα τρίτων με βάση την κείμενη νομοθεσία. Δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, αναπαραγωγής και αναδημοσίευσης. Τέλος, οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές πληρώντας όλους τους κανόνες της επιστημονικής συγγραφής, ηθικής και δεοντολογίας.

## Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία γίνεται μία συστηματική ανασκόπηση του αντικειμένου της διάδρασης Εγκεφάλου-Υπολογιστή μέσα σε περιβάλλοντα Εικονικής Πραγματικότητας (VR) με τη χρήση οπτικών δυναμικών σταθερής κατάστασης (SSVEP).

Η Εικονική Πραγματικότητα αν και άρχισε να αναπτύσσεται ήδη από τη δεκαετία του 1960, μόλις τα τελευταία 5 χρόνια κατέστη προσβάσιμη στο ευρύ καταναλωτικό κοινό μέσω της τεχνολογίας μάσκας-οθόνης (HMD). Το γεγονός αυτό έδωσε ώθηση στην αναζήτηση νέων μέσων διάδρασης ανθρώπου μηχανής γενικά αλλά και ειδικά σε πάσχοντες πληθυσμούς και ιδιαίτερα στους τομείς της Εναλλακτικής και Επαυξητικής Επικοινωνίας και της Αποκατάστασης.

Από την άλλη πλευρά στο κομμάτι της διάδρασης Εγκεφάλου - Υπολογιστή, οι Διεπαφές Εγκεφάλου Υπολογιστή (BCIs) παρότι έκαναν την εμφάνισή τους ήδη από τη δεκαετία του 1970, άρχισαν να βρίσκουν πρακτική εφαρμογή στους ανθρώπους στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα με την αποκωδικοποίηση ποικιλίας εγκεφαλικών σημάτων σε πραγματικό χρόνο (online). Μία από τις πιο γνωστές τεχνικές BCI αξιοποιεί τη μέθοδο των οπτικών δυναμικών σταθερής κατάστασης (SSVEP) σύμφωνα με την οποία όταν κάποιος εστιάζει το βλέμμα του σε μία πηγή φωτός που τρεμοσβήνει με σταθερή συχνότητα, τότε τα ηλεκτρικά εγκεφαλικά σήματα της ινιακής περιοχής του εγκεφάλου συγχρονίζονται στη συχνότητα αυτή, κατάσταση η οποία είναι ανιχνεύσιμη από ένα ηλεκτροεγκεφαλογράφο.

Οι δύο τεχνολογίες, δηλαδή η Εικονική Πραγματικότητα με Μάσκα-Οθόνη (HMD VR) και οι Διεπαφές Εγκεφάλου Υπολογιστή βασιζόμενες σε Οπτικά Δυναμικά Σταθερής Κατάστασης (SSVEP BCI) συναντιούνται πλέον ερευνητικά την τελευταία πενταετία με τρόπο συστηματικό, οπότε πλέον κάθε έτος δημοσιεύονται ένα με δύο πρωτότυπα άρθρα στο αντικείμενο. Η σχετική βιβλιογραφία φαίνεται να συγκλίνει στο συμπέρασμα πως ο συνδυασμός των δύο τεχνολογιών όχι μόνο είναι εφικτός αλλά δημιουργεί μία ενδιαφέρουσα συνέργεια κατά την οποία αφενός το SSVEP BCI καθίσταται αποδοτικότερο αφετέρου το HMD VR αποκτά νέους τρόπους διάδρασης ανθρώπου μηχανής για την επίτευξη νέων τύπων εμπειριών σε εικονικούς κόσμους με εμβύθιση (immersion). Η συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας είναι το βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Τέλος, μετά την ανάλυση και την αξιολόγηση της βιβλιογραφίας γίνεται προσπάθεια αναπαραγωγής της αρχής λειτουργίας του SSVEP BCI με ένα φορητό και ασύρματο ηλεκτροεγκεφαλογράφο - αντί για ενσύρματο ηλεκτροεγκεφαλογράφο - ερευνητική κατεύθυνση με ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά που δεν έχει εξερευνηθεί ακόμη. Η δοκιμή αυτή δεν έχει συστηματικό χαρακτήρα αλλά αποτελεί περισσότερο μία πειραματική επίδειξη επί της αρχής λειτουργίας (proof of concept).

## Abstract

This master thesis considers a systematic review of Brain Computer Interface (BCI) applications into immersive, Head Mounted Display based Virtual Reality (HMD VR), with the use of Steady State Visual Evoked Potentials (SSVEP) BCI paradigm.

Virtual Reality has been developed since 60s, but it was not until the last 5 years when VR entered the market becoming widely available to the public, in the form of HMD VR. As a result, research considering VR and human-machine interfaces, Alternative and Augmentative Communication, Rehabilitation, Education etc has emerged. Specifically, in the medical sector, VR is examined as a new tool that could help patients communicate and rehabilitate more efficiently.

On the other hand, eeg based BCIs although they have already appeared from 70s, they became capable for practical human application at the start of 21<sup>st</sup> century. One of the most popular BCI paradigms is the SSVEP paradigm according to which, when someone is observing a flickering light source, the eeg signals from the occipital and parietal region they do synchronize to the frequency of the light under attention.

Combined research around these two technological fields, started the last 5 years, leading to 1-2 new papers per year. Relevant literature, thus far, seems to conclude that the two technologies not only can be jointly applied but they can also build some interesting synergies resulting in more robust and accurate SSVEP BCI and enriching HMD VR with new human machine interfaces and new types of immersive experiences. Relevant literature is analysed and commented in this thesis.

Finally, following the systematic review, we set up an experiment for observing Steady State Visual Evoke Potentials with the use of a portable eeg headset as a proof of concept. Motivation for this experiment is the lack of such an application in literature which may present some interesting features against the wired eeg headsets.

## Λέξεις κλειδιά

Εικονική Πραγματικότητα, Οθόνη - Μάσκα, Ηλεκτροεγκεφαλογραφία, Διεπαφές Εγκεφάλου Υπολογιστή, Οπτικά Δυναμικά (ή Οπτικώς Προκαλούμενα Ηλεκτροεγκεφαλικά Δυναμικά) Μόνιμης Κατάστασης

Virtual Reality, Head Mounted Displays, Electroencephalography, Brain Computer Interfaces, Steady State Visual Evoked Potentials

# 1 Γενικό Μέρος

Στην ενότητα αυτή αναλύονται τα τεχνολογικά πεδία αφενός της Εικονικής Πραγματικότητας και αφετέρου των Διεπαφών Εγκεφάλου Υπολογιστή πάνω στα οποία στηρίζεται η ανασκόπηση. Γίνεται ακόμη αναφορά στη χρησιμότητα της ανασκόπησης αυτής.

## 1.1 Εισαγωγή

Η παρούσα ανασκόπηση μελετάει την ερευνητική σύγκλιση δύο αναδυόμενων και ταχέως εξελισσόμενων τεχνολογιών που παρά τη μακρά ιστορία τους, άρχισαν να διαδίδονται και να δημιουργούν επίδραση στην Αλληλεπίδραση Ανθρώπου Μηχανής την τελευταία δεκαετία.

Πρόκειται για τις τεχνολογίες της Εικονικής Πραγματικότητας αφενός (Virtual Reality) και των Διεπαφών Εγκεφάλου Υπολογιστή (Brain Computer Interface) αφετέρου. Πιο συγκεκριμένα η εργασία εστιάζει σε τεχνολογίες Εικονικής Πραγματικότητας με μάσκα οθόνη (Head Mounted Display - HMD VR) και σε Διεπαφές Εγκεφάλου Υπολογιστή (BCI), βασιζόμενες στο ηλεκτροεγκεφαλικό σήμα (eeg-based) που προκύπτει από Οπτικά Δυναμικά Σταθερής Κατάστασης (Steady State Visual Evoked Potentials - SSVEP).

Ο συνδυασμός των δύο αυτών τεχνολογιών, παρατηρείται με σταθερή συχνότητα στη βιβλιογραφία κυρίως την τελευταία πενταετία με τη χρήση της νέας γενιάς HMD VR, και σε αυτό το χρονικό διάστημα επικεντρώνεται η μελέτη.

Παρότι συστήματα HMD VR με SSVEP BCI, μπορούν να έχουν εφαρμογή στο γενικό πληθυσμό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αξία αποκτούν σε πληθυσμούς που πάσχουν από σοβαρούς και πολύ σοβαρούς κινητικούς περιορισμούς, ως εργαλείο που μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο για την αποτελεσματικότερη επικοινωνίας τους όσο και για αυτή την αξιολόγηση και τη θεραπεία τους με τη χορήγηση κατάλληλων ερεθισμάτων και την παρακολούθηση της προόδου τους.

Στις επόμενες ενότητες αναλύονται τα δύο τεχνολογικά αντικείμενα.

## 1.2 Εικονική Πραγματικότητα (VR)

Εικονική πραγματικότητα (αγγλικά: virtual reality ή VR) ονομάζεται η προσομοίωση ενός πραγματικού ή φανταστικού περιβάλλοντος από έναν υπολογιστή<sup>[8]</sup>.

Οι τεχνολογίες εικονικής πραγματικότητας άρχισαν να εμφανίζονται τη δεκαετία του 1960 με τις συσκευές sensorama (1956) και headsight TV (1961) ωστόσο αναδείχθηκαν ιδιαίτερα από το 2012 και έπειτα με τη μάσκα οθόνη (Oculus Rift Development Kit 1) και κατέστησαν προσιτές στο ευρύ καταναλωτικό κοινό από το 2016 και έπειτα με την κυκλοφορία των HTC VIVE και Oculus Rift CV1. Παρόλα αυτά ο όρος Εικονική Πραγματικότητα χρησιμοποιήθηκε ήδη και πριν τη δεκαετία του 2010 και εκτός πλαισίου HMD VR, για ένα πλήθος διαφορετικών τεχνολογιών που παρέχουν διαφορετικού τύπου εμπειρίες «εικονικής πραγματικότητας».

Για το λόγω αυτό η εικονική πραγματικότητα διακρίνεται σε εικονική πραγματικότητα με εμβύθιση και εικονική πραγματικότητα χωρίς εμβύθιση, ανάλογα με την εμπειρία χρήσης που δημιουργεί στον χρήστη.

Εμβύθιση (immersion) είναι η εμπειρία που αποκομίζει ο χρήστης όταν αποκόπτεται από τα ερεθίσματα του φυσικού του περιβάλλοντος και αισθάνεται φυσικά παρών σε ένα εικονικό περιβάλλον. Αυτό επιτυγχάνεται με ειδικές διεπαφές οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να πλοηγηθεί και να ενεργήσει στο εικονικό περιβάλλον με τρόπο όμοιο με αυτόν που λειτουργεί μέσα στο φυσικό περιβάλλον, δηλαδή με την κίνηση του κεφαλιού και των ματιών του, με τα χέρια, τα δάκτυλα, τα πόδια κ.ο.κ.

Στον αντίποδα βρίσκονται οι συμβατικές τεχνολογίες διάδρασης μέσω υπολογιστή, δηλαδή με οθόνη, ποντίκι, πληκτρολόγιο ή οθόνη αφής.

Ενδεικτικές τεχνολογίες εικονικής πραγματικότητας χωρίς εμβύθιση (Εικόνα 1) είναι:

- Συμβατικές Οθόνες υπολογιστή / laptop κλπ
- Smartphones, tables
- Projectors
- Τηλεοράσεις



**Εικόνα 1:** Τεχνολογίες για προβολή εικονικών κόσμων χωρίς εμβύθιση. Α: Οθόνη υπολογιστή, Β: Smartphone και Tablet, Γ: προβολέας - projector, Δ: Τηλεόραση.

Ενδεικτικές τεχνολογίες εικονικής πραγματικότητας με εμβύθιση (Εικόνα 2) είναι:

- Οθόνες στερεοσκοπικού 3D (home theatre) και 3D cinema
- Κυρτές Οθόνες (curved monitors)
- Projection VR
- HMD VR



**Εικόνα 2:** Τεχνολογίες για προβολή εικονικών κόσμων με εμβύθιση. Α: Οθόνη στερεοσκοπικού 3D, Β: 3D cinema, Γ: Κυρτή οθόνη με μεγάλη διάμετρο, Γ και Δ: Projection VR, Ζ και Η: HMD VR.



Τα όρια μεταξύ immersive και non immersive VR πολλές φορές καθίστανται δυσδιάκριτα, ακόμη και στον ακαδημαϊκό χώρο, καθώς ακόμη δεν έχουν συσχετιστεί μονοσήμαντα οι όροι με συγκεκριμένες τεχνολογίες.

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην τεχνολογία HMD VR, διότι:

- Παρέχει πλήρη απομόνωση από το πραγματικό περιβάλλον (σε αντίθεση με home theatre και curved monitors)
- Παρέχει δυνατότητα επισκόπησης σε 360° με φυσική κίνηση βλέμματος και κεφαλιού (σε αντίθεση με home theatre και curved monitors)
- Είναι φορητή (σε αντίθεση με όλες τις υπόλοιπες)
- Είναι διαθέσιμη εμπορικά στο ευρύ κοινό (σε αντίθεση με projection VR)
- Είναι οικονομικά προσιτή στο ευρύ κοινό
- Δίνει τη δυνατότητα κίνησης στο χώρο (home theatre και curved monitors)
- Δίνει τη δυνατότητα καταγραφής της κίνησης του κεφαλιού στο χώρο και ενίοτε και των οφθαλμών του χρήστη.

Η τεχνολογία HMD VR παρουσιάζει ωστόσο κάποια μειονεκτήματα όπως:

Αίσθημα ναυτίας λόγω προσωμοίωσης (Simulation sickness) το οποίο προέρχεται όταν η κιναισθηση του ανθρώπου που προκύπτει από το νευρομυϊκό σύστημα και τα κέντρα ισορροπίας του εγκεφάλου δε συμπίπτει με την αίσθηση του χώρου και της κίνησης που αποκτά μέσω της όρασης.<sup>[9]</sup> Αυτό εξομαλύνεται με πολύ προσεκτικό σχεδιασμό του εικονικού περιβάλλοντος και του τρόπου διάδρασης.

Κούραση μετά από παρατεταμένη χρήση. Συνήθως σε σύντομο χρονικό διάστημα χρήσης ο χρήστης αρχίζει να αισθάνεται κούραση. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ενώ ένα υγιές μπορεί να εργαστεί μπροστά από μία οθόνη για ώρες, μέσα σε ένα HMD VR δύσκολα ο χρόνος παραμονής τους μπορεί να είναι πολύ μικρότερος.

Ωστόσο ο περιορισμός του χρόνου, από μόνος του, δεν είναι αποτρεπτικός για ασθενείς των οποίων οι συνεδρίες ούτως ή άλλως διαρκούν λιγότερο πχ 10-15'. Στους ασθενείς συνήθως έχει μεγαλύτερη σημασία η παροχή μιάς αποτελεσματικής διεπαφής μέσω της οποίας ο ασθενής θα κινητοποιηθεί και θα διαδράσει όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά και θα μπορέσουν να χορηγηθούν συγκεκριμένα ερεθίσματα με ακρίβεια.

### 1.3 Διεπαφές Εγκεφάλου Υπολογιστή

Οι Διεπαφές Εγκεφάλου Υπολογιστή (BCI) είναι συστήματα εναλλακτικής επικοινωνίας τα οποία επιτρέπουν την διάδραση του ανθρώπου με τον υπολογιστή, χωρίς τη χρήση μυών, αποκλειστικά μέσω της εγκεφαλικής δραστηριότητας του χρήστη.

Οι τεχνολογίες BCI έκαναν την εμφάνισή τους στις αρχές της δεκαετίας του 1970 με τις πρώτες εφαρμογές να γίνονται σε μαιμούδες οι οποίες μέσω της σκέψης καθοδηγούσαν ρομποτικούς βραχίονες για να συλλάβουν την τροφή τους<sup>[10]</sup>. Η πρώτη εφαρμογή σε ανθρώπους έγινε με το πείραμα Vidal του 1977, κατά το οποίο οι

συμμετέχοντες μετακινούσαν ένα δισδιάστατο κέρσρα μέσω οπτικών δυναμικών (VEP). Ακολούθησαν εργασίες στα τέλη της δεκαετίας του 1980 με εφαρμογές όπως τηλεχειρισμός ρομπότ και πληκτρολόγηση κειμένου, χωρίς όμως κάποια αξιοσημείωτη πρόοδο τα επόμενα χρόνια. Νέα ώθηση δόθηκε στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα με νέες τεχνικές και μετρήσεις που προέκυψαν σε συνδυασμό με απεικονιστικές μεθόδους όπως fMRI. Ειδικά στον τομέα των μη επεμβατικών BCI που βασίζονται στο ηλεκτροεγκεφαλικό σήμα, από τις αρχές της δεκαετίας 2010, νέες μέθοδοι και νέες συσκευές έχουν οδηγήσει πλέον ακόμη και σε συσκευές διαθέσιμες στο εμπόριο για το ευρύ καταναλωτικό κοινό με ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών. <sup>[10]</sup>

Τα BCI μία τεχνολογία ιδιαίτερα χρήσιμη σε πληθυσμούς με πολύ σοβαρά κινητικά προβλήματα που τους εμποδίζουν να χρησιμοποιήσουν κάποιο άλλο μέλος του σώματός τους, όπως χέρια, πόδια και κεφάλι για τη διάδρασή τους μέσω υπολογιστών και γενικά τεχνολογικών συστημάτων.

Τα συστήματα BCI, διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Τα επεμβατικά BCI
- Τα μη επεμβατικά BCI

Τα επεμβατικά BCI, απαιτούν την τοποθέτηση ηλεκτροδίων κάτω από το κρανίο είτε στο φλοιό του εγκεφάλου μέσω ηλεκτροφλοιογραφίας (*electrocortigraphy*) είτε ακόμη βαθύτερα στον εγκέφαλο. Υπάρχουν ακόμη κάποια επεμβατικά BCI όπου η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων γίνεται υποδόρια. Τα επεμβατικά BCI χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ακρίβεια τόσο στη λήψη του σήματος όσο και στον προσδιορισμό της περιοχής από την οποία προέρχεται το σήμα. Απαιτείται όμως χειρουργική επέμβαση η οποία προσθέτει ξένο σώμα μέσα στο ανθρώπινο σώμα με ό,τι αυτό συνεπάγεται. Είναι μέθοδος δαπανηρή, που καταπονεί το χρήστη.

Από την άλλη μεριά τα μη επεμβατικά BCI δεν απαιτούν χειρουργική επέμβαση και από αυτήν την άποψη είναι πιο εύκολο να χρησιμοποιηθούν σε μεγαλύτερο πληθυσμό ανθρώπων. Αυτά με τη σειρά τους διακρίνονται σε:

- EEG-based, βασισμένα σε ηλεκτροεγκεφαλικό σήμα και
- Non EEG-based, μη βασισμένα σε ηλεκτροεγκεφαλικό σήμα.

Τα non eeg-based BCI, περιλαμβάνουν μεθόδους όπως μαγνητική τομογραφία fMRI, μαγνητοεγκεφαλογράφημα (MEG) κα. Συνήθως οι μέθοδοι αυτοί απαιτούν ακριβό εξοπλισμό και απαιτούν περιορισμό της κίνησης του χρήστη καθώς και περιορισμό στο χρόνο καταγραφής.

Τα eeg-based BCI, βασίζονται σε ηλεκτροεγκεφαλογράφους, ενσύρματους ή πλέον και ασύρματους, πολλά από αυτά είναι προσιτά ακόμη και στο ευρύ καταναλωτικό κοινό, τοποθετούνται σχετικά ευκολότερα από όλα τα προηγούμενα συστήματα BCI, δεν επηρεάζουν τον οργανισμό, επιτρέπουν την κίνηση του ασθενούς και τη στάση του σε

διαφορετικές θέσεις, συνδυάζονται με άλλες τεχνολογίες όπως πχ HMD VR και προσφέρονται για χρήση σε μεγάλους πληθυσμούς.

Συγκεκριμένα σε ένα eeg-based BCI, ειδικά ηλεκτρόδια εφάπτονται στο δέρμα του κεφαλιού και καταγράφουν τα ηλεκτρικά κύματα που εκπέμπονται κατά τη λειτουργία των νευρώνων.

Όταν πολλοί νευρώνες, μάλιστα από που αυτούς που βρίσκονται σε περιοχές του φλοιού του εγκεφάλου, συγχρονίζουν την ηλεκτρική τους δραστηριότητα, τότε τα ηλεκτρικά πεδία καθίστανται ανιχνεύσιμα στο δέρμα του κεφαλιού σε ηλεκτρικές τάσεις της τάξη των  $\mu\text{V}$ .

Το μειονέκτημά τους είναι ότι παρουσιάζουν χαμηλή ανάλυση στο χώρο και είναι επιρρεπή στους περιβαλλοντικούς θορύβους. Παρόλα αυτά με τη σύγχρονη τεχνολογία επεξεργασίας σήματος είναι δυνατό να προσφέρουν αξιόπιστους τρόπους διάδρασης εγκεφάλου υπολογιστή.

Συγκεκριμένα υπάρχουν 4 βασικές μεθοδολογίες διάδρασης εγκεφάλου υπολογιστή μέσω eeg based BCI (BCI paradigms):

- The P300 / oddball paradigm: ο εγκέφαλος αντιδρά με συγκεκριμένο τρόπο σε ένα «απροσδόκητο» θέαμα ή άκουσμα και με τον τρόπο αυτό ο υπολογιστής διακρίνει που ο χρήστης έχει εστιάσει την προσοχή/βλέμμα/ακοή του.
- The Steady State Visual Evoked Potentials (SSVEP): Η ηλεκτρική δραστηριότητα στην ινιακή περιοχή του εγκεφάλου όπου γίνεται η επεξεργασία των οπτικών ερεθισμάτων, συγχρονίζεται με τη διακύμανση του φωτός μίας παλλόμενης φωτεινής πηγής στην οποία ο χρήστης εστιάζει και την οποία παρατηρεί.
- The Motor Imagery (MI): Ο χρήστης φαντάζεται κάποια κίνησή του σώματός του (πχ τέντωμα βραχίονα) διεγείροντας της αντίστοιχες περιοχές του κινητικού φλοιού του εγκεφάλου του σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων
- The Error related Potential (ErrP): Όταν ο χρήστης προσπαθεί ή επιθυμεί να δώσει μία συγκεκριμένη εντολή αλλά διαπιστώνει ότι επέρχεται το αντίθετο από το αναμενόμενο αποτέλεσμα, εκπέμπει ένα συγκεκριμένο ηλεκτρικό δυναμικό σε συγκεκριμένες περιοχές του εγκεφάλου το οποίο σχετίζεται με την αναγνώριση του σφάλματος που συνέβη.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζουμε την αρχή των SSVEP διότι:

- Είναι αρκετά αξιόπιστη, όπως θα φανεί στη συνέχεια της μελέτης
- Είναι σχετικά «γρήγορη» (responsive) στην ανίχνευση της επιλογής του στόχου (πχ σε σχέση με P300)
- Υπολογιστικά είναι σχετικά απλούστερη η ανίχνευσή της επιλογής των στόχων (πχ σε σχέση με MI)
- Προσφέρει πλήθος διαφορετικών επιλογών ανάλογα με τον αριθμό των παλλόμενων πηγών φωτός.

#### **1.4 Η χρησιμότητα της ανασκόπησης**

Η ανασκόπηση αυτή καθίσταται ενδιαφέρουσα από την άποψη της εύρεσης νέων και αξιόπιστων μεθόδων εναλλακτικής και επαυξητικής επικοινωνίας σε ασθενείς με σοβαρά κινητικά προβλήματα που δεν τους επιτρέπουν να χρησιμοποιήσουν αποτελεσματικά διακόπτες πλήκτρα, τηλεχειριστήρια κλπ. Ο τομέας του BCI και ειδικότερα του SSVEP BCI όπως θα φανεί στη συνέχεια, παρέχει αυτή την αξιοπιστία στην αλληλεπίδραση η οποία αυξάνεται ακόμη περισσότερο με τη χρήση HMD VR, διότι με το μέσο αυτό το οπτικό ερέθισμα που χορηγείται είναι πλήρως ελεγχόμενο και χωρίς «θόρυβο» από το φυσικό περιβάλλον.

Ένα σύστημα SSVEP BCI με HMD VR, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα σύγχρονο εργαλείο στα χέρια εξειδικευμένων θεραπευτών και να αξιοποιηθεί τόσο για την βελτίωση της επικοινωνίας των ασθενών με το περιβάλλον τους όσο και για την αξιολόγηση και τη θεραπεία τους με τη χορήγηση κατάλληλων ερεθισμάτων και την παρακολούθηση της προόδου τους από μία διεπιστημονική ομάδα θεραπευτών.

## 2 Ειδικό Μέρος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η ερευνητική υπόθεση, ο σκοπός και τα ερωτήματα, η μεθοδολογία της ανασκόπησης με έμφαση στη στρατηγική της αναζήτησης, αναλύονται τα αποτελέσματα και γίνεται κριτική αξιολόγησή και σχολιασμός τους.

### 2.1 Σκοπός

Στόχος αυτής της μελέτης είναι η συστηματική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας στο αναδυόμενο αντικείμενο της αλληλεπίδρασης εγκεφάλου υπολογιστή μέσα σε σύγχρονα εικονικά περιβάλλοντα με εμπειρία εμπύθισης (βλ. Ενότητα 1) με απώτερο στόχο την τεκμηρίωση σκοπιμότητας, την κατοχύρωση της εφαρμοσιμότητας και τον εντοπισμό νέων προοπτικών έρευνας.

### 2.2 Ερευνητικά Ερωτήματα

Πιο συγκεκριμένα, τίθενται τα παρακάτω ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία γίνεται προσπάθεια να απαντηθούν μέσα από τη συγκεκριμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση:

- Μπορεί μία διεπαφή εγκεφάλου υπολογιστή (BCI) βασιζόμενη σε οπτικά δυναμικά σταθερής κατάστασης (SSVEP) να εφαρμοστεί μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον με εμπύθιση με τη χρήση μάσκας εικονικής πραγματικότητας (HMD VR);
  - Αν ναι, κατά πόσο αποδίδει σε σχέση με ένα αντίστοιχο συμβατικό σύστημα SSVEP BCI που χρησιμοποιεί μία κοινή οθόνη σταθερού ή φορητού Ηλεκτρονικού Υπολογιστή;
- Ποιες είναι οι παράμετροι εκείνες που καθορίζουν την εφαρμοσιμότητα και την απόδοση ενός συστήματος SSVEP BCI με HMD VR;
- Τι προδιαγραφών εξοπλισμός απαιτείται για μία τέτοια εφαρμογή;
- Μπορεί μία εφαρμογή SSVEP BCI με HMD VR να χρησιμοποιηθεί σε ασθενείς που έχουν υψηλού βαθμού κινητικά προβλήματα (πχ locked in, ALS κλπ);
  - Υπάρχουν αντενδείξεις ή παρενέργειες; Αν ναι, τι είδους;

Όπως θα φανεί στη συνέχεια, η υφιστάμενη βιβλιογραφία, δεν επαρκεί για την απάντηση όλων των παραπάνω ερωτημάτων. Δίνονται ωστόσο κατευθύνσεις και απαντώνται μερικά από τα πιο βασικά ερωτήματα.

### 2.3 Ερευνητική Υπόθεση

Αφορμή για την παρούσα έρευνα αποτελεί η ερευνητική υπόθεση του μελετητή πώς ένα σύστημα BCI SSVEP θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με HMD VR και μάλιστα να είναι πιο αποδοτικό από ένα συμβατικό BCI SSVEP σε οθόνη, επωφελούμενο της απομόνωσης από το περιβάλλον που προσφέρει το HMD VR και συνακόλουθα του πλήρους ελέγχου των οπτικών ερεθισμάτων του χρήστη κατά τρόπο τέτοιο ώστε να περιορίζεται η διάσπαση του χρήστη από περιβαλλοντικό «θόρυβο», δηλαδή από οπτικά ερεθίσματα άσχετα με την οπτική διεπαφή.

Παράλληλα επειδή είναι απολύτως ελεγχόμενο και καταγραφόμενο το σύνολο της

οπτικού ερεθίσματος και της οπτικής (ή και ακουστικής) πληροφορίας που δέχεται ο χρήστης, παρέχεται η δυνατότητα για ακριβέστερη συσχέτιση και κατηγοριοποίηση (classification) των *eeG* σημάτων.

Από την άλλη πλευρά, είναι επίσης γνωστό ότι εφαρμογές HMD VR, κουράζουν και ενίοτε ζαλίζουν το χρήστη μετά από σύντομο χρόνο χρήσης τους, πολύ συντομότερα από ότι οι συμβατικές οθόνες<sup>[8]</sup>. Δεδομένου όμως ότι οι τεχνολογίες αυτές εξετάζονται υπό το πρίσμα της εφαρμογής τους σε ασθενείς σε αποκατάσταση και λαμβάνοντας υπόψη ότι αρκετές φορές οι συνεδρίες δεν υπερβαίνουν τα 20', ο ανωτέρω χρονικός περιορισμός δε θεωρείται απαγορευτικός, σε συνδυασμό με το όφελος που προκύπτει από την πρώιμη και κατά το δυνατόν αποτελεσματικότερη εγκεφαλική και γνωσιακή δραστηριοποίηση του ασθενούς, υπό την προϋπόθεση ότι ιατρικώς δεν αντενδείκνυται η χρήση HMD VR.

## 2.4 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των λέξεων κλειδιών, τους λογικούς συνδυασμούς τους, τις βάσεις δημοσιεύσεων, τη στρατηγική αναζήτησης καθώς και τα κριτήρια εισαγωγής ή αποκλεισμού.

### 2.4.1 Όροι αναζήτησης

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε στην Ενότητα 1, προκύπτουν οι παρακάτω όροι για την περιγραφή του γνωστικού αντικειμένου που ενδιαφέρει τη μελέτη:

- **immersion / immersive**: εμπύθιση, η εμπειρία που βιώνει ο χρήστης χρησιμοποιώντας HMD VR και περιλαμβάνει αφενός την απομόνωση από το πραγματικό περιβάλλον και αφετέρου την αίσθηση φυσικής παρουσίας στο εικονικό περιβάλλον.
- **Head-Mounted Display (HMD)**: Μάσκα-οθόνη, η οποία τοποθετείται στο κεφάλι και περιλαμβάνει οθόνη που καλύπτει την περιοχή των ματιών, σε κοντινή απόσταση από τα μάτια.
- **Virtual Reality (VR)**: Εικονική Πραγματικότητα αποτελείται από ψηφιακά εικονικά περιβάλλοντα που παράγονται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές και επιτρέπουν τη διάδραση του ανθρώπου μαζί τους μέσω ποικιλίας διεπαφών.
- **Electroencephalography (EEG)**: Ηλεκτροεγκεφαλογραφία, μέθοδος ηλεκτροφυσιολογίας, κατά την οποία ηλεκτρικά σήματα που παράγονται από τα νευρικά κύτταρα του εγκεφάλου, συλλαμβάνονται με ειδικά ηλεκτρόδια από την περιοχή του δέρματος του κεφαλιού.
- **Brain Computer Interface (BCI)**: Διεπαφή Εγκεφάλου Υπολογιστή, τεχνολογικό σύστημα που επιτρέπει στον άνθρωπο να στείλει εντολές σε υπολογιστή μέσω της εγκεφαλικής του δραστηριότητας, χωρίς τη χρήση μυών. Συνήθως ο χρήστης λαμβάνει οπτική ανάδραση (feedback) του αποτελέσματος της εντολής του μέσω κάποιας οθόνης.
- **Steady State Visual Evoked Potentials (SSVEP)**: Τα Οπτικά Δυναμικά Σταθερής Κατάστασης αποτελούν διακυμάνσεις της εγκεφαλικής ηλεκτρικής

δραστηριότητας, στην ινιακή περιοχή του εγκεφάλου, σε συγκεκριμένη συχνότητα, και προκαλούνται από οπτικό ερέθισμα με διακύμανση ίδιας συχνότητας.

#### 2.4.2 Λογικοί Συνδυασμοί των όρων αναζήτησης

Οι παραπάνω όροι πρέπει να συνδυαστούν κατάλληλα ώστε να προκύψουν λήμματα αναζήτησης στις ερευνητικές βάσεις δημοσιεύσεων, προκειμένου να εντοπιστούν άρθρα με περιεχόμενο εντός του θέματος της ανασκόπησης.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω φράσεις - λήμματα:

1. ((immersive) OR (headset) OR (HMD) OR (head-mounted display)) AND (VR) AND (eeg) AND (BCI)
2. ((immersive) OR (headset) OR (HMD) OR (head-mounted display)) AND (VR) AND (eeg) AND (BCI) AND (SSVEP)
3. BCI-VR

Συγκεκριμένα ο όρος «((immersive) OR (headset) OR (HMD) OR (head-mounted display)) AND (VR)» χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του HMD VR στο οποίο περιορίζεται η παρούσα μελέτη. Η έννοια του HMD VR πολλές φορές συναντάται με διαφορετικές διατυπώσεις τις οποίες επιχειρεί να καλύψει το παραπάνω λήμμα. Αντίστροφα αρκετές φορές η έννοια του immersive VR επεκτείνεται και σε τεχνολογίες εκτός HMD VR (βλ. Ενότητα 1) και ο συγκεκριμένος όρος επιχειρεί να τις διαχωρίζει ώστε να μην εμφανιστούν κατά την αναζήτηση άρθρα μη σχετικά.

Ο όρος (eeg) AND (BCI) προσδιορίζει το 2<sup>ο</sup> άξονα του αντικειμένου που έχει να κάνει με eeg-based BCI, δηλαδή με διεπαφές εγκεφάλου υπολογιστή, μη επεμβατικές, που βασίζονται σε ηλεκτροεγκεφαλογράφους.

Ο όρος SSVEP που προστίθεται στη 2<sup>η</sup> φράση λήμμα αποσκοπεί στο να απομονώσει εκείνες τις τεχνικές BCI που βασίζονται σε SSVEP και όχι στις υπόλοιπες τεχνικές όπως MI και P300 (βλ. Ενότητα 1.3).

Τέλος χρησιμοποιήθηκε και ο όρος BCI-VR ο οποίος εμφανίζεται στη βιβλιογραφία περιγράφοντας τον αντικείμενο (EEG-based BCI with HMD VR) ωστόσο η χρήση του δεν έχει ακόμη γενικευθεί και για το λόγο αυτό ήταν απαραίτητα και τα δύο πρώτα περιφραστικά λήμματα. Με το 3<sup>ο</sup> αυτό λήμμα, εντοπίζονται δημοσιεύσεις που το χρησιμοποιούν αντί των άλλων συνθετότερων όρων.

#### 2.4.3 Στρατηγική Αναζήτησης

Παρακάτω αναλύεται η στρατηγική αναζήτησης που εφαρμόστηκε, με βάση τους όρους και τους λογικούς συνδυασμούς τους. Η στρατηγική που εφαρμόστηκε αποτελείται από μία επαναληπτική διαδικασία, κατά την οποία, σε κάθε στάδιό της, δοκιμάζονται λέξεις κλειδιά, εντοπίζονται άρθρα, εξετάζονται ετεροαναφορές (citations) με συναφές περιεχόμενο, εμπλουτίζονται οι όροι και οι λογικοί συνδυασμοί τους και σταδιακά επεκτείνεται η αναζήτηση και σε άλλες βάσεις δεδομένων με βάση την εξελισσόμενη εμπειρία του μελετητή. Παρακάτω αναλύεται η στρατηγική αναζήτησης σε βήματα:

1. Αναζήτηση στην pubmed με γενικούς όρους VR AND EEG:
  - Αποτέλεσμα: 140 άρθρα
2. Αναζήτηση στην pubmed για HMD VR AND EEG.  
 Το HMD προσδιορίζεται από το λήμμα: ((immersive) OR (headset) OR (HMD) OR (head-mounted display)).
  - Αποτέλεσμα: 40 άρθρα
3. Κατηγοριοποίηση των άρθρων σε θεματικές κατηγορίες με βάση τίτλο και abstract σε θεματικές κατηγορίες. Εστίαση στην κατηγορία του BCI:
  - Αποτέλεσμα: 9 άρθρα
4. Εκ νέου αναζήτηση σε pubmed με επιπλέον λήμμα "AND BCI":
  - Αποτέλεσμα: 20 άρθρα
5. Αναζήτηση με την προηγούμενη φράση και σε IEEE.
  - Αποτέλεσμα: 10 άρθρα
6. Αναζήτηση με όρο BCI-VR. Φιλτράρισμα των άρθρων με βάση τίτλο και abstract.  
 Αναζήτηση με ετεροαναφορές:
  - Αποτέλεσμα: 35 άρθρα
7. Περιορισμός στο SSVEP και Προσθήκη κριτηρίου χρονολογίας:
  - Αποτέλεσμα: 4 άρθρα
8. Προσθήκη του λήμματος με "AND SSVEP" και εκ νέου αναζήτηση σε pubmed, IEEE και research gate. Προσθήκη - αποκλεισμός άρθρων και αναζήτηση ετεροαναφορών:
  - Αποτέλεσμα: 6 άρθρα

#### 2.4.5 Κριτήρια εισαγωγής ή αποκλεισμού

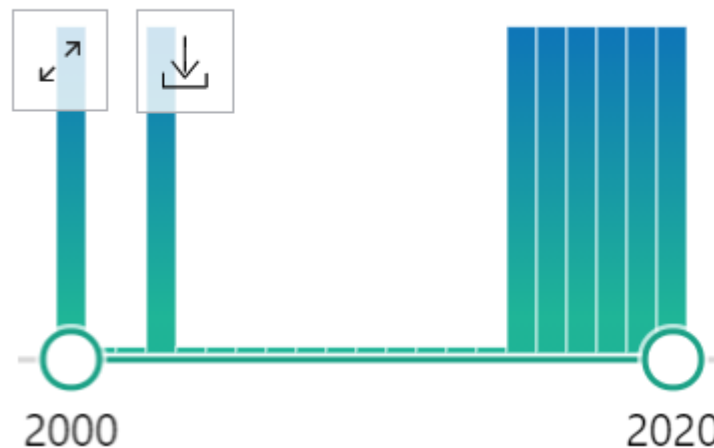
**Κριτήριο 1: Το άρθρο δημοσιεύτηκε από το έτος 2015 και έπειτα;**

Το κριτήριο αυτό προκύπτει αφενός μεν από την καμπύλη του πλήθους των δημοσιεύσεων ανά έτος όπου γίνεται εμφανές ότι οι σχετικές με το αντικείμενο δημοσιεύσεις εκκινούν το 2015 (βλ. Εικόνα 3 και 4) και αφετέρου από τις τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων ετών.

Όσον αφορά τα τεχνολογικά δεδομένα είναι γνωστό ότι οι σύγχρονες συσκευές VR εισάγονται στην αγορά από το 2016 με πιο γνωστές στο χώρο τις εταιρίες Oculus και HTC. VIVE με τις πρώτες προ-εκδόσεις για προγραμματιστές και ερευνητές να είναι διαθέσιμες λίγο νωρίτερα (2012 και 2015 αντίστοιχα). Αυτή η τροπή στην τεχνολογία δίνει το έναυσμα για εκτεταμένη χρήση της εικονικής πραγματικότητας στο χώρο του BCI για ερευνητικούς σκοπούς.

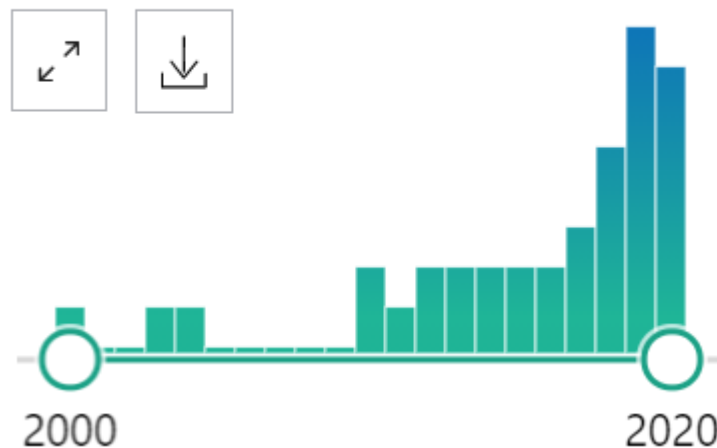


## RESULTS BY YEAR



**Εικόνα 3:** Αποτελέσματα ανά έτος από pubmed για το λήμμα ((immersive) OR (headset) OR (HMD) OR (head-mounted display)) AND (VR) AND (eeg) AND (BCI)

## RESULTS BY YEAR



**Εικόνα 4:** Αποτελέσματα ανά έτος από pubmed για το λήμμα ((immersive) OR (headset) OR (HMD) OR (head-mounted display)) AND (VR) AND (eeg)

**Κριτήριο 2: Περιλαμβάνει το άρθρο εικονική πραγματικότητα με χαρακτηριστικά εμπύθισης και χρήσης μάσκας-οθόνης:**

Πιο συγκεκριμένα:

- Γίνεται χρήση HMD;
- Γίνεται χρήση HMD με αισθητήρες κίνησης ώστε να καταγράφεται η κίνηση του κεφαλιού και ο χρήστης να μπορεί να δει με φυσικό τρόπο μέσα στο εικονικό περιβάλλον και να έχει εμπειρία εμπύθισης;

### **Κριτήριο 3: Το άρθρο περιλαμβάνει διάδραση εγκεφάλου υπολογιστή με οπτικά δυναμικά σταθερής κατάστασης (SSVEP);**

Το κριτήριο αυτό αναλύεται κλιμακωτά σε μία σειρά υποερωτημάτων:

- Περιλαμβάνονται BCI; Δηλαδή διάδραση του χρήστη με τον υπολογιστή μέσω των εγκεφαλικής του δραστηριότητας;
  - Ή μήπως απλώς καταγράφεται η εγκεφαλική δραστηριότητα μόνο για αξιολόγηση χωρίς να παρέχεται η δυνατότητα διάδρασης του χρήστη με τον υπολογιστή μέσω των  *EEG*  σημάτων;
- Το BCI βασίζεται σε ηλεκτροεγκεφαλικό σήμα ( *EEG-based* );
  - Ή πχ περιλαμβάνει μη ηλεκτροεγκεφαλικές μεθόδους όπως πχ  *fMRI* ?
- Το BCI είναι μη επεμβατικό;
  - Ή βασίζεται πχ σε ηλεκτροφλοιογραφία, μέθοδος κατά την οποία τα ηλεκτροεγκεφαλικά σήματα καταγράφονται με εμφύτευση ηλεκτροδίων στο φλοιό του εγκεφάλου, κάτω από το κρανίο;
- Το BCI βασίζεται σε οπτικά δυναμικά σταθερής κατάστασης (SSVEP);
  - Ή αφορά άλλες τεχνικές όπως πχ  *Motor Imagery*  ή  *P300* ;

Με τα παραπάνω ερωτήματα εξεταζόταν σταδιακά κάθε άρθρο πρώτα στον τίτλο και έπειτα στην περίληψη και στο κυρίως σώμα του άρθρου μέχρι να γίνει αποδεκτό. Είναι ενδεικτικό ότι αποκλείστηκαν 29 άρθρα κατόπιν εξέτασης του κυρίου σώματος του άρθρου, καθώς ο τίτλος και η περίληψή τους έδειχναν σχετικά με το αντικείμενο της αναζήτησης. Αυτό οφείλεται σε ένα σημαντικό βαθμό στο ότι οι όροι δεν είναι ακόμη κοινά αποδεκτοί με τον ίδιο τρόπο στη βιβλιογραφία, γεγονός που πιθανόν ερμηνεύεται από το γεγονός ότι το ερευνητικό πεδίο είναι νέο και αναδυόμενο.

## **2.5 Αποτελέσματα Αναζήτησης**

Από την αναζήτηση η οποία πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Ενότητας 2.4 προέκυψαν 6 άρθρα. Οι τίτλοι των άρθρων μαζί με σχετικά μεταδεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Παρατηρούμε ότι από τα 6 άρθρα, 3 προέρχονται από την Κορέα, 2 από την Κίνα και 1 μόνο από την Ευρώπη, γεγονός που εντοπίζει τη σχετική έρευνα στις περιοχές της Άπω Ανατολής.

Όσον αφορά τις βάσεις δημοσιεύσεων τα 4 από τα 6 άρθρα περιλαμβάνονται στις πολύ γνωστές βάσεις δημοσιεύσεων  *IEEE*  και  *PubMed*  ενώ 2 από τα 6 άρθρα - άρθρα με πολύ αξιόλογο περιεχόμενο - περιλαμβάνονται σε λιγότερο γνωστές βάσεις και ουσιαστικά προέκυψαν μέσα από τις ετεροαναφορές ( *citations* ).

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν μία προς μία οι 6 δημοσιεύσεις και θα ακολουθήσει ποιοτική και συγκριτική αξιολόγησή τους.

Τίτλος	Έτη πριν	Αναφέρεται από	Συγγραφείς και Χώρες	Βάση Δεδομένων
1. SSVEP response on Oculus Rift	5	>6	Bonkon Koo and Seungjin Choi, <b>Korea</b>	IEEE
2. Immersive BCI with SSVEP in VR head-mounted display.	5	>=12	Bonkon Koo1 ... and Seungjin Choi, <b>Korea</b>	PubMed, IEEE
3. Investigating Spatial Awareness within an SSVEP-based BCI in Virtual Reality	3	>=1	Piotr Stawicki... Ivan Volosyak, <b>Germany</b>	IEEE
4. High-Speed Spelling in Virtual Reality with Sequential Hybrid BCIs	3	...	Zhaolin YAO ... Hongda CHEN, <b>China</b>	IEICE
5. Comparison of Visual Stimuli for Steady-State Visual Evoked Potential-Based Brain-Computer Interfaces in Virtual Reality Environment in terms of Classification Accuracy and Visual Comfort	1	1	Kang-min Choi... Chang-Hwan Im, <b>Korea</b>	PubMed
6. An online brain-computer interface in mobile virtual reality environments	1	...	Zhaolin Yaoa, ... Hongda CHEN, <b>China</b>	IOS Press

**Πίνακας 1:** Τα αποτελέσματα της αναζήτησης κατά σειρά δημοσίευσης μαζί με σχετικά μεταδεδομένα.

## 2.6 Συνοπτική Παρουσίαση δημοσιεύσεων

Παρακάτω παρουσιάζονται οι δημοσιεύσεις που προέκυψαν από την αναζήτηση σε χρονολογική σειρά από την παλαιότερη προς τη νεότερη.

### 2.6.1 SSVEP response on Oculus Rift, 2015

Η εργασία αυτή δημοσιεύτηκε από Πανεπιστήμιο της Κορέας (Pohang University of Science and Technology). Συγγραφείς είναι οι Bonkon Koo και Seungjin Choi, οι οποίοι συνέχισαν και με επόμενη δημοσίευση στο ίδιο αντικείμενο η οποία θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

#### Τεχνικά Χαρακτηριστικά

**Υποσύστημα VR:** Όσον αφορά το υποσύστημα προβολής χρησιμοποιούν την HMD VR συσκευή Oculus Rift DK1 (Development Kit 1), μία έκδοση που προηγήθηκε των εμπορικών εκδόσεων της σειράς Oculus Rift και αφορούσε κυρίως προγραμματιστές για τη δημιουργία νέων εφαρμογών. Η μάσκα αυτή έχει ανάλυση (pixels) 640x800 για κάθε μάτι που αθροίζει σε 1280x800 συνολικά, ανάλυση που είναι σχετικά χαμηλή με τα σύγχρονα δεδομένα. Έχει επίσης ρυθμό ανανέωσης 60Hz, που σημαίνει πώς κάθε «καρέ» έχει διάρκεια περίπου 17ms, παράμετρος η οποία λαμβάνεται υπόψη στην επιλογή των συχνότητων διέγερσης των οπτικών δυναμικών. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν 5 συχνότητες για το τρεμοσβήσιμο (flickering) των εικονικών αντικειμένων: 5.5Hz, 6.7Hz, 8.6Hz, 10Hz και 12Hz. Το εικονικό περιβάλλον αναπτύχθηκε με τη χρήση της 3D web

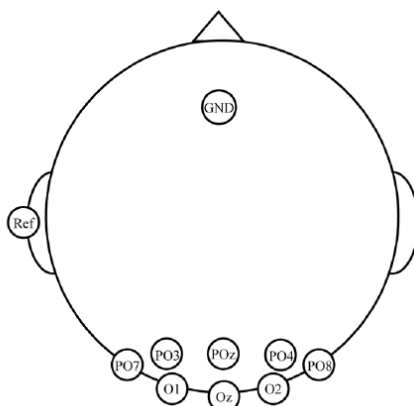
βιβλιοθήκης `three.js`, μέσω της οποίας μπορεί κανείς να προβάλλει 3D γραφικά σε φυλλομετρητή διαδικτύου (`browser`).

**Υποσύστημα EEG:** Όσον αφορά το υποσύστημα σύλληψης, καταγραφής και ανάλυσης των εγκεφαλικών σημάτων, χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτροεγκεφαλογράφος `g.MOBILab+` της εταιρείας `g.tec` με συχνότητα δειγματοληψίας στα 256Hz. Σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist η δειγματοληψία πρέπει να γίνεται με συχνότητα τουλάχιστον διπλάσια της μέγιστης συχνότητας ενδιαφέροντος του σήματος που εν προκειμένω είναι 12Hz, επομένως τα 256Hz είναι μία συχνότητα δειγματοληψίας κατά πολύ μεγαλύτερη και άρα ικανοποιητική. Χρησιμοποιήθηκαν 8 ηλεκτρόδια καταγραφής ηλεκτροεγκεφαλικού σήματος τα οποία τοποθετήθηκαν στις θέσεις O1, Oz, O2, PO3, POz, PO4, PO7, PO8 (βλ. Εικόνα 5) σύμφωνα με το διεθνές σύστημα τοποθέτησης 10-20<sup>[7]</sup>. Η επεξεργασία των σημάτων έγινε με τη χρήση του λογισμικού `Matlab` της εταιρείας `Mathworks`.

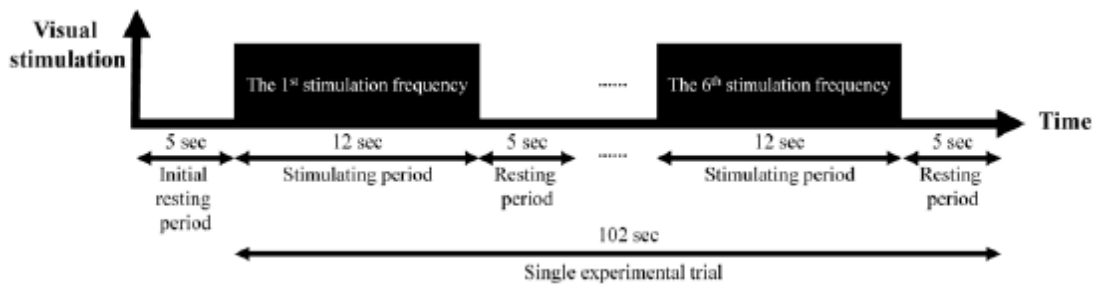
### Πρωτόκολλο

Στο πρωτόκολλο συμμετείχαν 7 ενήλικοι άνδρες, ηλικίας 27 έως 31 ετών, χωρίς προηγούμενη εμπειρία στο σύστημα.

Κάθε χρήστης, φορούσε την HMD και έβλεπε έναν αγγλικό χαρακτήρα να τρεμοσβήνει σε κάθε μία από τις συχνότητες διέγερσης. Οι συμμετέχοντες καλούνταν να εστιάζουν στο εικονικό αυτό αντικείμενο παραμένοντας κατά το δυνατόν ακίνητοι. Η περίοδος διέγερσης σε κάθε συχνότητα διαρκούσε 12s και μετά ακολουθούσε περίοδος ξεκούρασης διάρκειας 5s (βλ. Εικόνα 6). Επομένως το κάθε σετ μετρήσεων διαρκούσε 85s για κάθε συμμετέχοντα και η διαδικασία επαναλαμβανόταν 3 φορές. Η συνολικά διάρκεια του πειράματος για κάθε συμμετέχοντα ήταν περίπου 5 λεπτά.



**Εικόνα 5:** Σχηματική απεικόνιση της κάτοψης του κεφαλιού με τις θέσεις των ηλεκτροδίων λήψης του `eeG` σήματος.



**Εικόνα 6:** Διάγραμμα χρόνου όπου παρουσιάζεται η χρονική αλληλουχία των μετρήσεων στο πρωτόκολλο της πρώτης δημοσίευσης.

### Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αξιολογήθηκαν ως προς τις εξής παραλλαγές:

- Ψηφιακή επεξεργασία των μετρήσεων λαμβάνοντας πρώτα καμία και μετά μία αρμονική της συχνότητας διέγερσης.
- Εντοπισμός βέλτιστου συνδυασμού συχνότητων διέγερσης ανάμεσα στις εξής επιλογές:
  - 1<sup>ο</sup> σετ μετρήσεων: Όλες οι συχνότητες
  - 2<sup>ο</sup> σετ μετρήσεων: Οι 4 χαμηλότερες συχνότητες (χωρίς τα 12Hz)
  - 3<sup>ο</sup> σετ μετρήσεων: Οι 3 χαμηλότερες συχνότητες (χωρίς τα 10Hz και τα 12Hz)

Η βέλτιστη ακρίβεια επιτεύχθηκε χωρίς τις συχνότητες διέγερσης των 10Hz και 12Hz.

Επομένως το σύστημα αποδίδει καλύτερα με χαμηλές συχνότητες διέγερσης.

Όσον αφορά την ανάλυση με και χωρίς την 1<sup>η</sup> αρμονική της συχνότητας διέγερσης προέκυψε ακρίβεια:

- 96% με τη χρήση και της 1<sup>ης</sup> αρμονικής της συχνότητας διέγερσης στην επεξεργασία του ηλεκτροεγκεφαλικού σήματος.
- 92% αντίστοιχα χωρίς τη χρήση της 1<sup>ης</sup> αρμονικής.

Συμπερασματικά, ένα σύστημα SSVEP BCI μπορεί να εφαρμοστεί σε VR HMD με υψηλή ακρίβεια. Οι υψηλές συχνότητες διέγερσης SSVEP πρέπει να αποφεύγονται. Συμπεριλαμβάνοντας στην επεξεργασία του σήματος μία αρμονική της συχνότητας διέγερσης επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στον εντοπισμό του στόχου.

### 2.6.2 Immersive BCI with SSVEP in VR Head-Mounted Display (2015)

Η μελέτη αυτή έχει συνταχθεί επίσης από τους συγγραφείς της προηγούμενης με διαφορά 7 μηνών. Η βασική διαφορά είναι ότι πλέον στους χρήστες προβάλλεται ένα ολοκληρωμένο 3D εικονικό περιβάλλον, ενώ στην προηγούμενη δημοσίευση έβλεπαν απλώς γράμματα να τρεμοσβήνουν.

#### Τεχνικά Χαρακτηριστικά

**Υποσύστημα VR:** Το υποσύστημα προβολής του VR περιεχομένου έχει δύο

παραλλαγές:

- η πρώτη παραλλαγή είναι ίδια με την προηγούμενη δημοσίευση δηλαδή αποτελείται από την HMD VR συσκευή Oculus Rift DK1 με ανάλυση (pixels) 640x800 για κάθε μάτι που αθροίζει σε 1280x800 συνολικά και ρυθμό ανανέωσης 60Hz.
- η δεύτερη παραλλαγή περιλαμβάνει συμβατική οθόνη υπολογιστή με ρυθμό ανανέωσης 60Hz και ανάλυση 1920x1080.

Σε αυτή τη μελέτη αξιοποιούνται τα συμπεράσματα της προηγούμενης και οι μετρήσεις γίνονται με συχνότητες διέγερσης κάτω των 10Hz και συγκεκριμένα στις εξής 4 συχνότητες: 5.5Hz, 6.7Hz, 7.5Hz και 8.6Hz. Το λογισμικό ανάπτυξης του εικονικού περιβάλλοντος δεν προσδιορίζεται.

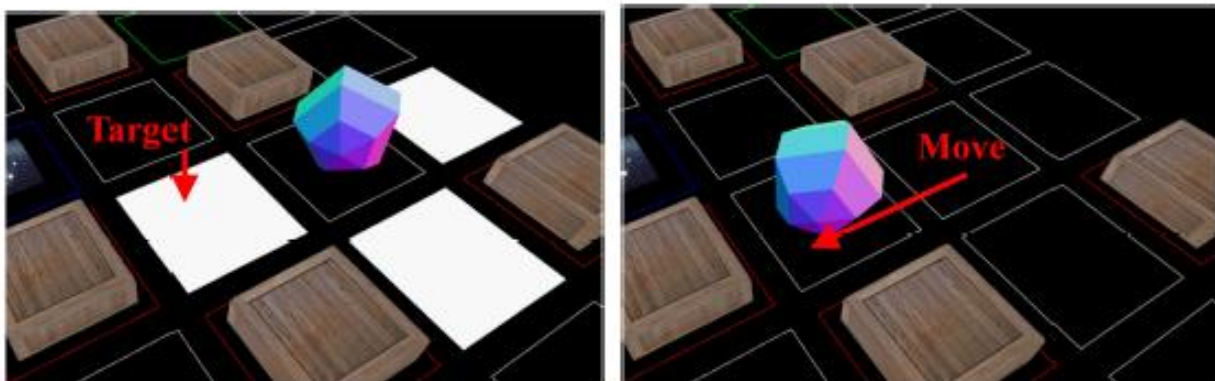
**Υποσύστημα EEG:** Ομοίως και ο ηλεκτροεγκεφαλογράφος παραμένει ο ίδιος με την προηγούμενη δημοσίευση: g.MOBILab+ της g.tec στα 256HZ. Τα ηλεκτρόδια είναι και εδώ 8, ωστόσο οι θέσεις τους είναι λίγο διαφορετικές και συγκεκριμένα είναι οι: Cz, CPz, Pz, PO3, POz, PO4, O1 και O2, σύμφωνα πάντα με το διεθνές σύστημα 10-20<sup>[7]</sup>.

### Πρωτόκολλο

Στις μετρήσεις συμμετείχαν 3 υγιείς ενήλικες άνδρες 25 έως 35 ετών, χωρίς προηγούμενη εμπειρία στο σύστημα.

Αποστολή τους ήταν να μετακινήσουν ένα πολύπλευρο σφαιρικής μορφής μέσα σε ένα εικονικό λαβύρινθο, επιλέγοντας κάθε φορά το σωστό βήμα προκειμένου να φτάσουν στο τέρμα. Οι διάδρομοι του λαβύρινθου αποτελούνταν από τετράγωνα. Τα γειτονικά ως προς την μπάλα τετράγωνα αναβόσβηναν σε διαφορετικές συχνότητες. Ο παίκτης εστίαζε στο τετράγωνο που ήθελε να μετακινήσει την μπάλα και με τον τρόπο αυτό συγχρονιζόταν η εγκεφαλική δραστηριότητα της ινιακής περιοχής του εγκεφάλου του στη συχνότητα που τρεμόσβηνε το τετράγωνο στο οποίο εστίαζε (Εικόνα 7).

Κάθε παίκτης, έπαιζε το παιχνίδι δύο φορές, μία με συμβατική οθόνη υπολογιστή και μία με HMD VR.



(a) Before movement

(b) After movement

**Εικόνα 7:** Στιγμιότυπο από το εικονικό περιβάλλον και το μηχανισμό διάδρασης. Αριστερά τρεμοσβήνουν τα πλακίδια γύρω από τη σφαίρα στα οποία έχει δυνατότητα να μετακινήσει

ο χρήστης τη σφαίρα. Δεξιά η εκτέλεση της εντολής κατά την οποία τα πλακίδια σταματούν να τρεμοσβήνουν και η σφαίρα μετακινείται.

### Αποτελέσματα

Συγκρίθηκε ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων, η ταχύτητα ολοκλήρωσης της αποστολής και η εμπειρία χρήσης ανάμεσα σε συμβατική οθόνη και HMD VR. Επίσης στους συμμετέχοντες δόθηκε ερωτηματολόγιο με κλίμακα από 0-10 και ερωτήματα: «Πόσο «βυθισμένοι» νιώσατε;» και «Πόσο εύκολο ήταν να συγκεντρωθείτε;» μεταξύ οθόνης και HMD VR.

Σε ό,τι αφορά την αξιολόγηση της εμπειρίας χρήσης μέσω ερωτηματολογίου όλοι προέκριναν το HMD VR έναντι της κοινής οθόνης.

Σε ό,τι αφορά το ρυθμό μεταφοράς πληροφορίας (Information Transfer Rate - ITR) και το μέσο χρόνο ολοκλήρωσης του παιχνιδιού το HMD VR υπερείχε σε επιδόσεις έναντι της συμβατικής οθόνης, σύμφωνα με τον Πίνακα 2:

Μέσο	Μέσος Χρόνος Παιχνιδιού	ITR
Οθόνη	37.99 s	22.17 bpm
HMD VR	34.19 s	24.58 bpm

**Πίνακας 2:** Σύγκριση των επιδόσεων σε οθόνη υπολογιστή και HMD VR ως προς το χρόνο ολοκλήρωσης του παιχνιδιού και το ρυθμό μεταφοράς πληροφορίας (ITR).

Συμπερασματικά το οπτικό ερέθισμα σε HMD VR, «αιχμαλωτίζει» (engage) το χρήστη περισσότερο απ' ό,τι σε μία κοινή οθόνη. Το SSVEP BCI έχει μεγαλύτερη απόδοση σε VR απ' ό,τι σε συμβατική οθόνη.

### 2.6.3. Investigating Spatial Awareness within an SSVEP-based BCI in Virtual Reality (2018)

Η μελέτη αυτή προέρχεται από τη Γερμανία και εστιάζει στη διαφορά στην αντίληψη του χώρου ανάμεσα σε δύο συστήματα SSVEP BCI: ένα με συμβατική τεχνολογία οθόνης και ένα με HMD VR.

#### Τεχνικά Χαρακτηριστικά

**Υποσύστημα VR:** Για την προβολή του εικονικού περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκαν δύο τεχνολογίες:

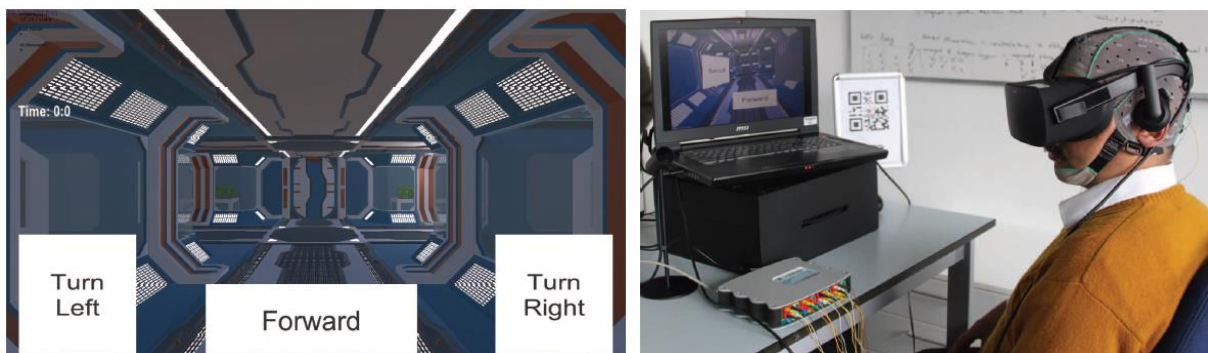
- το HMD VR, Oculus Rift CV1 με ανάλυση 1080x1200 για κάθε μάτι (2160x1200 συνολικά) και συχνότητα ανανέωσης στα 90Hz.
  - Οθόνη laptop FullHD (1920x1080) με ρυθμό ανανέωσης 120Hz.
- Ο σχεδιασμός του εικονικού περιβάλλοντος έγινε με το λογισμικό Unity 3D.

Χρησιμοποιήθηκαν τρεις συχνότητες διέγερσης: 6, 7.5 και 10Hz.

**Υποσύστημα EEG:** Χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτροεγκεφαλογράφος g.USBamp της g.tec με συχνότητα δειγματοληψίας στα 128Hz. Χρησιμοποιήθηκαν 8 κανάλια στις θέσεις Pz, PO3, PO4, O1, O2, Oz, O9 και O10.

### Πρωτόκολλο

Στο πρωτόκολλο συμμετείχαν 6 άνδρες και 1 γυναίκα, με ηλικίες από 21 έως 34 έτη. Οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να πλοηγηθούν σε ένα εικονικό λαβύρινθο, τη μία φορά με τη χρήση HMD VR και την άλλη με τη χρήση συμβατικής οθόνης. Η σειρά με την οποία χρησιμοποίησαν της HMD VR και την οθόνη ήταν τυχαία, για κάθε συμμετέχοντα. Ο χειρισμός της εφαρμογής γινόταν με τη χρήση κάποιων τετραγώνων που τρεμόσβηναν σε διαφορετική συχνότητα το καθένα και τα οποία αντιστοιχούν σε στροφή δεξιά, στροφή αριστερά και ευθεία κίνηση (Εικόνα 8). Τα τετράγωνα αυτά ήταν διαρκώς ορατά στο χρήστη, οπουδήποτε και αν έστρεφε το κεφάλι του.



**Εικόνα 8:** Το εικονικό περιβάλλον (αριστερά) και το σύστημα (δεξιά) εφαρμοσμένο στο χρήστη.

### Αποτελέσματα

Από τις μετρήσεις προέκυψε πώς με HMD VR ο χρόνος ολοκλήρωσης ήταν αισθητά μικρότερος, η ακρίβεια στην επιλογή του στόχου ήταν μεγαλύτερη, ο ρυθμός μεταφοράς πληροφορίας μέσω του SSVEP BCI ήταν μεγαλύτερος και οι παίκτες τερμάτισαν το λαβύρινθο με λιγότερα βήματα (Πίνακας 4). Λόγω του μικρού πλήθους των συμμετεχόντων και της διακύμανσης των επιδόσεων των παικτών η διαφορά στην ακρίβεια δε μπορεί να θεωρηθεί στατιστικά σημαντική, ωστόσο είναι αντιληπτή στις μετρήσεις μία τάση υπέρ του HMD VR έναντι της οθόνης.

Συμπερασματικά το HMD VR συνέβαλλε ουσιαστικά στη μείωση του χρόνου εκπλήρωσης της αποστολής, γεγονός που οφείλεται αφενός μεν στο γεγονός της μεγαλύτερης ακρίβειας, του μεγαλύτερου ρυθμού μεταφοράς πληροφορίας και των λιγότερων βημάτων, αφετέρου δε στο γεγονός ότι ο χρήστης φορώντας στο κεφάλι του ένα σύστημα HMD VR, μπορεί να συλλέξει οπτική πληροφορία μέσα από το εικονικό περιβάλλον, πολύ ταχύτερα και πληρέστερα απ' ό τι μέσα από μία οθόνη.



Μέσο	Χρόνος	Ακρίβεια	ITR	Βήματα
HMD	287.16 s	82.87%	8.82 bpm	51
Laptop	435.79 s	77.69%	5.79 bpm	62

**Πίνακας 3:** τα αποτελέσματα επίδοσης σε εικονικό λαβύρινθο με χρήση HMD VR και συμβατική οθόνη laptop.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι: Η πλοήγηση σε εικονικούς χώρους είναι αποδοτικότερη μέσω HMD VR απ' ό τι μέσω συμβατικής οθόνης σε ένα σύστημα SSVEP BCI καθώς ο χρήστης επιτυγχάνει καλύτερη αντίληψη του εικονικού χώρου με τη χρήση HMD VR.

#### 2.6.4 High-Speed Spelling in Virtual Reality with Sequential Hybrid BCIs (2018)

Το άρθρο αυτό, δημοσιεύτηκε το 2018, από ερευνητές της Κίνας και αφορά στην πληκτρολόγηση μέσω BCI στο χώρο του HMD VR. Συγκεκριμένα εξετάζουν μία υβριδική τεχνική που συνδυάζει SSVEP BCI και παρακολούθηση ματιών (eye gaze) και τη συγκρίνουν με τις αντίστοιχες τεχνικές μόνες τους (μόνο παρακολούθηση ματιών ή μόνο SSVEP BCI).

##### Τεχνικά Χαρακτηριστικά

**Υποσύστημα VR:** Για την προβολή του εικονικού περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκε το HMD VR σύστημα HTC VIVE, με ανάλυση 1080x1200 για κάθε μάτι και συνολικά 2160x1200 και έχει επίσης ρυθμό ανανέωσης οθόνης 90Hz. Η εφαρμογή δημιουργήθηκε με την πλατφόρμα Unity 3D και SteamVR. Οι συχνότητες διέγερσης ήταν οι εξής 4: 12.4, 13.4, 14.4 και 15.4Hz. Στην HMD VR ενσωματώθηκε ειδικός αισθητήρας καταγραφής της κίνησης των ματιών: aGlass DK1 (της Zinvensun) με συχνότητα καταγραφής στα 90Hz.

**Υποσύστημα EEG:** Ο ηλεκτροεγκεφαλογράφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Synamps2 της Neuroscan με συχνότητα καταγραφής στα 256Hz. Χρησιμοποιήθηκαν 9 ηλεκτρόδια στις περιοχές Pz, PO5, PO3, POZ, PO4, PO6, O1, Oz, O2. Η επεξεργασία του σήματος έγινε με κώδικα σε γλώσσα python.

##### Πρωτόκολλο

Στο πείραμα συμμετείχαν 3 υγιείς ενήλικες κατά μέσο όρο 27 ετών, οι οποίοι είχαν προηγούμενη εμπειρία σε όμοια συστήματα. Στον καθένα παρουσιαζόταν ένα εικονικό πληκτρολόγιο 40 στόχων (40 εικονικών πλήκτρων). Ξεκινούσαν με το στάδιο της εκπαίδευσης κατά το οποίο κάθε συμμετέχων έκανε πρώτα 8 επαναλήψεις για κάθε ένα από τους 40 στόχους για επιλογή στόχου με τα μάτια και έπειτα με όμοιο τρόπο έκανε 8 επαναλήψεις για τους 4 κεντρικούς στόχους με SSVEP. Αποστολή του ήταν να εστιάζει κάθε φορά στο στόχο που του υποδείκνυε η εφαρμογή.

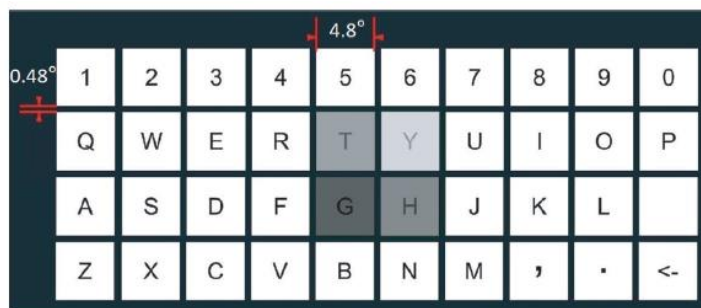
Μετά το στάδιο της εκπαίδευσης ακολουθούσε το στάδιο της δοκιμής όπου

διεξάγονταν 5 γύροι με 40 δοκιμές στον κάθε γύρο, μία για κάθε στόχο. Το σύστημα παρακολουθώντας την κίνηση των ματιών εντόπιζε τους 4 γειτονικούς στόχους στους οποίους κοιτούσε ο χρήστης και στη συνέχεια τρεμόσβηναν μόνο αυτοί οι 4 γειτονικοί στόχοι, με διαφορετική συχνότητα ο καθένας, προκειμένου να εντοπιστεί με ακρίβεια μέσω των eeg σημάτων ποιος ήταν ο στόχος στον οποίο πραγματικά εστίαζε ο χρήστης.

Μετά από τις δοκιμές σε πραγματικό χρόνο (online), ακολούθησε επεξεργασία των μετρήσεων εκ των υστέρων (offline) λαμβάνοντας υπόψη μόνο παρακολούθηση ματιού ή μόνο SSVEP.



**Εικόνα 9:** Διάγραμμα στοιχείων (component mapping) του συστήματος πληκτρολόγησης με SSVEP BCI και HMD VR.



**Εικόνα 10:** Όψη του εικονικού πληκτρολογίου 40 στόχων που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη.

### Αποτελέσματα

Το υβριδικό σύστημα που εκμεταλλευόταν την κίνηση των ματιών για τον εντοπισμό μίας περιοχής στόχων και στη συνέχεια το φαινόμενο SSVEP για τον ακριβή προσδιορισμό του στόχου, πέτυχε καλύτερο ρυθμό μεταφοράς πληροφορίας (ITR) και μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τα συστήματα που χρησιμοποιούσαν είτε μόνο τη μία είτε μόνο την άλλη τεχνολογία. Το υβριδικό σύστημα παρείχε τη δυνατότητα πληκτρολόγησης με ρυθμό 1.25 χαρακτήρες το δευτερόλεπτο (5 χαρακτήρες σε 4 δευτερόλεπτα) που ισοδυναμεί με περίπου 15 λέξεις το λεπτό.

Συμπερασματικά, η υβριδική μέθοδος παρακολούθησης ματιών με SSVEP παρέχει καλύτερη ακρίβεια και απόδοση στη χρήση εικονικού πληκτρολογίου σε σχέση με κάθε μία ξεχωριστά. Η μέθοδος με καταγραφής της κίνησης των ματιών μόνο, παρουσιάζει μικρή ακρίβεια στο χώρο, ιδιαίτερα μάλιστα σε εικονικό πληκτρολόγιο με πολλούς και μικρού

στόχους. Η χρήση μόνο SSVEP BCI σε ένα εικονικό πληκτρολόγιο με τόσους πολλούς στόχους δημιουργεί δυσκολία και κόπωση στο χρήση ενώ και για το σύστημα καθίσταται πιο απαιτητικός ο εντοπισμός και διαχωρισμός τόσων επιμέρους συχνοτήτων.

Σενάριο	Μέση Ακρίβεια	Μέσο ITR
40-class Eye (offline)	63.3%	185.7 bpm
40-class SSVEP (offline)	82,4%	287.0 bpm
40-class Hybrid (online)	95,2%	360.7 bpm

**Πίνακας 4:** Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για πληκτρολόγηση σε εικονικό πληκτρολόγιο μέσα σε περιβάλλον HMD VR με τη χρήση SSVEP BCI και eye gaze.

### 2.6.5 Comparison of Visual Stimuli for Steady-State Visual Evoked Potential-Based Brain-Computer Interfaces in Virtual Reality Environment in terms of Classification Accuracy and Visual Comfort (2019)

Η πρόσφατη αυτή μελέτη εξετάζει το αντικείμενο του SSVEP BCI με HMD VR σε ό,τι αφορά τα σχήματα των στόχων και τον τρόπο εναλλαγής τους. Χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές και συγκρίνονται μεταξύ τους. Στη μία περίπτωση οι στόχοι έχουν τη μορφή ασπρόμαυρης σκακιέρας που εναλλάσσει τα άσπρα τετράγωνα με τα μαύρα και στην άλλη περίπτωση οι στόχοι έχουν τη μορφή αστεριών που αυξομειώνουν το μέγεθός τους.

#### Τεχνικά χαρακτηριστικά

**Υποσύστημα VR:** Χρησιμοποιήθηκε το HMD VR σύστημα HTC VIVE, το οποίο έχει ανάλυση 1080x1200 για κάθε μάτι και συνολικά 2160x1200 και έχει επίσης ρυθμό ανανέωσης οθόνης 90Hz. Χρησιμοποιήθηκαν 4 συχνότητες διέγερσης: 6Hz, 7.5Hz, 9Hz και 10Hz.

**Υποσύστημα EEG:** Ως ηλεκτροεγκεφαλογράφος χρησιμοποιήθηκε ο ActiveTwo της BioSemi με συχνότητα δειγματοληψίας 2kHz. Χρησιμοποιήθηκαν 7 ηλεκτρόδια στις θέσεις: Cz, PO3, POz, PO4, O1, Oz και O2. Η επεξεργασία του σήματος έγινε με το λογισμικό MATLAB.

#### Πρωτόκολλο

Στο πείραμα συμμετείχαν 14 υγιείς ενήλικες ηλικίας  $20.5 \pm 1.6$  ετών. Δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικά είδη ερεθισμάτων (βλ. Εικόνα 11):

- Pattern-Reversal Checkerboard Stimulus (PRCS): αποτελείται από στόχους με μορφή σκακιέρας η οποία εναλλάσσει τα μαύρα με τα άσπρα τετράγωνα με την εκάστοτε συχνότητα διέγερσης.

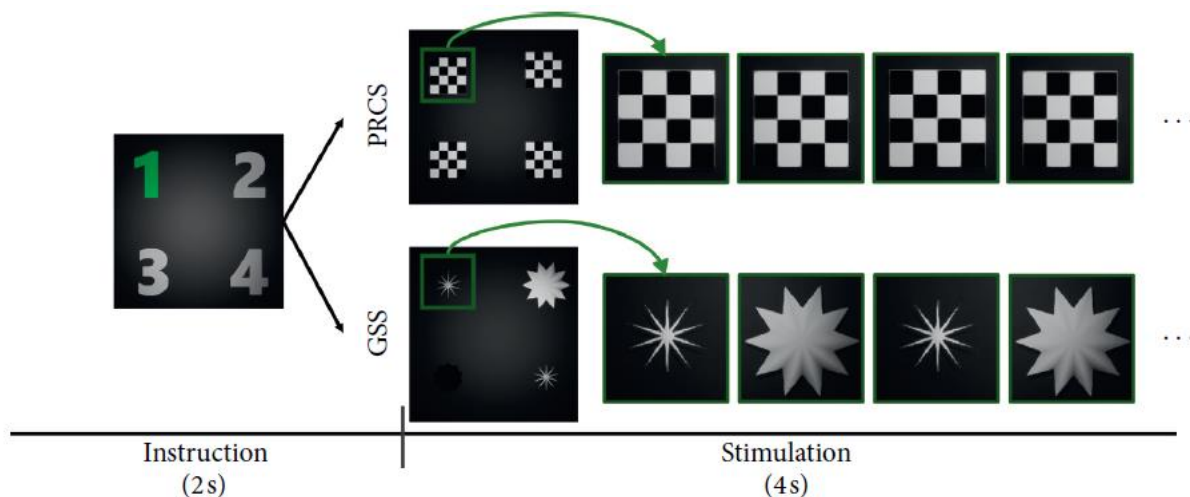
- *Grow/Shrink Stimulus (GSS)*: αποτελείται από στόχους με μορφή αστεριού οι οποίοι αυξομειώνουν το μέγεθός τους με τη συχνότητα διέγερσης.

Οι μετρήσεις ξεκινούσαν με μία προκαταρκτική φάση κατά την οποία οι συμμετέχοντες εντόπιζαν στόχους ανάμεσα σε 4 επιλογές με τη σειρά που υποδείκνυε η εφαρμογή. Δεν υπήρχε κάποιο 3D εικονικό περιβάλλον εκτός από τη διάταξη 2x2 των 4 στόχων (βλ. Εικόνα 11).

Οι στόχοι τρεμόσβηναν για 4s και ακολουθήσε διάλειμμα 2s. Κατά τη διάρκεια του διαλείμματος η εφαρμογή υποδείκνυε με πράσινο χρώμα το στόχο που θα έπρεπε αμέσως μετά ο χρήστης να επιλέξει εστιάζοντας την προσοχή του σε αυτόν. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβανόταν και για τα δύο είδη ερεθισμάτων από 20 φορές για το καθένα (5 φορές για κάθε συχνότητα).

Οι χρήστες δεν έπαιρναν σε πραγματικό χρόνο κάποιο ερέθισμα ανάδρασης. Η επεξεργασία των δεδομένων γινόταν εκ των υστέρων. Στο τέλος της προκαταρκτικής φάσης οι χρήστες δήλωναν ποιου τύπου οπτικό ερέθισμα αισθάνονταν πιο βολικό για τους ίδιους. Με βάση αυτή την αξιολόγηση οι συμμετέχοντες χωρίστηκαν σε 3 κατηγορίες:

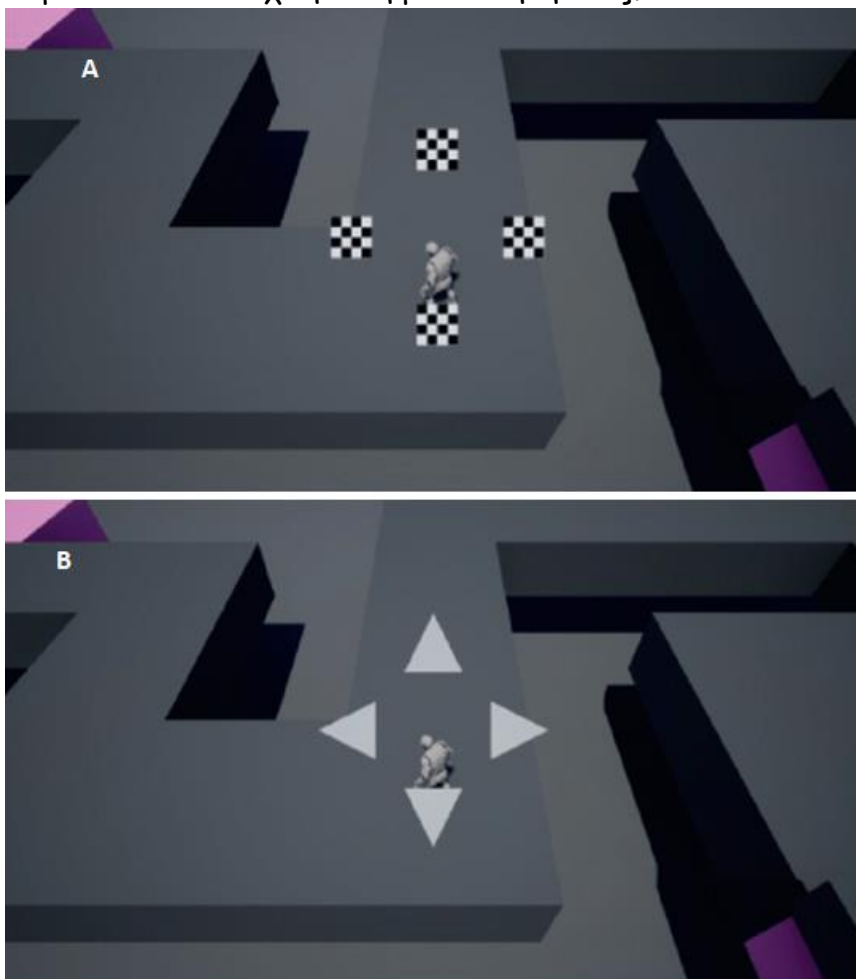
- Όσους αισθάνονταν το PRCS μοτίβο πιο βολικό
- Όσους αισθάνονταν το GSS μοτίβο πιο βολικό και
- Όσους αισθάνονταν εξίσου βολικά και τα δύο μοτίβα.



**Εικόνα 11:** Τα δύο διαφορετικά μοτίβα οπτικού ερεθίσματος που χορηγήθηκαν στους χρήστες, όπως εμφανίζονταν κατά τη φάση της εκπαίδευσης και επιλογής του βολικότερου στο χρήστη. Στην αρχή είναι τα 2s με την οδηγία επιλογής στόχου και μετά ακολουθούν 4s για την επιλογή του στόχου τόσο με το ένα όσο και με το άλλο μοτίβο.

Στη συνέχεια ακολουθούσε η online φάση. Οι χρήστες μέσω του HMD VR, εισέρχονταν σε ένα 3D εικονικό λαβύρινθο όπου καλούνταν να κατευθύνουν ένα avatar (Εικόνα 12). Οι επιλογές για κίνηση ήταν 4: μπροστά, πίσω, αριστερά, δεξιά. Η μετακίνηση του avatar γινόταν βήμα - βήμα. Ο χρήστης έπρεπε να οδηγήσει το avatar ώστε να ακολουθήσει το

μονοπάτι που είχε σχεδιαστεί στο εικονικό περιβάλλον. Υπήρχαν 3 διαφορετικά μονοπάτια και το καθένα αποτελούνταν από 20 βήματα. Κάθε μονοπάτι δοκιμάστηκε τόσο με PRCS όσο και με GSS. Για κάθε βήμα απαιτούνταν 5s, από τα οποία τα 2s ήταν για τον εντοπισμό του στόχου, 1s για το animation της κίνησης και 2s για να δοθεί χρόνος στους χρήστες να επιλέξουν τον επόμενο σωστό στόχο για τη μετακίνησή τους.



**Εικόνα 12:** Στιγμιότυπο που παιχνιδιού με μοτίβα A) PRCS και B) GSS. Διακρίνεται ο ακόμη ο λαβύρινθος και το αναταρ.

### **Αποτελέσματα**

Η ακρίβεια στην επιλογή των στόχων ήταν κατά μέσο όρο 86.2% για το μοτίβο PRCS με τυπική απόκλιση 10.7% και για το μοτίβο GSS ήταν λίγο μεγαλύτερη με μέση τιμή 89.6% και τυπική απόκλιση 11.3%. Η διαφορά τους δε θεωρείται στατιστικά σημαντική.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι κάθε κατηγορία συμμετεχόντων παρουσίαζε μεγαλύτερη ακρίβεια στο μοτίβο με το οποίο αισθανόταν πιο άνετα.

Συμπερασματικά, οι περισσότεροι συμμετέχοντες εμφάνισαν καλύτερα ποσοστά ευστοχίας στο ερέθισμα με το οποίο ένιωθαν πιο άνετα. Στη φάση offline προηγήθηκε στα ποσοστά ευστοχίας το GSS, όμως στη φάση online αποδείχτηκε καλύτερο το πιο βολικό στο χρήστη όπου υπήρχε προτίμηση (Πίνακας 5). Αυτή η διαφορά πιθανόν οφειλόταν στο γεγονός ότι στην online φάση υπήρχε ένα πολύ πιο σύνθετο περιβάλλον με

στοιχεία διάσπασης και όχι ένα μονότονο φόντο.

Κατηγορία προτίμησης	Ακρίβεια PRCS	Ακρίβεια GSS
PRCS	91.7%	78.9%
GSS	88.2%	92.5%
Εξίσου	78.6%	92.4%

**Πίνακας 5:** Αποτελέσματα ακρίβειας για τα μοτίβα PRCS και GSS σε κατηγορίες χρηστών με προτίμηση στο ένα ή στο άλλο ή εξίσου και στα δύο.

### 2.6.6 An online brain-computer interface in mobile virtual reality environments 2019

Η δημοσίευση αυτή, προέρχεται από την Κίνα. Στόχος της είναι να διερευνήσει συστήματα SSVEP BCI με HMD VR σε χρήστες που βρίσκονται σε κίνηση.

#### Τεχνικά Χαρακτηριστικά

**Υποσύστημα VR:** Χρησιμοποιήθηκε το HMD VR σύστημα HTC VIVE, το οποίο έχει ανάλυση 1080x1200 για κάθε μάτι και συνολικά 2160x1200 και έχει επίσης ρυθμό ανανέωσης οθόνης 90Hz. Χρησιμοποιήθηκαν 5 συχνότητες διέγερσης: 9Hz, 10Hz, 11Hz, 12Hz και 45Hz. Το εικονικό περιβάλλον αναπτύχθηκε με τα λογισμικά Unity3D και SteamVR.

**Υποσύστημα EEG:** Ο ηλεκτροεγκεφαλογράφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Symamps2 της Neuroscan σε συχνότητα δειγματοληψίας 1000Hz. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης 9 ηλεκτρόδια στις θέσεις Pz, PO5, PO3, POz, PO4, PO6, O1, Oz και O2. Η επεξεργασία του σήματος έγινε με το Matlab.

#### Πρωτόκολλο

Στις μετρήσεις συμμετείχαν 10 υγιείς ενήλικες, 4 γυναίκες και 6 άνδρες, μέσης ηλικίας 23 ετών. Αποστολή τους ήταν να επιλέξουν, καθ' υπόδειξη, στόχους που τρεμοσβήνουν, καθώς κινούνται σε κυλιόμενο τάπητα στις εξής διαφορετικές ταχύτητες: 0m/s, 0.45m/s, 0.89m/s και 1.34m/s (Εικόνα 13).

Χρησιμοποιήθηκαν δύο εναλλακτικές τοποθετήσεις στόχων:

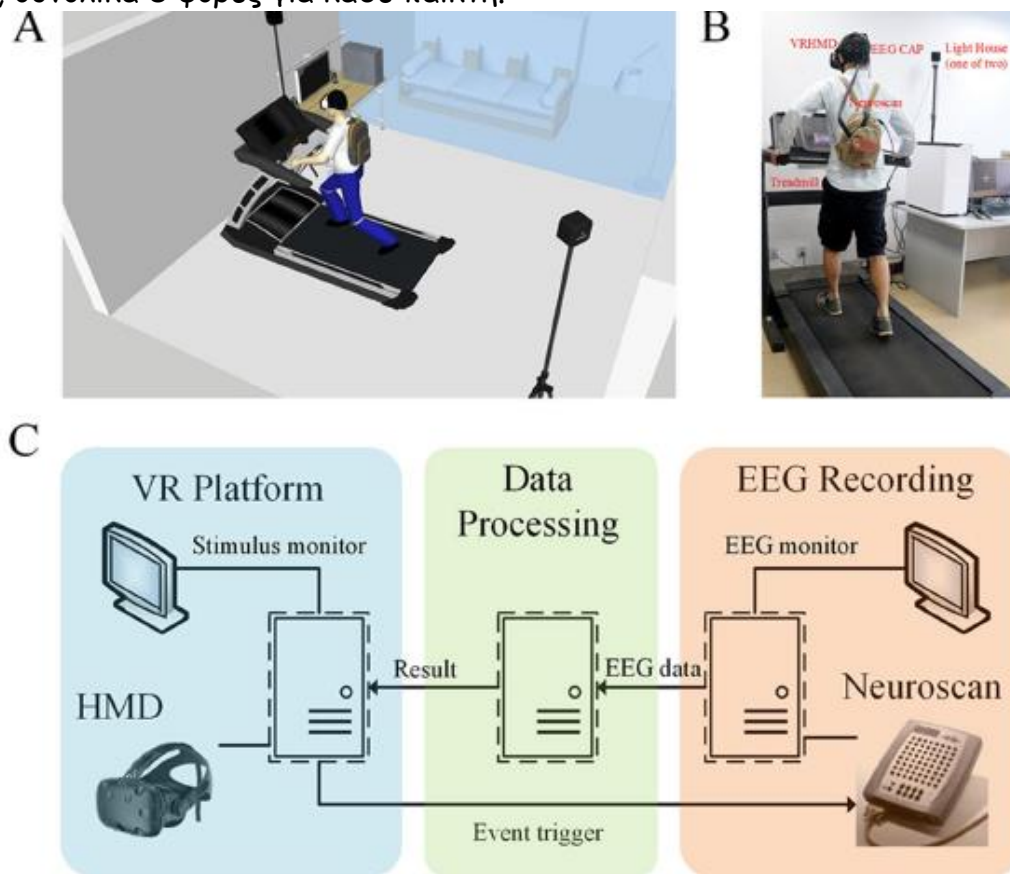
- σταθερή ως προς το έδαφος του εικονικού περιβάλλοντος (earth fixed)
- σταθερή ως προς το οπτικό πεδίο του χρήστη (head fixed).

Και οι δύο εναλλακτικές δοκιμάστηκαν για όλες τις ταχύτητες. Κάθε παίκτης συμμετείχε σε 8 μετρήσεις, μία για κάθε συνδυασμό τύπου στόχου και ταχύτητας.

Συγκεκριμένα, κάθε παίκτης όταν φορούσε την HMD VR και εισερχόταν στον εικονικό κόσμο, έβλεπε ένα εικονικό δωμάτιο και μία διάταξη 5 στόχων σε σχήμα σταυρού

(βλ. Εικόνα 14) . Ο στόχος που έπρεπε να επιλεγεί, πρασίνιζε για 1s για να γίνει αντιληπτό από τον παίκτη που πρέπει να εστιάσει και στη συνέχεια τρεμόσβηναν για 2s μαζί όλοι οι στόχοι, ο καθένας σε μία από τις συχνότητες διέγερσης. Αν ο χρήστης πετύχαινε το στόχο, μέσω του SSVEP BCI, τότε ο στόχος χρωματιζόταν μπλε.

Η διαδικασία επαναλαμβανόταν για κάθε ταχύτητα και κάθε τύπο τοποθέτησης στόχων, συνολικά 8 φορές για κάθε παίκτη.



**Εικόνα 13:** Η διάταξη του συστήματος Α) Φωτορεαλιστική οπτικοποίηση του χρήστη πάνω στον κυλιόμενο τάπητα φορώντας την ΗΜD VR και του υπόλοιπου χώρου διεξαγωγής των μετρήσεων Β) Φωτογραφία από χρήστη κατά την μέτρηση Γ) Διάγραμμα υποσυστημάτων, εικονικής πραγματικότητας, επεξεργασίας δεδομένων και καταγραφής eeg σήματος.



**Εικόνα 14:** Το εικονικό δωμάτιο στο οποίο μεταφερόταν κάθε χρήστης μέσω της HMD VR.

Από τις μετρήσεις προέκυψαν συμπεράσματα για την ακρίβεια επιλογής στόχων και το ρυθμό μεταφοράς πληροφορίας ως προς τις εξής παραμέτρους:

1. Την ταχύτητας βράδισης
2. Την επίδρασης της τοποθέτησης και της εικονικής «στήριξης» των στόχων ως προς το χρήστη και το εικονικό περιβάλλον
3. Τον αλγόριθμο επεξεργασίας του σήματος. Συγκεκριμένα στην online δοκιμή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος filter bank canonical correlation analysis (FBCCA) και εκ των υστέρων (offline) τα δεδομένα επεξεργάστηκαν εκ νέου με τη μέθοδο task related component analysis (TRCA) με την οποία φάνηκε ότι είναι εφικτό να επιτύχει καλύτερες επιδόσεις σε μία online δοκιμή.

#### **Αποτελέσματα**

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που έγιναν παρατηρήθηκε μείωση της ακρίβειας επίτευξης στόχων και του ITR με αύξηση της ταχύτητας βράδισης (Πίνακας 6). Από τους δύο τύπους τοποθέτησης των στόχων υψηλότερη ακρίβεια σε κάθε ταχύτητα επιτεύχθηκε με τους ακίνητους ως προς το εικονικό περιβάλλον στόχους.

Κατά την online δοκιμή η επεξεργασία του ηλεκτροεγκεφαλικού σήματος έγινε με τη μέθοδο filter bank canonical correlation analysis (FBCCA) ενώ στη συνέχεια (offline) έγινε εκ νέου επεξεργασία του σήματος με τη μέθοδο task related component analysis (TRCA). Η δεύτερη μέθοδο επεξεργασίας του σήματος έδειξε ότι θα ήταν εφικτό να αξιοποιηθεί σε online δοκιμές για την μείωση του θορύβου στο σήμα και την επίτευξη καλύτερων επιδόσεων.



Ταχύτητα Βάδισης	Earth fixed		Head fixed	
	Ακρίβεια	ITR (bpm)	Ακρίβεια	ITR (bpm)
0m/s	92.00%	22.49	91.50%	22.20
0.45m/s	83.66%	17.27	66.16%	10.30
0.89m/s	73.66%	13.92	59.50%	7.97
1.34m/s	67.00%	10.66	56.33%	6.87

**Πίνακας 6:** Η ακρίβεια επιλογής στόχου και ο ρυθμός μεταφοράς πληροφορίας (ITR) ανά ταχύτητα βάδισης ως προς τη θέση των στόχων στην online δοκιμή.

## 2.7 Συζήτηση

Οι δημοσιεύσεις στην ενότητα αυτή θα σχολιαστούν σε δύο επίπεδα. Αφενός ως προς τα τεχνικά και ποιοτικά τους χαρακτηριστικά και αφετέρου ως προς τις προοπτικές για νέα έρευνα που διανοίγουν.

### 2.7.1 Συγκριτική Αξιολόγηση

Σε αυτή την υποενότητα γίνεται μία συγκριτική παρουσίαση όλων των δημοσιεύσεων ως προς τα συγκρίσιμα τεχνικά τους χαρακτηριστικά.

Πιο συγκεκριμένα στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού κάθε μελέτης με βάση τον αύξοντα αριθμό της που προκύπτει από την χρονολογία δημοσίευσης.

ΑΑ	Συχνότητες Διέγερσης (Hz)	Ηλεκτρόδια	Ηλεκτρο-Εγκεφαλογράφος	HMD
1	5.5, 6.7, 7.8, 8.6, 10, 12	#8: O1, Oz, O2, PO3, POz, PO4, PO7, PO8	g.MOBILab+ (g.tec)	Oculus Rift DK1
2	5.5, 6.7, 7.5, 8.6	#8: Cz, CPz, Pz, PO3, POz, PO4, O1, O2	g.MOBILab+ (g.tec)	Oculus Rift DK1
3	6, 7.5, 10	#8: Pz, PO3, PO4, O1, O2, Oz, O9, O10	g.USBamp (g.tec)	Oculus Rift CV1
4	12.4, 13.4, 14.4, 15.4	#9: Pz, PO5, PO3, POz, PO4, PO6, O1, Oz, O2	Synamps2 (Neuroscan)	HTC VIVE and aGlass DK1
5	6, 7.5, 9, 10	#7: Cz, PO3, POz, PO4, O1, Oz, O2	ActiveTwo (BioSemi)	HTC VIVE
6	9, 10, 11, 12, 45	#9: Pz, PO5, PO3, POz, PO4, PO6, O1, Oz, O2	Synamps2 (Neuroscan)	HTC VIVE

**Πίνακας 7:** Σύγκριση τεχνικών χαρακτηριστικών εξοπλισμού ανά δημοσίευση.

Μέσω του Πίνακα 7, διαπιστώνουμε ότι:

- Όσον αφορά το υποσύστημα VR κυριαρχούν δύο ανταγωνιστικά μεταξύ τους μοντέλα (Oculus Rift και HTC VIVE). Σημειώνεται εδώ ότι οι συγκεκριμένες εταιρείες έχουν πλέον αναπτύξει νέα προϊόντα με ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά τα οποία αναμένεται να χρησιμοποιηθούν σε επόμενες μελέτες όπως π.ασύρματες HMD όπως Oculus Quest ή HMD με ενσωματωμένο eye tracking όπως HTC VIVE Pro Eye κ.α.
- Όσον αφορά τους ηλεκτροεγκεφαλογράφους με μια απλή αναζήτηση στο διαδίκτυο διαπιστώνει κανείς πως όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι ενσύρματα, δηλαδή καλώδια ξεκινούν από τα ηλεκτρόδια στο κεφάλι και μεταφέρουν το σήμα σε κάποιο ενισχυτή εκτός κεφαλιού. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ασύρματοι φορητοί ηλεκτροεγκεφαλογράφοι, με προδιαγραφές αρκετά υψηλές για να υποστηρίξουν συστήματα BCI (πχ EPOC Flex), οι οποίοι συνδέονται ασύρματα με PC/κινητό/tablet. Και αυτού του είδους ο εξοπλισμός αναμένεται να εμφανιστεί σύντομα στη βιβλιογραφία, λόγω πλεονεκτημάτων που προσφέρει τόσο λόγω της φορητότητάς του όσο λόγω αποφυγής θορύβων από τη μείωση του μήκους των καλωδίων.
- Όσον αφορά τις θέσεις των ηλεκτροδίων καταγραφής eeg σημάτων, διαπιστώνεται ότι σε όλες τις μελέτες έχουν χρησιμοποιηθεί 7-9 ηλεκτρόδια, σε μια ποικιλία θέσεων στην περιοχή O (occipital), P (parietal) και C (central) στο πίσω μέρος του κεφαλιού όπου γίνεται από τον εγκέφαλο η επεξεργασία της οπτικής πληροφορίας. Και στις 6 δημοσιεύσεις χρησιμοποιούνται οι θέσεις: O1, O2, PO3, PO4, ενώ ακολουθούν οι θέσεις Oz και POz σε 5 από τις 6 δημοσιεύσεις. Αυτό υποδηλώνει τη σημασία των θέσεων αυτών στην αποκωδικοποίηση eeg σημάτων από SSVEP.
- Όσον αφορά τις συχνότητες διέγερσης, διαπιστώνεται εύκολα ότι όλες οι συχνότητες που αφορούν επιλογή στόχου βρίσκονται στην περιοχή 5-15Hz. Και αυτό είναι ενδεικτικό του εύρους συχνοτήτων που έχει ερευνηθεί και θεωρείται αξιόπιστο για χρήση σε SSVEP με HMD VR.

Στον Πίνακα 8 παρατίθεται συγκριτική αξιολόγηση των ανωτέρω μελετών υπό τη μορφή PICO (Participants, Intervention, Comparisons, Outcomes). Συνεπώς ο Πίνακας 8, περιλαμβάνει σε συνοπτική μορφή και για όλες τις δημοσιεύσεις, στοιχεία για τους συμμετέχοντες, την παρέμβαση που έγινε, τις παραμέτρους που συγκρίθηκαν και τα πορίσματα της κάθε μελέτης. Για λόγους καλύτερης οπτικοποίησης, αντί του τίτλου κάθε δημοσίευσης εμφανίζεται ο αύξων αριθμός της με βάση τη χρονολογία δημοσίευσης.

AA	Participants	Intervention	Comparisons	Outcomes
1	7 υγιείς ενήλικοι άνδρες, ηλικίας 27 έως 31 ετών, χωρίς προηγούμενη εμπειρία στο σύστημα	Προβολή αγγλικών χαρακτήρων που τρεμοσβήνουν μέσω HMD VR	Ακρίβεια του συστήματος ως προς: - συνδυασμούς συχνότητων διέγερσης - την επεξεργασία σήματος με και χωρίς 1 <sup>η</sup> αρμονική	Υψηλές συχνότητες διέγερσης οπτικών πεδίων πρέπει να αποφεύγονται. Συμπεριλαμβάνοντας μία αρμονική της συχνότητας διέγερσης επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια.
2	3 υγιείς άνδρες 25 έως 35 ετών, χωρίς προηγούμενη εμπειρία στο σύστημα	Μετακίνηση μπάλας σε 3D VR λαβύρινθο με διαδρόμους από τετράγωνα που τρεμοσβήνουν	Απόδοση και ακρίβεια του HMD VR σε σχέση με συμβατική οθόνη υπολογιστή.	Το SSVEP BCI έχει μεγαλύτερη απόδοση σε HMD VR απ' ό τι σε συμβατική οθόνη σε παιχνίδι επίλυσης λαβύρινθου.
3	6 άνδρες και 1 γυναίκα, με ηλικίες από 21 έως 34 έτη	Πλοήγηση μέσα σε VR λαβύρινθο	HMD VR σε σχέση με συμβατική οθόνη.	Η απόδοση ενός συστήματος SSVEP BCI είναι μεγαλύτερη μέσω HMD VR απ' ό τι μέσω συμβατικής οθόνης και ο χρήστης επιτυγχάνει καλύτερη αντίληψη του εικονικού χώρου
4	3 υγιείς ενήλικες κατά μέσο όρο 27 ετών, με προηγούμενη εμπειρία σε όμοια συστήματα	HMD VR που προβάλλει ένα εικονικό πληκτρολόγιο	Απόδοση συστήματος με συνδυασμό SSVEP BCI και ανιχνευτή ματιού σε σχέση με μόνο το ένα από τα δύο.	Η υβριδική μέθοδος ανίχνευσης ματιών και SSVEP παρέχει καλύτερη ακρίβεια και απόδοση στη χρήση εικονικού πληκτρολογίου.
5	14 υγιείς ενήλικες ηλικίας 20.5 ± 1.6 ετών	Πλοήγηση σε 3D μονοπάτια με χρήση διαφορετικών οπτικών ερεθισμάτων	Απόδοση συστήματος με διαφορετικά σχήματα στόχων κι τρόπους προβολής του οπτικού ερεθίσματος.	Οι περισσότεροι συμμετέχοντες εμφάνισαν καλύτερα ποσοστά ευστοχίας στο ερέθισμα με το οποίο ένωσαν πιο άνετα κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας.
6	10 υγιείς ενήλικες, 4 γυναίκες και 6 άνδρες, μέσης ηλικίας 23 ετών.	Κίνηση σε κυλιόμενο τάπητα με χρήση HMD VR και επιλογή στόχων σε VR	Απόδοση συστήματος ως προς - τις ταχύτητες βάρδισης - τον τρόπο τοποθέτησης και «στήριξης» των στόχων στο οπτικό πεδίο του χρήστη - τη μέθοδο επεξεργασίας σήματος	- Η ακρίβειας μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας βάρδισης. - Η ακρίβεια ήταν υψηλότερη στους ακίνητους ως προς το εικονικό περιβάλλον στόχους.

**Πίνακας 8:** Σύγκριση δημοσιεύσεων με κριτήρια PICO.

### 2.7.2 Συνολική αξιολόγηση

Έχοντας αποκομίσει μία σφαιρική εικόνα των δημοσιεύσεων, στην υποενότητα αυτή επιχειρείται μία συνολικότερη αξιολόγηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της.

## Γενικά Συμπεράσματα:

Από το σύνολο των μελετών προκύπτουν τα εξής γενικά συμπεράσματα:

1. Η τεχνική SSVEP BCI είναι κοινά αποδεκτό ότι μπορεί να εφαρμοστεί αξιόπιστα στο χώρο του HMD VR.
2. Το BCI με SSVEP φαίνεται να αποδίδει καλύτερα σε HMD VR απ' ό τι στις συμβατικές οθόνες. Τα αποτελέσματα δεν είναι σε όλες τις δημοσιεύσεις στατιστικά σημαντικά όμως η είναι ορατή η τάση αυτή η οποία διέπει όλες τις σχετικές δημοσιεύσεις.
3. Η γεωμετρία, η θέση των στόχων και ο τρόπος με τον οποίο προβάλλουν οπτικά ερεθίσματα στο μάτι καθώς και η συνολική κίνηση του σώματος επηρεάζουν ισχυρά την απόδοση τέτοιων συστημάτων.

## Περιορισμοί των μελετών:

Παρατηρώντας τις δημοσιεύσεις, ιδιαίτερα μέσα από τον Πίνακα 8 (PICOS), διαπιστώνεται ότι:

- Οι ομάδες των συμμετεχόντων, ήταν μικρές σε μέγεθος και δεν επαρκούσαν για στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα,
- Οι ομάδες των συμμετεχόντων τις περισσότερες φορές δεν ήταν αντιπροσωπευτικές στατιστικά. Στις περισσότερες δημοσιεύσεις οι άνδρες συμμετέχοντες ήταν πολύ περισσότεροι από τις γυναίκες.
- Οι συμμετέχοντες ήταν όλοι υγιείς. Όμως συστήματα BCI παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για ασθενείς με σοβαρές κινητικές και νευρολογικές παθήσεις. Στη σημερινή στάθμη της τεχνικής, ένας υγιής κατά πάσα πιθανότητα θα επιλέξει άλλους τρόπους διάδρασης με ένα εικονικό περιβάλλον, πχ χειριστήρια, κάμερες βάθους κλπ. Σαφώς ένα σύστημα SSVEP BCI με HMD VR, μπορεί μελλοντικά να έχει πολύ καλή εφαρμογή και σε υγιείς, προς το παρόν όμως, δεδομένου και του κόστους του, η αίσθησή μας είναι ότι πρέπει η έρευνα να εστιάσει σε χρήστες με σοβαρά κινητικά προβλήματα που δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν αποτελεσματικά άλλες τεχνολογίες.
- Δεν εντοπίστηκαν τυχαίοποιημένες μελέτες με ομάδες ελέγχου για τη διακρίβωση evidence based παραμέτρων. Η υφιστάμενη βιβλιογραφία επομένως δεν πληρεί ακόμη υψηλές προδιαγραφές evidence based medicine. Παρέχει σαφώς μία ένδειξη που όμως πρέπει να τεκμηριωθεί πιο ισχυρά από επόμενες μελέτες κατάλληλα σχεδιασμένες.
- Ο αριθμός των δημοσιεύσεων, είναι σχετικά μικρός, πρόκειται όμως για ένα αναδυόμενο και εξελισσόμενο πεδίο έρευνας και αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια.

### 2.7.3 Προοπτικές

Με βάση τους περιορισμούς και τα τυχόν αδύνατα σημεία που παρουσιάζει η υφιστάμενη βιβλιογραφία αναδύονται οι παρακάτω προοπτικές για έρευνα στο μέλλον:

- Η εκτίμησή μας είναι ότι ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον θα δημιουργήσουν

υβριδικά BCI συστήματα, τα οποία θα συνδυάζουν περισσότερους από ένα τρόπους αλληλεπίδρασης εγκεφάλου υπολογιστή (πχ SSVEP μαζί με MI ή/και P300) καθώς και άλλες μη συμβατικές τεχνολογίες διάδρασης όπως ανιχνευτές ματιών, ηλεκτρομυογράφους, καρδιογράφους, NIRS, αδρανειακούς αισθητήρες, κάμερες βάθους κλπ.

- Σταδιακά θα οδηγηθούμε σε υβριδικά συστήματα αλληλεπίδρασης με τον υπολογιστή, με σύντηξη αισθητήρων (sensor fusion) σε πλατφόρμες αυξημένης αξιοπιστίας και εμπύθισης. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει και από την εξεταζόμενη βιβλιογραφία ιδίως από τις πιο πρόσφατες μελέτες του 2019. Πέρα από τους ηλεκτροεγκεφαλικούς αισθητήρες, αυτό έχει φανεί ως τάση στην πληθώρα των βιοαισθητήρων που είναι ενσωματωμένοι σε καταναλωτικά προϊόντα τεχνολογικής αιχμής όπως smartwatches, smartphones κλπ.
- Ήδη η βιομηχανία ψηφιακών παιχνιδιών παρέχει εμπορικά προϊόντα που συνδυάζουν πλειάδα αισθητήρων εργοστασιακά ενσωματωμένων στο τελικό προϊόν όπως ανίχνευση κίνησης ματιών (VIVE Pro Eye), πλατφόρμες κίνησης σε πολλές διευθύνσεις κλπ. Αυτού του είδους τα εκτεταμένα συστήματα εμπύθισης αναμένεται να εισαχθούν στην έρευνα σταδιακά.
- Θα είχε αξιοσημείωτο ερευνητικό ενδιαφέρον η χρήση φορητών και ασύρματων ηλεκτροεγκεφαλογράφων. Οι ηλεκτροεγκεφαλογράφοι που χρησιμοποιήθηκαν στη βιβλιογραφία ήταν ενσύρματοι και σχετικά υψηλών προδιαγραφών. Έχει ωστόσο εμφανιστεί στην αγορά μία τάση για φορητούς (wearable) ασύρματους ηλεκτροεγκεφαλογράφους, χαμηλότερων ίσως προδιαγραφών αλλά επαρκούς ακρίβειας για λειτουργία BCI. Το πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι:
  - Είναι ασύρματοι και επομένως:
    - επηρεάζονται λιγότερο από την κίνηση του σώματος, διότι ως γνωστόν τα τραβήγματα και η σχετική κίνηση των ηλεκτροδίων εισάγει θόρυβο στο σήμα που αυξάνεται όσο αυξάνεται η σωματική δραστηριότητα. Αν τα καλώδια παραμένουν σταθερό στερεωμένα εξ' ολοκλήρου στο κεφάλι, οι μετρήσεις θα επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό.
    - επιτρέπουν στο χρήστη ελεύθερη κίνηση στο χώρο. Η πιο πρόσφατη δημοσίευση (No6) προέβλεπε κίνηση σε τάπητα. Με ένα ασύρματο ηλεκτροεγκεφαλογράφο μπορεί κάποιος να έχει κανονική φυσική κίνηση σε οποιοδήποτε έδαφος και κατεύθυνση.
  - Προορίζονται και για το ευρύτερο καταναλωτικό κοινό και όχι μόνο για ειδικούς στο αντικείμενο επιστήμονες. Για το λόγο αυτό:
    - είναι ευκολότεροι και ταχύτερη στην τοποθέτηση.
    - επιτρέπουν μεγαλύτερη συλλογή δεδομένων εφόσον μπορεί ο χρήστης να τους χρησιμοποιήσει από μόνος του, χωρίς εξειδίκευση και χωρίς να βρίσκεται σε εργαστηριακό ή νοσοκομειακό χώρο.

- είναι οικονομικότεροι
- συμβάλουν στην τηλεϊατρική.

Λόγω του ιδιαίτερου ενδιαφέροντος που παρουσιάζουν οι ασύρματοι ηλεκτροεγκεφαλογράφοι, στην επόμενη ενότητα (Ενότητα 3) επιχειρείται μία δοκιμή καταγραφής και ανίχνευσης SSVEP δυναμικών με ασύρματο ηλεκτροεγκεφαλογράφο. Μέσα από τη δοκιμή αυτή προκύπτει ότι τα οπτικά δυναμικά είναι όντως ανιχνεύσιμα. Επομένως μετρήσεις παρόμοιες με αυτές της βιβλιογραφίας πιθανότατα θα μπορούσαν να διεξαχθούν και με ασύρματους ηλεκτροεγκεφαλογράφους επιτυγχάνοντας την ίδια ή και μεγαλύτερη απόδοση (λόγω μείωσης θορύβου) και επιτρέποντας τη δοκιμή σε πολυπληθέστερες ομάδες ανθρώπων.

Με βάση τις Ενότητες 1 και 2, θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι η ανάπτυξη του αντικειμένου της εικονικής πραγματικότητας με εμπύθιση κατά την τελευταία 5ετία, η έντονη ανάπτυξη του χώρου της τεχνητής νοημοσύνης, η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και τέλος η πλέον επιτακτική ανάγκη για εφαρμογές τηλεπαρουσίας λόγω των σύγχρονων επιδημιολογικών δεδομένων, οδηγούν τις σύγχρονες κοινωνίες σε νέους καινοτόμους τρόπους αλληλεπίδρασης ανθρώπου μηχανής - ανάμεσα στους οποίους ιδιαίτερο ενδιαφέρον προσελκύει η απευθείας αλληλεπίδραση εγκεφάλου υπολογιστή BCI - ανοίγοντας με τον τρόπο αυτό νέους ορίζοντες στην αποκατάσταση ασθενών και ειδικότερα στον τομέα της Εναλλακτικής και Επαυξητικής Επικοινωνίας.

### 3 Επιβεβαίωση της Αρχής των SSVEP με τη χρήση ασύρματου ηλεκτροεγκεφαλογράφου (Proof of Concept)

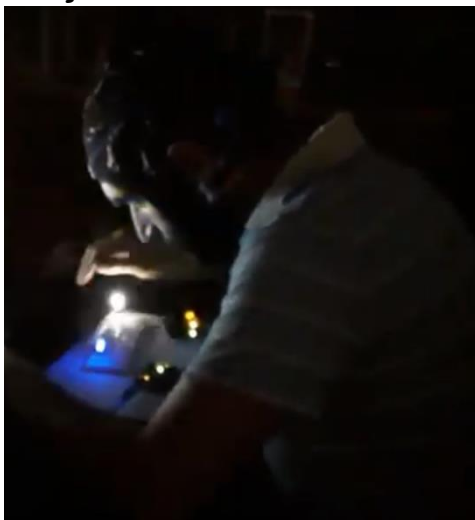
Λόγω του ιδιαίτερου ενδιαφέροντος που παρουσιάζει η χρήση SSVEP BCI με ασύρματους, αντί για ενσύρματους, ηλεκτροεγκεφαλογράφους, όπως τονίστηκε στην Ενότητα 2 - προσέγγιση η οποία απουσιάζει από τη βιβλιογραφία - στην παρούσα Ενότητα γίνεται πειραματικά μία διερεύνηση της ανιχνευσιμότητας των SSVEP με τον ασύρματο ηλεκτροεγκεφαλόγραφο EPOC Flex της Emotiv.

#### 3.1 Σχεδιασμός πειράματος

Ένας υγιής ενήλικας, ηλικίας 33 ετών, χωρίς προηγούμενη εμπειρία σε SSVEP εκτίθεται σε δύο φωτεινές πηγές τεχνολογίας LED - χωρίς χρήση HMD VR - διαφορετικού χρώματος, μπλε και άσπρου, οι οποίες τρεμοσβήνουν σε διαφορετικές συχνότητες, 4Hz και 10Hz αντίστοιχα.

Οι δύο φωτεινές πηγές τοποθετούνται στο μέσον του χρήστη πάνω σε ένα τραπέζι. Η μία φωτεινή πηγή (μπλε) βρίσκεται στα αριστερά του και η άλλη φωτεινή πηγή (άσπρη) βρίσκεται στα δεξιά του, είναι όμως αρκετά κοντά μεταξύ τους, ώστε να βρίσκονται εντός του οπτικού πεδίου του χρήστη (Εικόνα 15).

Ο χρήστης τοποθετείται σε σκοτεινό δωμάτιο για τον περιορισμό των οπτικών ερεθισμάτων του περιβάλλοντος.



**Εικόνα 15:** Στιγμιότυπο του πειράματος. Διακρίνεται ο συμμετέχων φορώντας το φορητό ηλεκτροεγκεφαλόγραφο καθώς και τα δύο LEDs (μπλε και άσπρο) τα οποία κοιτάζει μέσα σε σκοτεινό δωμάτιο.

#### 3.2 Εξοπλισμός (Hardware)

Ο εξοπλισμός αποτελείται από:

- τον ηλεκτροεγκεφαλόγραφο EPOC Flex της Emotiv (Εικόνα 16) με συχνότητα δειγματοληψίας 129 samples per second,
- 2 μικροεπεξεργαστές arduino uno, ένα για κάθε LED,
- 1 breadboard ηλεκτρονικών για την κατασκευή των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων

και

- 2 φωτεινές πηγές LED, διαφορετικού χρώματος για μεγαλύτερη αντίθεση μεταξύ τους (μία άσπρη και μία μπλε).



**Εικόνα 16:** Ο φορητός ηλεκτροεγκεφαλογράφος EPOC Flex της Emotiv σε πλάγια όψη και πίσω όψη.

### 3.3 Λογισμικό (Software)

Η καταγραφή του eeg σήματος γίνεται με το λογισμικό Emotiv Pro, της κατασκευάστριας εταιρείας του ηλεκτροεγκεφαλογράφου EPOC Flex. Η επεξεργασία και η ανάλυση του σήματος γίνεται με το λογισμικό Matlab, σε δεύτερο χρόνο (offline), δηλαδή μετά την καταγραφή των μετρήσεων.

Ο προγραμματισμός των μικροεπεξεργαστών Arduino έγινε με την εφαρμογή Arduino web editor.

### 3.4 Δειγματοληψία

Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν πάνω από την ινιακή περιοχή του εγκεφάλου και συγκεκριμένα στα σημεία: O1, Oz, O2, CPz και Iz, σύμφωνα με το διεθνές σύστημα 10-20<sup>[7]</sup>. Η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν στα 129 samples/second.

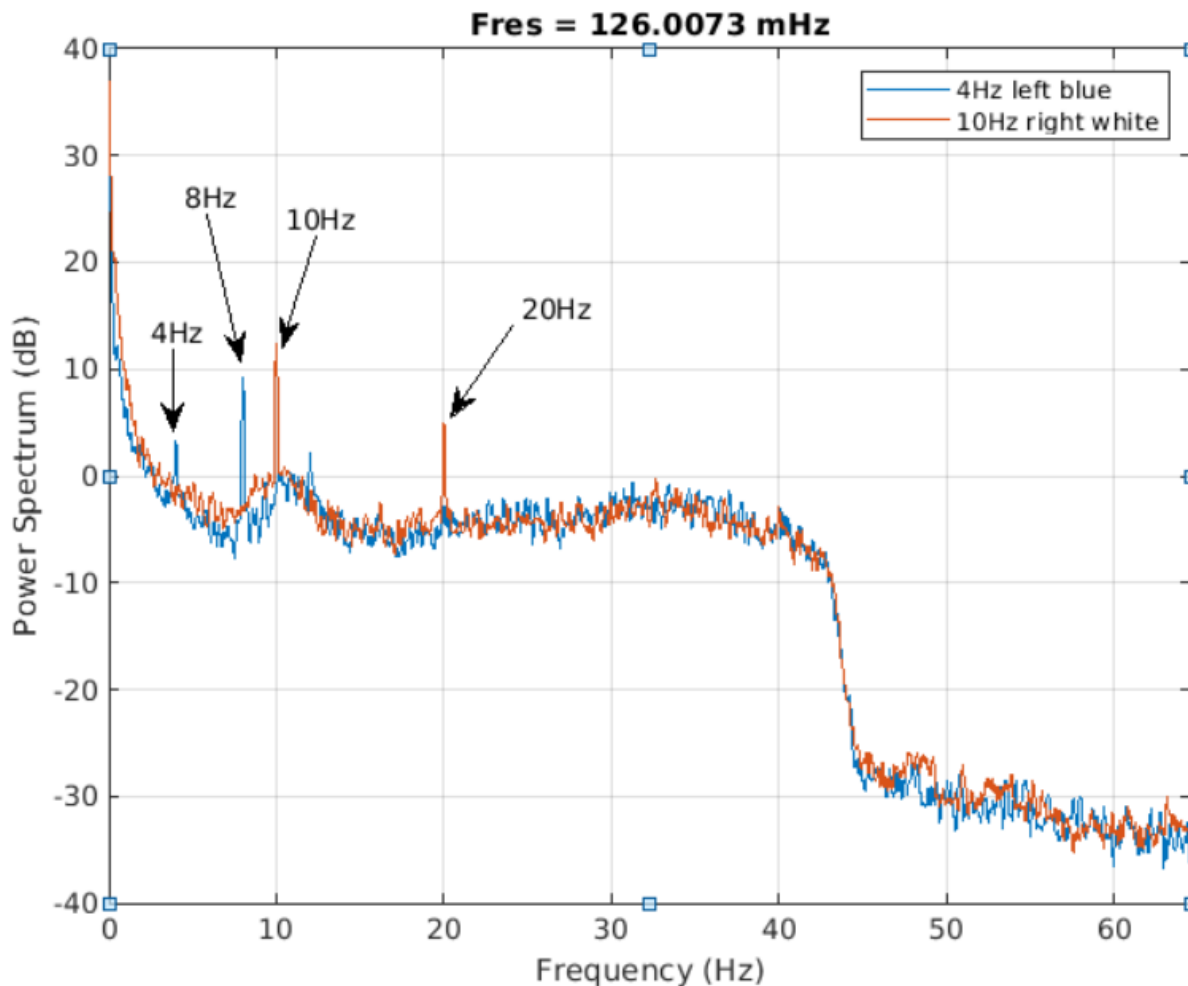
### 3.5 Αποτελέσματα

Για λόγους μείωσης του θορύβου στο σήμα, τα σήματα από τα 5 σημεία λήψης σταθμίστηκαν και προέκυψε έτσι ένα σήμα το οποίο αποτελεί τον μέσο όρο των 5 σημάτων. Στη συνέχεια το σήμα αυτό αναλύθηκε στο πεδίο της συχνότητας μέσω φάσματος ισχύος (power spectrum) και στο πεδίο χρόνου - συχνότητας μέσω Short Time Fast Fourier Transform.

Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται η ανάλυση του φάσματος ισχύος όπου φαίνονται ευδιάκριτα οι αιχμές ενέργειας των συχνοτήτων διέγερσης και των αρμονικών τους. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν μεμονωμένα για κάθε συχνότητα, πρώτα με το ένα και μετά με το άλλο LED, προκειμένου να μπορούν να αντιπαρατεθούν και να φανεί η διαφορά στο πεδίο



των συχνοτήτων.



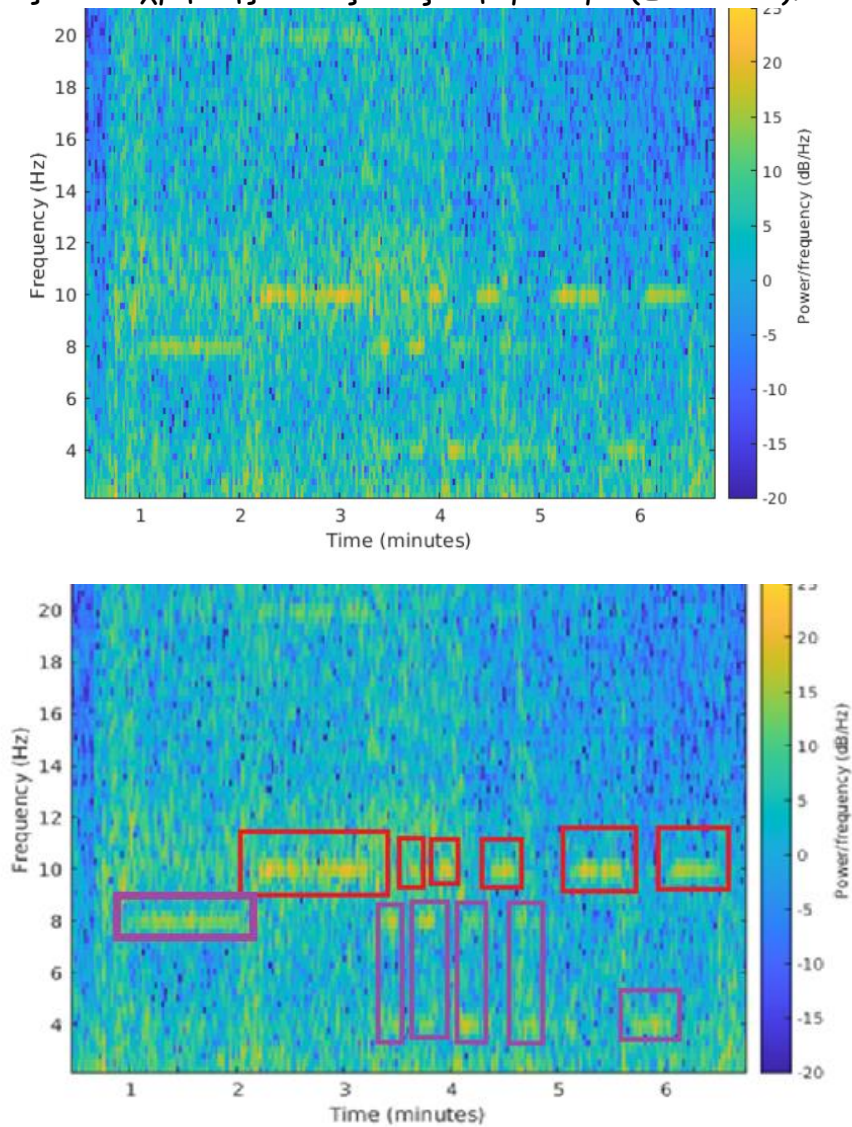
**Εικόνα 17:** Τα φάσματα ισχύος για διέγερση μόνο με 4Hz με το μπλε LED (μπλε γραμμή) και μόνο με 10Hz με το λευκό LED (κόκκινη γραμμή). Διακρίνονται εμφανώς οι αιχμές ισχύος στις συχνότητες διέγερσης και στην πρώτη αρμονική τους. Συγκεκριμένα στην μπλε γραμμή διακρίνονται αιχμές στα 4Hz και στην πρώτη αρμονική  $2 \times 4 = 8\text{Hz}$ . Ομοίως στην κόκκινη γραμμή διακρίνονται οι αιχμές στα 10Hz και στην πρώτη αρμονική  $10 \times 2 = 20\text{Hz}$ .

Στη συνέχεια ακολούθησε δοκιμή, κατά την οποία κατά δύο LEDs τρεμόσβηναν, το μεν μπλε LED στα 4Hz, το δε άσπρο στα 10Hz. Σε αυτή τη δοκιμή ο χρήστης εστίαζε τότε στη μία και τότε στην άλλη φωτεινή πηγή.

Ακολούθησε ανάλυση του σήματος στο πεδίο χρόνου-συχνότητας (time frequency) προκειμένου να φανούν τόσο οι ενέργειες των συχνοτήτων του σήματος όσο και τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία διεγείρεται ο εγκέφαλος σε κάθε συχνότητα (Εικόνα 18).

Στην ανάλυση του σήματος στο πεδίο χρόνου συχνότητας βλέπουμε πρώτα μεν την περίοδο καταγραφής baseline, όπου είναι στην ουσία μία περίοδος χαλάρωσης για το χρήστη, πρώτα με ανοικτά και έπειτα με κλειστά μάτια, η οποία διαρκεί το 1<sup>ο</sup> λεπτό και κατά την οποία δεν υπάρχει κάποιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό.

Στη συνέχεια όμως του ηλεκτροεγκεφαλογράφηματος βλέπουμε ως οριζόντιες κίτρινες παύλες τις συχνότητες των ηλεκτροεγκεφαλικών δυναμικών που προκύπτουν από τα σήματα φωτός που παράγουν τα LEDs (Εικόνα 18). Παρατηρώντας το αντίστοιχο γράφημα, παρά το θόρυβο που περιέχει, μπορούμε να ξεχωρίσουμε χωρίς δυσκολία τις χρονικές στιγμές που ο χρήστης κοιτάζε δεξιά ή αριστερά (Εικόνα 18).



**Εικόνα 18:** Ανάλυση χρόνου - συχνότητας (time-frequency) του ηλεκτροεγκεφαλικού σήματος για ταυτόχρονη διέγερση με 4Hz και με 10Hz. Πάνω το διάγραμμα αυτούσιο και κάτω το ίδιο διάγραμμα με επισήμανση στις περιοχές με διέγερση. Το μοβ πλαίσιο στην κάτω εικόνα αντιστοιχεί σε διέγερση στα 4Hz και στα 8Hz που αντιστοιχεί σε οπτική εστίαση στο μπλε LED στα αριστερά του χρήστη. Ομοίως το κόκκινο πλαίσιο αντιστοιχεί σε διέγερση στα 10Hz και οπτική εστίαση στο άσπρο LED στα δεξιά του χρήστη.

Συμπερασματικά, με τη χρήση του ασύρματου ηλεκτροεγκεφαλογράφου EPOC Flex, ανιχνεύονται τα οπτικά δυναμικά SSVEP και μέσω αυτών ο στόχος που εστιάζει το βλέμμα ο χρήστης. Επομένως θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον μία επόμενη μελέτη που θα έκανε χρήση ενός ασύρματου SSVEP BCI σε συνδυασμό με ένα ασύρματο HMD VR, διάταξη η οποία θα επέτρεπε τη διερεύνηση πλειάδας σεναρίων τόσο για ασθενείς με σοβαρά κινητικά προβλήματα όσο και σε υγιείς πληθυσμούς.

## 4. Βιβλιογραφία

- [1] Bonkon Koo, Seungjin Choi: SSVEP response on Oculus Rift. The 3rd International Winter Conference on Brain-Computer Interface 2015.
- [2] Bonkon Koo, Hwan-Gon Lee, Yunjun Nam, Seungjin Choi. Immersive BCI with SSVEP in VR head-mounted display. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2015, 2015:1103-1106.
- [3] Piotr Stawicki, Felix Gembler, Cheuk Yin Chan, Mihaly Benda, Aya Rezeika, Abdul Saboor, Roland Grichnik, Ivan Volosyak: Investigating Spatial Awareness within an SSVEP-based BCI in Virtual Reality. 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC).
- [4] Zhaolin YAO, Xinyao MA, Yijun WANG, Xu ZHANG, Ming LIU, Weihua PEI, Hongda CHEN: High-Speed Spelling in Virtual Reality with Sequential Hybrid BCIs. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 2018 Vol.E101-D No.11 pp.2859-2862.
- [5] Choi KM, Park S, Im CH. Comparison of Visual Stimuli for Steady-State Visual Evoked Potential-Based Brain-Computer Interfaces in Virtual Reality Environment in terms of Classification Accuracy and Visual Comfort. *Comput Intell Neurosci.* 2019, 2019:9680697.
- [6] Yao Zhaolina, Wang Yijuna, Yang Chenc, Pei Weihua, Gao Xiaorongc, Chen Hongda: An online brain-computer interface in mobile virtual reality environments. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 345-360.
- [7] 10-20 system (EEG): [en.wikipedia.org/wiki/10%E2%80%9320\\_system\\_\(EEG\)](https://en.wikipedia.org/wiki/10%E2%80%9320_system_(EEG))
- [8] Virtual Reality: [en.wikipedia.org/wiki/Virtual\\_reality](https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_reality)
- [9] Simulation Sickness: [en.wikipedia.org/wiki/Simulator\\_sickness](https://en.wikipedia.org/wiki/Simulator_sickness)
- [10] Brain Computer Interface: [en.wikipedia.org/wiki/Brain-computer\\_interface](https://en.wikipedia.org/wiki/Brain-computer_interface)