



ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**ΝΕΥΡΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ**

Διευθυντής ΠΜΣ: Αναπλ. Καθηγητής ΕΥΘΥΜΙΟΣ Γ. ΔΑΡΔΙΩΤΗΣ

**Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία**

(Ο ρόλος του ηλεκτροεγκεφαλογράφηματος στη Νευροαποκατάσταση: Βιβλιομετρική ανάλυση και ανάλυση περιεχομένου)

Αθανασία Τσιάμαλου  
Νοσηλεύτρια

Υπεβλήθει για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης  
<<ΝΕΥΡΟΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ>>

Λάρισα, 8 Σεπτεμβρίου 2021

<< Βεβαιώνω ότι η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αποτέλεσμα δικής μου δουλειάς και δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής. Στις δημοσιεύσεις ή μη δημοσιευμένες πηγές έχω χρησιμοποιήσει εισαγωγικά και όπου απαιτείται έχω παραθέσει τις πηγές τους στο τμήμα της βιβλιογραφίας>>

Υπογραφή:

ΑΘΑΝΑΣΙΑ ΤΣΙΑΜΑΛΟΥ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Επιστημών Υγείας, Τμήμα Ιατρικής 2021

ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
*ΕΥΘΥΜΙΟΣ Γ. ΔΑΡΔΙΩΤΗΣ*  
*ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΝΕΥΡΟΛΟΓΙΑΣ*  
*ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ*

**Επιβλέπων:**

Σγάντζος Μάρκος Τμήμα Νευρολογίας

**Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:**

- 1 Σγάντζος Μάρκος (επιβλέπων)
- 2 Δαρδιώτης Ευθύμιος
- 3 Μπρότης Αλέξανδρος

**Τίτλος εργασίας στα αγγλικά:**

**"The Role of EEG in Neurorehabilitation: A Bibliometric and Content Analysis"**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

**Ευχαριστώ τους αξιότιμους καθηγητές μου κ. Σγάντζο Μάρκο, κ. Δαρδιώτη Ευθύμιο, κ. Μπρότη Αλέξανδρο, για την υποστήριξη και την καθοδήγηση τους σε όλη την πορεία των σπουδών και της εκπόνησης της εργασίας μου, καθώς και τον κ. Πατεράκη Κωνσταντίνο, κ. Λιάμπα Ιωάννη και κ. Σιώκα Βασίλειο για τις πολύτιμες συμβουλές τους.**

**ΑΘΑΝΑΣΙΑ ΤΣΙΑΜΑΛΟΥ**

## Περίληψη

**Σκοπός:** Ο πρωταρχικός στόχος της τρέχουσας βιβλιομετρικής μελέτης ήταν να εντοπίσει το γνωστικό υπόβαθρο σχετικά με τη χρήση του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος (ΗΕΓ) στη σύγχρονη νευροαποκατάσταση. Ανάμεσα στους δευτερεύοντες σκοπούς ήταν να εξεταστεί το τρέχον ερευνητικό μέτωπο για το υπό μελέτη θέμα και να αποτυπωθεί το κοινωνικό δίκτυο της σχετικής επιστημονικής κοινότητας.

**Μέθοδοι:** Αναζητήσαμε άρθρα με κύριο θέμα τη χρήση του ΗΕΓ στη νευροαποκατάσταση στην ιατρική βάση δεδομένων «Scopus». Με την βιβλιογραφική ανάλυση εντοπίσαμε τις πιο παραγωγικές χώρες, τις εργασίες με το μεγαλύτερο αντίκτυπο στην σύγχρονη αρθρογραφία, και τις πιο συχνές θεματικές ενότητες. Επιπλέον, αποτυπώσαμε τα μεγαλύτερα δίκτυα συνεργασίας ανάμεσα σε Πανεπιστήμια και χώρες. Τέλος, πραγματοποιήσαμε μια ανασκόπηση περιεχομένου βασισμένη στα 20 κορυφαία άρθρα με τις περισσότερες αναφορές.

**Αποτελέσματα:** Η τρέχουσα βιβλιομετρική μελέτη βασίστηκε σε ένα σύνολο 874 εγγραφών από 420 πηγές. Οι ΗΠΑ, η Ιταλία και η Γερμανία ήταν οι πιο παραγωγικές χώρες. Η μελέτη με τίτλο «*Brain-computer interfaces, a review*» των *Nicolas-Alfonso et al.* ήταν η έρευνα με την μεγαλύτερη συχνότητα έτερο αναφορών, ακολουθούμενη από το «*Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation*» από τους *Daly J.* και *Wolpaw JR.* Παρατηρήσαμε μετατόπιση του επιστημονικού ενδιαφέροντος από τη χρήση της "λειτουργικής μαγνητικής απεικόνισης" προς τη "διεπαφή εγκεφάλου-μηχανής", "νοερών εικόνων κίνησης" (*motor imagery*) και "βαθιά μάθηση" σταδιακά. Παρατηρήθηκαν επίσης περιορισμένης έκτασης διεθνείς συνεργασίες, κυρίως γύρω από το Πανεπιστήμιο του Lund.

**Συμπεράσματα:** Το ΗΕΓ αποτελεί το εύχρηστο σήμα εισόδου στις διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή για τη νευροαποκατάσταση ασθενών με αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο, αμυοτροφική πλευρική σκλήρυνση και τραυματισμό εγκεφάλου ή σπονδυλικής στήλης, διευκολύνοντας την αισθητικοκινητική ανατροφοδότηση κατά την προπόνηση, την επικοινωνία, τον έλεγχο του περιβάλλοντός τους και τη χρήση εξωσκελετού. Μελλοντικά, αναμένεται βελτίωση και ευρύτερη διαθεσιμότητα της διεπαφής εγκεφάλου-υπολογιστή με την ανάπτυξη πιο αξιόπιστων αλγορίθμων φιλτραρίσματος του ΗΕΓ.

**Λέξεις – Κλειδιά:** ΗΕΓ, εγκεφαλικό επεισόδιο, τραυματική εγκεφαλική βλάβη, νευροαποκατάσταση, διεπαφή εγκεφάλου-μηχανής.

## **Abstract**

**Aim:** Our current bibliometric study's primary aim was to identify the knowledge base on EEG use in neurorehabilitation. Our secondary aims were to examine the research front on the topic under study and produce a social network structure of the associated scientific community.

**Methods:** A search for articles related to the use of EEG in neurorehabilitation was conducted in Scopus. A descriptive analysis retrieved evidence on the most productive countries, the most cited papers, and the most common author's keywords. In a network extraction process, we performed three sub-analyses, including a collaboration analysis according to Universities and countries, a co-citation analysis based on the authors, and a word co-occurrence analysis according to the author's keywords. A content review based on the top-20 most cited articles completed our study.

**Results:** Our current bibliometric study was based on a total of 874 records from 420 sources. The USA, Italy, and Germany were the most productive countries. The study titled "Brain-computer interfaces, a review" by Nicolas-Alfonso et al., was the most cited record, followed by the "Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation" written by Daly J. and Wolpaw JR. The research hotspots changed with time from the use of "functional magnetic imaging" to "brain-machine interface", "motor imagery", and "deep learning". Equally important, international co-operations were limited to specific research groups without major collaborations or contributions from the major key players.

**Conclusions:** EEG constitutes the most critical input signal in the brain-computer interfaces (BCI). EEG-based BCI can be used successfully in the neurorehabilitation of patients with stroke, amyotrophic lateral sclerosis, and traumatic brain and spinal injury by facilitating sensorimotor feedback during training, communication, control of their environment, and the use of exoskeleton. Things are expected to change with the improvement and broader availability of BCI and EEG filtering algorithms.

**Keywords:** EEG, stroke, traumatic brain injury, neurorehabilitation, brain-machine interface.

## **Πίνακας Περιεχομένων**

### ***Κεφάλαιο 1/Εισαγωγή***

#### ***Κεφάλαιο 2/Μεθοδολογία***

- 2.1 Στρατηγική αναζήτησης*
- 2.2 Κριτήρια επιλογής*
- 2.3 Συλλογή δεδομένων*
- 2.4 Ανάλυση δεδομένων*
- 2.5 Απεικόνιση αποτελεσμάτων*

#### ***Κεφάλαιο 3/Αποτελέσματα***

- 3.1 Αναζήτηση βιβλιογραφίας*
- 3.2 20 έγγραφα με τη μεγαλύτερη απήχηση*
- 3.3 20 πιο παραγωγικοί συγγραφείς*
- 3.4 20 πιο δημοφιλή περιοδικά*
- 3.5 20 επικρατέστερα λήμματα και οι τάσεις στην αρθρογραφία*
- 3.6 Ανάλυση συνεργασιών*
- 3.7 Ανάλυση εννοιολογικών συμπλεγμάτων*

### ***Κεφάλαιο 4/ Ανασκόπηση βασισμένη στα 20 άρθρα με τη μεγαλύτερη απήχηση***

#### ***Κεφάλαιο 5/ Συζήτηση***

- 5.1 Περίληψη ευρημάτων*
- 5.2 Βιβλιομετρία*
- 5.3 Χρονικές τάσεις*
- 5.4 Δημοφιλή περιοδικά*
- 5.5 Γεωγραφική κατανομή*
- 5.6 Ανασκοπήσεις έναντι πρωτότυπων μελετών*
- 5.7 Περιορισμοί*
- 5.8 Συμπεράσματα*

### ***Βιβλιογραφία***

### ***Παράρτημα***

## Συνομογραφίες

AEE, αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο

HEΓ, ηλεκτροεγκεφαλογραφία

BCI, brain-computer interface

IRB, institutional review board

SCP, single country production

MCP, multiple country production

SCP, slow cortical potentials

fMRI, functional magnetic resonance imaging

NIRS, near infrared spectroscopy

EMD, empirical mode decomposition

DWT, discrete wavelet transform

WPD, wavelet packet decomposition

SCI, spinal cord injury



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### Εισαγωγή

Ασθενείς με βαριά κρανιοεγκεφαλική κάκωση, αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο (ΑΕΕ) ή σημαντική νευροεκφυλιστική διαδικασία του κεντρικού νευρικού συστήματος χαρακτηρίζονται σοβαρές νευρολογικές αναπηρίες. Η τρέχουσα αποκατάσταση, που βασίζεται στη διδασκαλία των αντισταθμιστικών μηχανισμών και δεξιοτήτων, επιτρέπει στον ασθενή να επιστρέψει στο σπίτι του το συντομότερο δυνατό με τη μέγιστη λειτουργικότητα, αλλά δεν μειώνει τη νευρολογική βλάβη [1, 2]. Από την άλλη, η λειτουργική ανάκαμψη αποτελεί μια βιώσιμη εναλλακτική, καθώς συντελεί στη μακροπρόθεσμη βελτίωση της λειτουργικότητας και κατ' επέκταση στην ποιότητα ζωής [1, 2].

Έτσι, η κινητική μάθηση μπορεί να βελτιωθεί με τεχνικές ανάμεσα στις οποίες είναι η μαζική εξάσκηση (*massed practice*), εξάσκηση συγκεκριμένης εργασίας (*task-specific practice*), στοχευμένη εξάσκηση (*goal-oriented practice*), και η πολυαισθητηριακή διέγερση (*multisensory stimulation*) [1, 2]. Ομοίως, οι εντατικές θεραπείες λόγου και γλώσσας, συμπεριλαμβανομένης της θεραπείας με προκλήτη περιοριστική αφασία (*constraint-induced aphasia therapy*), η οποία ενεργοποιεί τόσο τα γλωσσικά όσο και τα αντίστοιχα κινητικά κυκλώματα, μπορούν να βελτιώσουν ταχύτερα την απόδοση της γλώσσας [1, 2].

Η ηλεκτροεγκεφαλογραφία (ΗΕΓ) είναι μια τεχνική που βασίζεται στην καταγραφή της ηλεκτρικής δραστηριότητας του τριχωτού της κεφαλής, η οποία παράγεται από τις υποκείμενες δομές του εγκεφάλου [3]. Συχνά, χρησιμοποιείται για τη διάγνωση μιας σειράς κλινικών καταστάσεων που σχετίζονται με την αλλοιωμένη ηλεκτρική δραστηριότητα του εγκεφάλου, όπως η επιληψία και οι διαταραχές του επιπέδου συνείδησης [3]. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό φλοιικών βλαβών, την εκτίμηση του βάθους της αναισθησίας, τη διερεύνηση των διαταραχών του ύπνου, αλλά και διεγχειρητικά στην αναγνώριση φλοιικών και υποφλοιοδών δεματιών [3]. Το ποσοτικό ΗΕΓ, γνωστό και ως χαρτογράφηση του εγκεφάλου, χρησιμοποιεί πυκνές πολυκάναλες εγγραφές για να αυξήσει τη χωρική ακρίβεια στον εντοπισμό των υποκείμενων δομών και παρέχει χρωματικούς δυσδιάστατους και τρισδιάστατους χάρτες για να ενισχύσει την οπτικοποίηση [3]. Τον τελευταίο καιρό, το ΗΕΓ έχει χρησιμοποιηθεί στην ενδονοσοκομειακή αποκατάσταση ως εργαλείο για την επίτευξη αλληλεπίδρασης εγκεφάλου-υπολογιστή, αποσκοπώντας στη μεγιστοποίηση των λειτουργικών

αποτελεσμάτων και τη βελτίωση του ελέγχου των εξωτερικών συσκευών [3]. Σε όλη αυτή την προσπάθεια, η διεπαφή εγκεφάλου-υπολογιστή (*brain-computer interface - BCI*), δηλαδή ένα σύστημα επικοινωνίας που αναγνωρίζει ως εντολή τα εγκεφαλικά κύματα του χρήστη και αντιδρά σύμφωνα με αυτά, αποτελεί κεντρικό πυλώνα [3].

Σε αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιήσαμε βιβλιομετρικά στοιχεία για να αναλύσουμε και να αξιολογήσουμε τη βιβλιογραφία σχετικά με το ρόλο του ΗΕΓ στη νευροαποκατάσταση. Η βιβλιομετρική ανάλυση είναι μια συστηματική και αναπαραγώγιμη μέθοδος για την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας με βάση τη στατιστική ανάλυση [4]. Ο πρωταρχικός στόχος της τρέχουσας μελέτης μας ήταν ο αναγνώριση του γνωστικού υπόβαθρου αναφορικά με την χρήση του ΗΕΓ στη νευροαποκατάσταση. Δευτερεύοντες στόχοι ήταν να εξεταστεί το τρέχον ερευνητικό μέτωπο για το υπό μελέτη θέμα και να αποτυπωθεί η δομή του κοινωνικού δικτύου της σχετικής επιστημονικής κοινότητας. Αναφερόμενοι σε αυτό το άρθρο, οι αναγνώστες μπορούν να αντιληφθούν τις τάσεις της βιβλιογραφίας, τις πληροφορίες και τα χαρακτηριστικά των επιστημονικών άρθρων με στόχο την περαιτέρω προώθηση της γνώσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Μεθοδολογία

Η βιβλιομετρική ανάλυση ολοκληρώθηκε σύμφωνα με τη ροή εργασιών που συνιστάται για την επιστημονική χαρτογράφηση από τους *M. Aria* και *C. Cuccurullo*, χρησιμοποιώντας το στατιστικό περιβάλλον R, την διαδικτυακή πλατφόρμα *biblioshiny* (πακέτο *bibliometrix*) και το *VOSviewer* [4–6]. Αξίζει να σημειωθεί ότι το «*Bibliometrix*» είναι ένα δημοφιλές εργαλείο που χρησιμοποιείται συχνά για βιβλιομετρική ανάλυση στις επιστήμες υγείας [5]. Η τρέχουσα μελέτη δεν απαιτούσε έγκριση από το Επιστημονικό Συμβούλιο Δεοντολογίας του Ιδρύματός μας (*institutional review board, IRB*) ή ενημερωμένη συναίνεση από ασθενείς, μιας και βασίζεται αποκλειστικά σε βιβλιογραφικά δεδομένα [7].

#### 2.1 Στρατηγική αναζήτησης

Η αναζήτηση μας πραγματοποιήθηκε στην ιατρική βάση δεδομένων «*Scopus*». Προτιμήθηκε η συγκεκριμένη λύση γιατί αποτελεί μια ευρεία βάση δεδομένων με μεγάλο αριθμό καταγραφών και επιτρέπει την εξαγωγή βιβλιομετρικών πληροφοριών. Επικεντρωθήκαμε σε άρθρα που αναφέρονται στη χρήση του ΗΕΓ στη νευροαποκατάσταση. Προς αποφυγή διπλοεγγραφών και για τεχνικούς λόγους που σχετίζονται με τα χρησιμοποιηθέντα λογισμικά, η αναζήτηση περιορίστηκε σε μία μόνο βάση δεδομένων.

#### 2.2 Κριτήρια επιλογής

Στοχεύσαμε σε μελέτες που αναφέρονται στην χρήση του ΗΕΓ στην νευροαποκατάσταση. Κεντρικά λήμματα ήταν το «ηλεκτροεγκεφαλογράφημα», η «αποκατάσταση», και οι «παθήσεις του κεντρικού νευρικού συστήματος» με όλα τα παράγωγα ή τις πιθανές μορφές τους και σε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς. Η αναζήτηση περιορίστηκε σε μελέτες γραμμένες στα αγγλικά με οποιαδήποτε μορφή, χωρίς περιορισμούς στην ημερομηνία δημοσίευσης. Στόχος μας ήταν να συμπεριλάβουμε επιστημονικά άρθρα με μεγάλη απήχηση, ανεξάρτητα από την μορφή και το σχεδιασμό τους. Παράλληλα, ο γλωσσικός περιορισμός έγινε λόγω κατανόησης από την συγγραφέα της παρούσης έρευνας και δεν αναμένεται να επηρεάσει τα αποτελέσματα, μιας και η Αγγλική γλώσσα σχετίζεται με την μεγαλύτερη διείσδυση στο χώρο. Έτσι, η αναζήτηση μας ήταν η εξής: (((TITLE-ABS-KEY (neurorehabilitation) OR TITLE-ABS KEY (rehabilitation AND neurological AND disorders OR TITLE-ABS-KEY (neurorehabilitation)))) AND (((TITLE-ABS-KEY (EEG) OR TITLE-ABS KEY (electroencephalography) OR TITLE-ABS KEY (electroencephalogram)))) AND (LIMIT TO

(LANGUAGE , "English")). Από την αναζήτηση αυτή, συμπεριλάβαμε όλες τις εγγραφές που προέκυψαν.

### 2.3 Συλλογή δεδομένων

Συλλέξαμε και εξάγαμε από το *Scopus* όλα τα δεδομένα παραπομπής, βιβλιογραφικές πληροφορίες, περιλήψεις και λέξεις-κλειδιά των εγγράφων που προέκυψαν στην μορφή *BibTeX*. Σε κάθε άρθρο καταγράφηκε ο τίτλος του άρθρου, το έτος και ο τίτλος του περιοδικού δημοσίευσης, τα ονόματα και ο συνολικός αριθμός των εμπλεκόμενων συγγραφέων, το ίδρυμα και η χώρα καταγωγής του υπεύθυνου της έρευνας, και κυρίως ο συνολικός αριθμός παραπομπών στο *Scopus*. Τα δεδομένα μεταφορτώθηκαν στη διαδικτυακή πλατφόρμα «*biblioshiny*», και αναλύθηκαν χωρίς περαιτέρω μετατροπές [7].

### 2.4 Ανάλυση δεδομένων

Η ανάλυση των δεδομένων της τρέχουσας μελέτης πραγματοποιήθηκε σε δύο βήματα, μια περιγραφική ανάλυση και μια αποτύπωση κοινωνικού δικτύου. Με την περιγραφική ανάλυση αναζητήσαμε στοιχεία για τους πιο παραγωγικούς συγγραφείς και χώρες, τις εργασίες με τη μεγαλύτερη απήχηση, τα πιο δημοφιλή περιοδικά δημοσιεύσεων στο χώρο και τις πιο συνηθισμένες λέξεις –κλειδιά. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σε πίνακες και γραφήματα. Στη διαδικασία αποτύπωσης δικτύου, αναζητήσαμε τρία δίκτυα, συμπεριλαμβάνοντας το δίκτυο συνεργασίας ανάμεσα σε επιστημονικά ιδρύματα, συγγραφείς και μια ανάλυση συνύπαρξης λέξεων-κλειδιά. Η έκταση των διεθνών συνεργασιών εκτιμήθηκε με τους δείκτες δημοσίευσης μεμονωμένων (*single country production, SCP*) και πολλαπλών χωρών (*multiple country production, MCP*) και την αναλογία *SCP* έναντι *MCP*. Τέλος, πραγματοποιήσαμε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση περιεχομένου, βασισμένη στις κορυφαίες 20 πιο σημαντικές μελέτες, μετά την ανάκτηση ολόκληρων των άρθρων.

### 2.5 Απεικόνιση των αποτελεσμάτων

Οι τάσεις και τα χρονικά δεδομένα απεικονίστηκαν σε διαγράμματα αιχμών και απλά γραφήματα χρονικών σειρών. Τα δίκτυα παρουσιάστηκαν σε χάρτες εγγύτητας λέξεων, ενώ τα γεωχωρικά δεδομένα και οι εννοιολογικές δομές εμφανίστηκαν σε γεωγραφικούς χάρτες και ομαδοποιημένα διαγράμματα, αντίστοιχα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Αποτελέσματα

#### 3.1 Αναζήτηση βιβλιογραφίας

Η ηλεκτρονική αναζήτηση στο *Scopus* ανέδειξε 874 έγγραφες από 420 πηγές (Πίνακας 1). Μεταξύ των άρθρων, υπήρχαν 456 πρωτότυπες μελέτες, 145 εργασίες συνεδρίων και 119 ανασκοπήσεις. Σε συνολικά 41.104 ετεροαναφορές, υπήρχαν κατά μέσο όρο 21,63 αναφορές ανά έγγραφο, 5 χρόνια μετά την δημοσίευσή τους. Αναγνωρίστηκαν 6.146 λέξεις-κλειδιά. Επιπλέον, καταγράψαμε 3.589 συγγραφείς με 0.24 έγγραφα ανά συγγραφέα και 5.29 και συγγραφείς ανά έγγραφο. Παρατηρήθηκε αυξανόμενο ενδιαφέρον μελέτης του ΗΕΓ στη νευροαποκατάσταση, με ετήσιο ρυθμό βιβλιογραφικής ανάπτυξης έως και 14,3% τα τελευταία χρόνια (Εικόνα 1, πάνω σχήμα).

#### 3.2 20 έγγραφα με τη μεγαλύτερη απήχηση

Ο κατάλογος των 20 κορυφαίων άρθρων με τις περισσότερες αναφορές [8, 9, 17-27] απεικονίζεται στον Πίνακα 2. Η μελέτη με τίτλο «*Brain-computer interfaces, a review*» των *Nicolas-Alfonso et al.* συγκέντρωσε τις περισσότερες ετεροαναφορές, ακολουθούμενη από την μελέτη με τίτλο «*Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation*» από τους *Daly J.* και *Wolpaw JR.*, με 997 και 708 ετεροαναφορές, αντίστοιχα [20, 21]. Δεκατρία (65%) άρθρα ήταν ανασκοπήσεις, έξι (30%) πρωτότυπες έρευνες και μια (5%) περίληψη συνεδρίου. Πέντε (25%) αφορούσαν τα ΑΕΕ, ενώ οι κρανιοεγκεφαλικές κακώσεις, οι κακώσεις του νωτιαίου μυελού και η αμυοτροφική πλευρική σκλήρυνση / σύνδρομο εγκλεισμού περιγράφηκαν σε ένα άρθρο (5%) το κάθε ένα. Η διεπαφή εγκεφάλου-υπολογιστή ήταν το κύριο θέμα σε έντεκα (55%) μελέτες. Τέλος, η πιο συχνή μορφή νευροαποκατάστασης αφορούσε τη βελτίωση της κινητικής λειτουργίας σε 15 (75%) μελέτες, ενώ τρεις (15%) επικεντρώθηκαν στον έλεγχο μηχανών ή εξωσκελετών και μία (5%) στη διευκόλυνση της επικοινωνίας.

#### 3.3 20 πιο παραγωγικοί συγγραφείς

Οι κορυφαίοι 20 πιο παραγωγικοί συγγραφείς απεικονίζονται στο Σχήμα 2, με τους *Pfurtscheller G*, *Birbaumer N* και *Wolpaw JR* να κατατάσσονται στους τρεις πιο παραγωγικούς συγγραφείς με 975, 875 και 501 παραπομπές αντίστοιχα. Ομοίως, οι ΗΠΑ, η Ιταλία και η Γερμανία πρωτοπορούν ανάμεσα στις πιο παραγωγικές χώρες με βάση την εντοπιότητα του πρώτου συγγραφέα (Πίνακας 3).

#### 3.4 20 πιο δημοφιλή περιοδικά

Τα συγκεντρωμένα αρχεία δημοσιεύθηκαν σε 420 πηγές και τα 20 πιο δημοφιλή περιοδικά παρατίθενται στον Πίνακα 4. Η βιβλιογραφία χαρακτηρίζεται από αυξανόμενο ενδιαφέρον στο

εν λόγω αντικείμενο, με ετήσιο ρυθμό αύξησης που ανέρχεται ως και το 14.3%, ιδιαίτερα για τα περιοδικά "*IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation*", "*Frontiers in Human Neuroscience*", «*Frontiers in Neuroscience*» και «*Journal of Neural Engineering*» (Εικόνα 1, κάτω μέρος).

### 3.5 20 επικρατέστερα λήμματα και οι τάσεις στην αρθρογραφία

Οι κορυφαίες 20 επικρατέστερες λέξεις-κλειδιά και η εξέλιξη των πιο επίκαιρων θεμάτων απεικονίζονται στον Πίνακα 4 και στο Σχήμα 3. Ταυτόχρονα, καταγράψαμε μια ανοδική τάση σε όλα λήμματα από το 2005 μέχρι σήμερα. Εκτός από την «αποκατάσταση» και την «ηλεκτροεγκεφαλογραφία» με όλα τα παράγωγά τους, ο όρος «διεπαφή εγκεφάλου-υπολογιστή» κυριαρχούσε μεταξύ των επικρατέστερων λημμάτων, με 180 εμφανίσεις σε διάφορες μορφές. Ταυτόχρονα, οι τάσεις στην αρθρογραφία μεταβλήθηκαν από τη χρήση της «λειτουργικής μαγνητικής απεικόνισης» (*functional magnetic imaging*) στη «διεπαφή εγκεφάλου-μηχανής» (*brain-machine interfase*), τις «νοερές εικόνες κίνησης» (*motor imagery*) και τη «βαθιά μάθηση» (*deep learning*), με την πάροδο του χρόνου.

### 3.6 Ανάλυση συνεργασιών

Όπως προαναφέρθηκε, οι ΗΠΑ, η Ιταλία και η Γερμανία βρίσκονται στην κορυφή των πιο παραγωγικών χωρών σύμφωνα με την προέλευση του πρωταρχικού συγγραφέα. Με βάση τον δείκτη MCP, πολλές από τις κορυφαίες χώρες, όπως οι ΗΠΑ (21%), η Ιταλία (19,78%) και η Κίνα (16%), περιορίστηκαν σε τοπικές συνεργασίες. Αντίθετα, χώρες όπως η Δανία (75%), η Σιγκαπούρη (62%), η Ισπανία (61%), η Γαλλία (53%), ο Καναδάς (47%), η Αυστραλία (45%), το Βέλγιο (44%) και η Γερμανία (42%) συμμετείχαν σε πιο εκτεταμένες συνεργασίες. Κατά συνέπεια, ο χάρτης ανάλυσης συνεργασίας μεταξύ ιδρυμάτων αποκάλυψε ένα μεγάλο δίκτυο συνεργασίας με επίκεντρο το Πανεπιστήμιο του *Lund* (Εικόνα 4, επάνω). Οι υπόλοιπες συνεργασίες περιορίστηκαν σε όχι περισσότερα από δύο ιδρύματα σε κάθε περίπτωση.

### 3.7 Ανάλυση εννοιολογικών συμπλεγμάτων

Η ανάλυση των λέξεων με βάση τα λήμματα εντόπισε πέντε κύρια συμπλέγματα (Πίνακας 5). Το πρώτο σύμπλεγμα περιλαμβάνει τα λήμματα "*EEG*", "*BCI*" και "*motor imagery*". Το δεύτερο σύμπλεγμα ήταν γύρω από τις λέξεις - κλειδιά "*EEG*", "*BCI*" και "*virtual reality*". Το τρίτο σύμπλεγμα περιελάμβανε τα λήμματα "*disorders of consiousness*" σε συνδυασμό με το "*EEG*", ενώ το τέταρτο χαρακτηριζόταν από τον κεντρικό ρόλο των λημμάτων "*motor imagery*", "*BCI*" και "*neurorehabilitation*". Τέλος, το πέμπτο σύμπλεγμα σχετίστηκε με το ρόλο του λήμματος "*TCD*" στη βελτίωση του "*motor control*".

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Ανασκόπηση βασισμένη στα 20 άρθρα με τη μεγαλύτερη απήχηση

Με τον όρο διεπαφή εγκεφάλου-υπολογιστή (BCI) ορίζεται ένα σύστημα υπολογιστών και λογισμικού για τον έλεγχο μηχανημάτων ή εξωτερικών συσκευών, χρησιμοποιώντας σήματα από την εγκεφαλική δραστηριότητα [10, 11, 17, 20]. Στόχο έχει να βοηθά ασθενείς με βαριά αναπηρία από νευρομυϊκές διαταραχές, ισχαιμία στελέχους, βαριά κρανιοεγκεφαλική κάκωση ή βλάβες του νωτιαίου μυελού ώστε να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον [10, 11, 17, 20, 25]. Η δράση της BCI υλοποιείται σε πέντε βήματα: (1) λήψη σήματος από τον χρήστη, (2) προεπεξεργασία ή ενίσχυση σήματος, (3) αναγνώριση χαρακτηριστικών μοτίβων, (4) ταξινόμηση και ταυτοποίηση εντολής και (5) έλεγχος της διεπαφής για επικοινωνία ή έλεγχο του περιβάλλοντος [20]. Αρχικά, μια σειρά από ηλεκτροφυσιολογικά ή αιμοδυναμικά εγκεφαλικά σήματα συλλέγονται με επεμβατικές ή μη-επεμβατικές μεθόδους [10, 11, 20]. Μεταξύ αυτών είναι τα αργά φλοιώδη δυναμικά (*slow cortical potentials, SCP*), οι αισθητικοκινητικοί ρυθμοί (*somatosensory rhythms*), τα δυναμικά που σχετίζονται με το κύμα P300, τα οπτικά προκλητά δυναμικά ηρεμίας (*steady state visual evoked potentials*) και τα επίπεδα εγκεφαλικής οξυγόνωσης (*cerebral oxygenation levels*) [10, 11, 20].

Οι μη-επεμβατικές μέθοδοι όπως το ΗΕΓ, ο λειτουργικός μαγνητικός συντονισμός (*functional magnetic resonance imaging, fMRI*) και η φασματοσκοπία εγγύς υπέρυθρου (*near infrared spectroscopy, NIRS*) είναι οι πιο μελετημένες μέθοδοι για την καταγραφή της εγκεφαλικής δραστηριότητας, αφού τα επεμβατικά ομόλογά τους (ηλεκτροφλοιογραφία και καταγραφή ενδοφλοιωδών νευρώνων) σχετίζονται με σημαντικές επιπλοκές, όπως της ιστοσυμβατότητας και απόρριψης των μικροηλεκτροδίων, της μόλυνσης και της ιστικής βλάβης [10, 19-21]. Για τη διεπαφή που βασίζεται στην φασματοσκοπία εγγύς υπέρυθρου, προτιμάται ο κινητικός και προκινητικός μετωπιαίος φλοιός και μπορεί να χρησιμοποιηθεί υβριδικά σε συνδυασμό με το ΗΕΓ [19, 21]. Σε μια πειραματική μελέτη, οι Lew και συνεργάτες επικεντρώθηκαν στη μη-επεμβατική καταγραφή του δυναμικού ετοιμότητας, ένα SCP που ανιχνεύεται πάνω από τις έσω κεντρικές περιοχές, πριν ακόμη ξεκινήσει μια αυτοπεριορισμένη στοχευμένη κίνηση [28]. Οι συγγραφείς μέτρησαν τα ποσοστά ανίχνευσης των SCP σε δώδεκα άτομα κατά τη διάρκεια δοκιμών παραγωγής μεμονωμένων εργασιών [28]. Δυο από αυτούς ήταν ασθενείς με ΑΕΕ [28]. Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλό ποσοστό ανίχνευσης των SCP

πριν από την έναρξη της κίνησης, αλλά όχι κατά την περίοδο πρόθεσης μη μετακίνησης [28]. Επιπλέον, η πρόθεση κίνησης εντοπίστηκε περίπου 500ms πριν από την πραγματική έναρξη της κίνησης [28]. Παρόμοια αποτελέσματα σημειώθηκαν σε έναν από τους ασθενείς με ΑΕΕ [28]. Η ακρίβεια ταξινόμησης και αναγνώρισης μοτίβων αποτελεί μια πρόκληση στην νευροαποκατάσταση, καθώς εξαρτάται τόσο από τη φυσική κατάσταση, τη διάθεση και τη στάση του σώματος, όσο και από την παρουσία εξωτερικού θορύβου [15]. Κατά την προεπεξεργασία πραγματοποιείται ενίσχυση ΗΕΓ σήματος και αφαίρεση πιθανού θορύβου [11, 17, 20]. Οι Kenic και συνεργάτες συνέκριναν τρεις τεχνικές επεξεργασίας ΗΕΓ σήματος, μεταξύ των οποίων ήταν ο εμπειρικός τρόπος αποσύνθεσης (*empirical mode decomposition, EMD*), ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίων (*discrete wavelet transform, DWT*) και η αποσύνθεση πακέτων κυματιδίων (*wavelet packet decomposition WPD*) [15]. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι η υψηλότερη ακρίβεια ταξινόμησης (92,8%) επιτεύχθηκε με την πολύβαθμη ανάλυση κύριων συνιστωσών (*multistage principal component analysis*) για την αφαίρεση του θορύβου, σε συνδυασμό με στατιστικές ανώτερης τάξης του *WPD*, με στόχο τον έλεγχο εξωτερικών συσκευών, συμπεριλαμβανομένου ενός αναπηρικού αμαξιδίου [15]. Από την άλλη πλευρά, τα σήματα εγκεφαλικής δραστηριότητας έρχονται σε συγκεκριμένα μοτίβα, τα οποία πρέπει να αναγνωριστούν, επιλεγούν, εξαχθούν και να ταιριάξουν με την πρόθεση του ασθενούς, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους ταξινόμησης ή παλινδρόμησης [11, 17, 20]. Οι αλγόριθμοι παλινδρόμησης χρησιμοποιούν ηλεκτροεγκεφαλογραφικά χαρακτηριστικά ως ανεξάρτητες μεταβλητές για να προβλέψουν τις προθέσεις των χρηστών [20]. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι ταξινόμησης χρησιμοποιούν τα χαρακτηριστικά που εξάγονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές για να ορίσουν όρια μεταξύ των διαφόρων στόχων [20].

Ο απώτερος στόχος είναι η επικοινωνία και ο έλεγχος του περιβάλλοντος από ασθενείς με αναπηρία όπως από αμυοτροφική πλευρική σκλήρυνση και σύνδρομο εγκλεισμού, με την χρήση εξωτερικών ρομποτικών συσκευών και προσθετικών μελών [10, 11, 20, 25, 27]. Επιπλέον, η αποκατάσταση της νευρικής και κινητικής λειτουργίας σε ασθενείς μετά από ΑΕΕ ή τραυματισμό νωτιαίου μυελού (*spinal cord injury, SCI*) μπορεί να διευκολυνθεί με τη χρήση *BCI* στην αποκατάσταση, σε συνδυασμό με συστήματα εικονικής πραγματικότητας και συμπεριφορική φυσιοθεραπεία, ευοδώνοντας τη νευροπλαστικότητα [10, 11, 14, 20, 24–26, 29]. Ασθενείς χωρίς υπολειπόμενη κίνηση των δακτύλων δύναται να βελτιώσουν την κινητική λειτουργικότητα τους, με τον συνδυασμό υποβοηθούμενης εξάσκησης με *BCI* και συμπεριφορικής φυσιοθεραπείας, ανοίγοντας νέους ορίζοντες στην αποκατάσταση των ΑΕΕ [22]. Από την άλλη, η τεχνική των νοερών εικόνων κίνησης (*motor imagery*), που περιλαμβάνει προσπάθειες για την εκτέλεση φανταστικών κινήσεων χρησιμοποιώντας το πληγικό χέρι,



αντιπροσωπεύει μια επαναστατική μέθοδο για την αποκατάσταση ασθενών αυτών, προωθώντας την σταδιακή στρατολόγηση του κινητικού συστήματος με στόχο τη βέλτιστη κινητική απάντηση [30]. Οι Ang και συνεργάτες προσπάθησαν να διερευνήσουν την ικανότητα 54 ημιπαρετικών ασθενών μετά από ΑΕΕ στον χειρισμό ηλεκτροεγκεφαλογραφικά ελεγχόμενης *BCI* μέσω της τεχνικής της νοερής εικόνας κίνησης [30]. Επιπλέον, συνέκριναν την παραπάνω τεχνική σε συνδυασμό με νευροαποκατάσταση ρομποτικής ανάδρασης με τη ρομποτική αποκατάσταση που παρέχει κινητική θεραπεία όσον αφορά την κινητική βελτίωση στο άνω άκρο που έχει προσβληθεί από το ΑΕΕ [30]. Οι συγγραφείς ανέφεραν σημαντικά οφέλη στις λειτουργικές βαθμολογίες των δύο ομάδων αμέσως μετά την αποκατάσταση, χωρίς να ξεχωρίζει κάποια ομάδα, και αυτά τα οφέλη διατηρήθηκαν στον επανέλεγχο μετά από δύο μήνες [30]. Ακόμα, η αρθρογραφία ανέδειξε ότι τα κινητικά αποτελέσματα ενισχύονται με χρήση ιδιοδεκτικής *BCI* σε ασθενείς με υπολειπόμενη εν τω βάθει αισθητικότητα και συνεδρίες μουσικοθεραπείας [8, 23]. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι νευροπλαστικές μεταβολές οδηγούν σε δυσάρεστα αποτελέσματα, όπως ο πόνος μέλους φάντασμα [14].

Οι εγκεφαλογραφικά ελεγχόμενοι εξωσκελετοί έχουν σχεδιαστεί ως επικουρικές συσκευές αποκατάστασης για άτομα με αναπηρία, προσφέροντας αντίσταση ή υποβοήθηση, τόσο στην παθητική όσο και στην ενεργητική κίνηση [25, 27]. Επιπλέον, παρέχουν στήριξη και ισορροπία κατά τη διάρκεια της βάρδισης ή της μετακίνησης με αναπηρικό αμαξίδιο [17, 25, 27]. Συσκευές με στόχο τη θεραπεία αφορούν κυρίως τη βελτίωση της υγείας μέσω της αύξησης της φυσικής δραστηριότητας και αντοχής [25, 27]. Οι Wagner και συνεργάτες βασισμένοι σε ενδείξεις ότι η ενεργός συμβολή στην κίνηση θα μπορούσε να είναι κρίσιμη για την κωδικοποίηση της κινητικής μνήμης, πρότειναν τη χρήση τεχνικών καταγραφής εγκεφαλικών ρυθμών κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης στο βάδισμα για την ενθάρρυνση της ενεργού συμμετοχής [26]. Έτσι, οι συγγραφείς συνέκριναν τα φασματικά μοτίβα στο ΗΕΓ κατά τη διάρκεια της ενεργής σε σχέση με την παθητική βάρδιση με ρομποτική υποβοήθηση [26]. Οι ανεξάρτητες παράμετροι του ΗΕΓ ομαδοποιήθηκαν σε όλους τους συμμετέχοντες με βάση την ανατομική τους θέση και τα φάσματα συχνότητας [26]. Οι συγγραφείς κατέληξαν σε σημαντικές διαφορές φλοιικής ενεργοποίησης ανάμεσα στις δύο προσεγγίσεις [26]. Παράλληλα, σημειώθηκε σημαντική καταστολή των ρυθμών μίου (*mu*), βήτα και γάμμα κατά τη διάρκεια του ενεργού περπατήματος, σε αντίθεση με το παθητικό περπάτημα [26]. Αυτές οι διαφορές εξαρτήθηκαν κυρίως από τη φάση του κύκλου βάρδισης, ενώ παρόμοιες διαφορές καταγράφηκαν στην περιοχή ελέγχου του δεξιού χεριού [26].

Φαίνεται ότι η χρήση της ηλεκτροεγκεφαλογραφικά ελεγχόμενης *BCI* στη νευροαποκατάσταση συνδέεται με σημαντικούς περιορισμούς. Αρχικά, υπάρχει μια ουσιαστική

έλλειψη στη βιβλιογραφία σε μεγάλες τυχαιοποιημένες κλινικές δοκιμές στη χρήση επεμβατικών και μη-επεμβατικών *BCI* με μακροχρόνια παρακολούθηση σε ασθενείς και όχι σε υγιείς πληθυσμούς [10, 20]. Επιπλέον, τα συστήματα *BCI* πρέπει να γίνουν ασφαλέστερα, πιο αξιόπιστα, ευπαρουσίαστα, φιλικά προς το χρήστη και εξαιρετικά ακριβή [12]. Το υψηλό κόστος των τεχνολογιών *BCI* εγείρει ηθικές ανησυχίες, ιδιαίτερα σε ασθενείς με σύνδρομο εγκλεισμού ή αμυοτροφική πλευρική σκλήρυνση που χρήζουν αναπνευστικής υποστήριξης [12].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Συζήτηση

#### 5.1 Περίληψη των ευρημάτων

Η τρέχουσα εργασία παρουσιάζει μια λεπτομερή ανάλυση των κορυφαίων άρθρων σχετικά με τη χρήση του ΗΕΓ στη νευροαποκατάσταση. Μπορεί να βοηθήσει τους κλινικούς γιατρούς και τους ερευνητές να κατανοήσουν την υπάρχουσα βάση γνώσεων, το τρέχον ερευνητικό μέτωπο και να εξοικειωθούν με τα υποκείμενα κοινωνικά /επιστημονικά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίσαμε τα άρθρα που χρησίμευσαν ως ορόσημα και τους πιο σημαντικούς συγγραφείς στον χώρο. Ομοίως, δείξαμε ότι το διαθέσιμο ερευνητικό μέτωπο προέρχεται από περιορισμένο αριθμό Ιδρυμάτων με ακόμη μικρότερο αριθμό συνεργασιών μεταξύ τους. Τέλος, έγινε προφανές ότι οι περισσότερες έρευνες προέρχονται από εύπορες χώρες από την Ευρώπη και τις ΗΠΑ, με μικρή έως ελάχιστη συνεισφορά από την Ασία και την Αμερική. Αυτή η μελέτη φαίνεται να είναι η πρώτη μελέτη που εστιάζει στο συγκεκριμένο θέμα. Επομένως, δεν υπάρχουν σχετικές μελέτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω σύγκριση. Παρ'όλα αυτά, μια σειρά από σκέψεις έχουν προκληθεί από τα ευρήματα μας και παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 5.2 Βιβλιομετρία

Η βιβλιομετρία είναι μια εναλλακτική προσέγγιση για την ποιοτική και ποσοτική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας. Πρόκειται για ανάλυση μεγάλων δεδομένων (*big data*) που προέρχονται από βάσεις δεδομένων βιβλιογραφίας, εστιάζοντας σε έγγραφα με μεγάλη απήχηση. Βασίζεται στην ιδέα ότι τα άρθρα με μεγάλο αριθμό αναφορών έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ανάπτυξη της επιστήμης. Συνεπώς, θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε το ερευνητικό υπόβαθρο των πιο ενεργών συγγραφέων, χωρών και ιδρυμάτων καθώς και περιοδικών. Οι ερευνητικές τάσεις και τα επίκεντρα ενδιαφέροντος προσδιορίζονται με βάση τις πιο συχνές λέξεις - κλειδιά και τις αλλαγές τους με την πάροδο του χρόνου. Τέλος, διάφορα δίκτυα μεταξύ συγγραφέων, χωρών και ιδρυμάτων θα μπορούσαν να αναγνωριστούν με βάση την ανάλυση συνύπαρξης λέξεων.

#### 5.3 Χρονικές τάσεις

Η νευροαποκατάσταση και ο έλεγχος εξωτερικών συσκευών που χρησιμοποιούν ηλεκτροεγκεφαλογραφικά ελεγχόμενη *BCI* χαρακτηρίζονται από πρόσφατη αύξηση του επιστημονικού ενδιαφέροντος και υψηλή ετήσια επιστημονική παραγωγή. Παρόλο που οι κινητικές και επικοινωνιακές δυσκολίες εμφανίστηκαν από την ύπαρξη της ανθρωπότητας,

αυτή η άνοδος συνέβη την τελευταία δεκαετία, όπου προηγήθηκαν αρκετές επιστημονικές εξελίξεις, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης της τεχνητής νοημοσύνης και αρκετών αλγορίθμων φιλτραρίσματος βιολογικών σημάτων. Έτσι, καταγράψαμε μια εκθετική άνοδο της επιστημονικής παραγωγής από τις αρχές της δεκαετίας του 2010. Πιθανότατα να υπάρχουν δύο επιπλέον λόγοι για τους οποίους το ΗΕΓ στη νευροαποκατάσταση έδειξε αυτή την καθυστερημένη άνθηση. Αρχικά, υπήρξε μια μετατόπιση στην προσέγγιση αποκατάστασης από τη διδασκαλία δεξιοτήτων προς τη λειτουργική αποκατάσταση. Επιπλέον, η χρήση του ΗΕΓ στη νευροαποκατάσταση απαιτεί αφ' ενός μεν τη βαθιά κατανόηση της λειτουργίας του εγκεφάλου και αφετέρου δε την πλήρη γνώση της επιστήμης των υπολογιστών. Φαίνεται ότι ο συνδυασμός αυτών των κλάδων επετεύχθη μόλις πρόσφατα.

#### 5.4 Δημοφιλή περιοδικά

Η ανάλυση των πηγών έδειξε ότι δημοσιεύσεις σχετικά με τη χρήση του ΗΕΓ στη νευροαποκατάσταση δημοσιεύονται κυρίως σε περιοδικά που εστιάζουν σε μηχανικά και βιοϊατρικά σήματα, στην αποκατάσταση και τις νευροεπιστήμες. Αυτά τα περιοδικά πρωτοπορούν στη φιλοξενία διεπιστημονικών άρθρων, ιδιαίτερα από τον χώρο της βιομηχανικής (*bio-engineering*). Πράγματι, η εκθετική άνοδος της έρευνας στις *BCI* και η χρήση εξωσκελετών μετατόπισαν συγγραφείς και συντάκτες σε περιοδικά στα όρια των νευροεπιστήμων και της μηχανικής. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα κλασικά περιοδικά ιατρικής και νευρολογίας απουσιάζουν από τα 20 κορυφαία περιοδικά με τις περισσότερες αναφορές.

#### 5.5 Γεωγραφική κατανομή

Η τρέχουσα μελέτη κατέδειξε δύο σημαντικές αντιπαραθέσεις. Αρχικά, η πλειοψηφία των μελετών προέρχεται από εύπορες χώρες των ΗΠΑ και της Ευρώπης. Η Ασία και η Λατινική Αμερική αντιπροσωπεύονται σε μικρότερο βαθμό, με ελάχιστη συνεισφορά από την Αφρική. Αυτός ο χάρτης συμβαδίζει με την κατανομή του ΑΕΕ μοντέλου και λιγότερο του μοντέλου νευροτραύματος. Με άλλα λόγια, η νευροαποκατάσταση καθοδηγείται από τις απαιτήσεις των «εύπορων ηλικιωμένων» και λιγότερο των «πτωχών νεαρών». Μένει να αποδειχθεί εάν υπάρχει παρόμοια κατανομή σε υποομάδες χαμηλότερου εισοδήματος εντός των εύπορων χωρών. Η δεύτερη διαμάχη είναι ότι οι κορυφαίες χώρες προτιμούν μια πιο αυτάρκη προσέγγιση, αντί να συμμετέχουν σε εκτεταμένες διεθνείς συνεργασίες. Πράγματι, φαίνεται ότι οι «ελίτ παίκτες» όπως οι ΗΠΑ, η Ιταλία και η Γερμανία προτιμούν μοναχικούς δρόμους, ενώ μικρότεροι εταίροι, όπως η Δανία, η Σιγκαπούρη, η Ισπανία και άλλοι, ενδιαφέρονται περισσότερο για διεθνείς συνεργασίες.

### 5.6 Ανασκοπήσεις έναντι πρωτότυπων μελετών

Στην παρούσα ανασκόπηση, εστιάσαμε σε μελέτες με τον μεγαλύτερο αντίκτυπο στον τομέα. Αποφασίσαμε να συμπεριλάβουμε όλους τους τύπους εγγράφων, καθώς σημειώσαμε ότι οι κριτικές ανασκοπήσεις και οι περιλήψεις συνεδρίων ήταν ανάμεσα στα έγγραφα υψηλής απήχησης στις αρχικές πιλοτικές μας αναζητήσεις. Από τη μία πλευρά, αυτό αναδεικνύει την αξία των συστηματικών ανασκοπήσεων σε ταχέως εξελισσόμενους τομείς, καθώς παρέχουν ολοκληρωμένες ενημερώσεις της σχετικής βιβλιογραφίας επιτρέποντας την εξοικονόμηση χρόνου και πόρων από εξαντλητικές αναζητήσεις σε επιστημονικές βάσεις δεδομένων. Από την άλλη, η έλλειψη αναφορών σε πρωτότυπες μελέτες οδηγεί στην υποτίμηση της επιστημονικής τους αξίας και ταυτόχρονα αναδεικνύει την απουσία ερευνητικών μελετών με κεντρικό ρόλο στον χώρο.

### 5.7 Περιορισμοί

Η παρούσα μελέτη χαρακτηρίζεται από σημαντικούς περιορισμούς. Πρώτον, βασίζεται σε βιβλιογραφικά δεδομένα από μία μόνο βάση δεδομένων, το *Scopus*, λόγω εγγενών περιορισμών στο επιλεγμένο λογισμικό και προς αποφυγή διπλοεγγράφων. Ωστόσο, επιλέξαμε το *Scopus* δεδομένου ότι είναι η μεγαλύτερη ιατρική βάση δεδομένων με τα πιο χρήσιμα επιστημονομετρικά δεδομένα και τη δυνατότητα εξαγωγής των μεταδεδομένων. Δεύτερον, μια βιβλιομετρική ανάλυση στερείται μιας σε βάθος ανάλυσης των άρθρων που συγκεντρώθηκαν. Για το λόγο αυτό, προσθέσαμε μια ανάλυση περιεχομένου των 20 άρθρων με τη μεγαλύτερη απήχηση. Τρίτον, μεγάλη απήχηση δεν σημαίνει απαραίτητα και υψηλή ποιότητα. Με άλλα λόγια, μια βιβλιομετρική ανάλυση θα μπορούσε να περιλαμβάνει μελέτες χαμηλής ποιότητας αλλά με σημαντικό αντίκτυπο στον τομέα. Ομοίως, η μελέτη μας θα μπορούσε να παραλείψει έρευνες υψηλής ποιότητας που δεν έφτασαν σε μεγάλο αριθμό παραπομπών ακόμη. Επομένως, ο αναγνώστης προειδοποιείται ότι τα αποτελέσματά μας ενδέχεται να αλλάξουν μελλοντικά και οι τακτικές ενημερώσεις κρίνονται απαραίτητες. Τέλος, μια βιβλιομετρική ανάλυση μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμένο αλλά υπαρκτό αριθμό μή-συναφών άρθρων μετά την ανάγνωση του πλήρους κειμένου του εγγράφου. Στη παρούσα μελέτη αναγνωρίστηκε μία (5%) μελέτη μεταξύ των κορυφαίων 20 αποτελεσμάτων χωρίς συνάφεια με το ΗΕΓ [16].

### 5.8 Συμπεράσματα

Το ΗΕΓ στη νευροαποκατάσταση αποτελεί έναν τομέα ενεργών ερευνών σε όλο τον κόσμο, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Πρόκειται για ένα εύχρηστο σήμα εισόδου στις διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή για τη νευροαποκατάσταση ασθενών με ΑΕΕ, αμυοτροφική πλάγια σκλήρυνση και τραυματισμό εγκεφάλου ή σπονδυλικής στήλης, διευκολύνοντας την αισθητικοκινητική ανατροφοδότηση κατά την προπόνηση, την επικοινωνία, τον έλεγχο του

περιβάλλοντός τους και τη χρήση εξωσκελετού. Μελλοντικά, αναμένεται βελτίωση και ευρύτερη διαθεσιμότητα της διεπαφής εγκεφάλου-υπολογιστή με την ανάπτυξη πιο αξιόπιστων αλγορίθμων φιλτραρίσματος του ΗΕΓ. Ωστόσο, η χρήση του περιορίζεται σε συγκεκριμένες ερευνητικές ομάδες χωρίς σημαντικές συνεργασίες ή συνεισφορές από την παγκόσμια ερευνητική κοινότητα. Τα πράγματα αναμένεται να αλλάξουν με τη βελτίωση και την ευρύτερη διαθεσιμότητα των αλγορίθμων φιλτραρίσματος *BCI* και ΗΕΓ.

## Παραπομπές

1. Berthier ML, Pulvermüller F (2011) Neuroscience insights improve neurorehabilitation of poststroke aphasia. *Nat Rev Neurol* 7:86–97. doi: 10.1038/nrneurol.2010.201
2. Maier M, Ballester BR, Verschure PFMJ (2019) Principles of Neurorehabilitation After Stroke Based on Motor Learning and Brain Plasticity Mechanisms. *Front Syst Neurosci*. doi: 10.3389/fnsys.2019.00074
3. Teplan M (2002) Fundamentals of EEG measurement. *Meas Sci Rev* 2:1–11.
4. Aria M, Cuccurullo C (2017) bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *J Informetr* 11:959–975. doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007
5. Package T, Comprehensive T, Mapping S (2020) Package ‘ bibliometrix .’
6. van Eck NJ, Waltman L (2010) Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics* 84:523–538. doi: 10.1007/s11192-009-0146-3
7. HIPAA Privacy Rule and Its Impacts on Research. <https://privacyruleandresearch.nih.gov/irbandprivacyrule.asp>. Accessed 13 Jan 2021
8. Altenmüller E, Marco-Pallares J, Münte TF, Schneider S (2009) Neural reorganization underlies improvement in stroke-induced motor dysfunction by music-supported therapy. *Ann N Y Acad Sci* 1169:395–405. doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.04580.x
9. Ang KK, Guan C, Chua KSG, et al (2010) Clinical study of neurorehabilitation in stroke using EEG-based motor imagery brain-computer interface with robotic feedback. In: 2010 Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBC’10. Buenos Aires, pp 5549–5552
10. Chaudhary U, Birbaumer N, Ramos-Murguialday A (2016) Brain-computer interfaces for communication and rehabilitation. *Nat Rev Neurol* 12:513–525. doi: 10.1038/nrneurol.2016.113
11. Daly JJ, Wolpaw JR (2008) Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation. *Lancet Neurol* 7:1032–1043. doi: 10.1016/S1474-4422(08)70223-0
12. Dobkin BH (2007) Brain-computer interface technology as a tool to augment plasticity and outcomes for neurological rehabilitation. *J Physiol* 579:637–642. doi: 10.1113/jphysiol.2006.123067
13. Donati ARC, Shokur S, Morya E, et al (2016) Long-Term Training with a Gait Protocol Induces Partial Neurological Recovery in Paraplegic Patients. *Nat Publ Gr* 1–16. doi:

10.1038/srep30383

14. Elbert T, Rockstroh B (2004) Reorganization of Human Cerebral Cortex: The Range of Changes following Use and Injury. *Neuroscientist* 10:129–141. doi: 10.1177/1073858403262111
15. Kevric J, Subasi A (2017) Comparison of signal decomposition methods in classification of EEG signals for motor-imagery BCI system. *Biomed Signal Process Control* 31:398–406. doi: 10.1016/j.bspc.2016.09.007
16. Kos D, Kerckhofs E, Nagels G, et al (2008) Review article: Origin of fatigue in multiple sclerosis: Review of the literature. *Neurorehabil Neural Repair* 22:91–100. doi: 10.1177/1545968306298934
17. Lebedev MA, Nicolelis MAL (2017) Brain-machine interfaces: From basic science to neuroprostheses and neurorehabilitation. *Physiol Rev* 97:767–837. doi: 10.1152/physrev.00027.2016
18. Lew E, Chavarriaga R, Silvoni S, et al (2012) Detection of self-paced reaching movement intention from EEG signals. 5:1–17. doi: 10.3389/fneng.2012.00013
19. Naseer N, Hong K-S (2015) fNIRS-based brain-computer interfaces: A review. *Front Hum Neurosci*. doi: 10.3389/fnhum.2015.00003
20. Nicolas-Alonso LF, Gomez-Gil J (2012) Brain computer interfaces, a review. *Sensors* 12:1211–1279. doi: 10.3390/s120201211
21. Obrig H (2014) NIRS in clinical neurology - a “promising” tool? *Neuroimage* 85:535–546. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.03.045
22. Ramos-Murguialday A, Broetz D, Rea M, et al (2013) Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: A controlled study. *Ann Neurol* 74:100–108. doi: 10.1002/ana.23879
23. Ramos-Murguialday A, Schürholz M, Caggiano V, et al (2012) Proprioceptive Feedback and Brain Computer Interface (BCI) Based Neuroprostheses. *PLoS One*. doi: 10.1371/journal.pone.0047048
24. Rizzolatti G, Fabbri-Destro M, Cattaneo L (2009) Mirror neurons and their clinical relevance. *Nat Clin Pract Neurol* 5:24–34. doi: 10.1038/ncpneuro0990
25. Soekadar SR, Birbaumer N, Slutzky MW, Cohen LG (2015) Brain-machine interfaces in neurorehabilitation of stroke. *Neurobiol Dis* 83:172–179. doi: 10.1016/j.nbd.2014.11.025
26. Wagner J, Solis-Escalante T, Grieshofer P, et al (2012) Level of participation in robotic-assisted treadmill walking modulates midline sensorimotor EEG rhythms in able-bodied subjects. *Neuroimage* 63:1203–1211. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.08.019



27. Young AJ, Ferris DP (2017) State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 25:171–182. doi: 10.1109/TNSRE.2016.2521160
28. Lew E, Chavarriaga R, Silvoni S, Millán J del R (2012) Detection of self-paced reaching movement intention from EEG signals. *Front Neuroeng* 5:1–17. doi: 10.3389/fneng.2012.00013
29. Donati ARC, Shokur S, Morya E, et al (2016) Long-Term Training with a Brain-Machine Interface-Based Gait Protocol Induces Partial Neurological Recovery in Paraplegic Patients. *Sci Rep* 6:1–16. doi: 10.1038/srep30383
30. Ang KK, Guan C, Chua KSG, et al (2010) Clinical study of neurorehabilitation in stroke using EEG-based motor imagery brain-computer interface with robotic feedback. 2010 Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc EMBC'10 5549–5552. doi: 10.1109/IEMBS.2010.5626782

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Table 1. Main characteristics

Description	Results
MAIN INFORMATION ABOUT DATA	
Timespan	1964:2021
Sources (Journals, Books, etc)	420
Documents	874
Average years from publication	5.03
Average citations per documents	21.63
Average citations per year per doc	3.13
References	41104
DOCUMENT TYPES	
article	546
book	1
bookchapter	17
conferencepaper	145
conferencereview	4
editorial	18
erratum	1
letter	11
note	5
retracted	1
review	119
shortsurvey	6
DOCUMENT CONTENTS	
KeywordsPlus (ID)	6146
Author's Keywords (DE)	1946
AUTHORS	
Authors	3589
Author Appearances	4623
Authors of single-authored documents	40
Authors of multi-authored documents	3549
AUTHOR COLLABORATION	
Single-authored documents	45
Documents per Author	0.244
Authors per Document	4.11
Co-Authors per Documents	5.29
Collaboration Index	4.28

Table 2. Top-20 most globally cited documents

Paper	Year	Journal	Total Citations	Study desing	Clinical entity	Main topic	Use
Nicolas Alfonso LF[13]	2012	Sensors	997	Review	Multiple	BCI	Rehabilitation
Daly JJ and Wolpaw [21]	2008	Lancet Neurol	708	Review	Multiple	BCI	Rehabilitation
Ramos_Murguialday A[15]	2013	Ann Neurol	521	Research	Multiple	BCI	Motion
Naseer N[12]	2015	Front Human Neurosci	483	Review	Multiple	BCI	Motion
Young AJ[19]	2017	IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng	305	Review	Multiple	Exoskeleton	Motion
Chaudhary U[20]	2016	Nat Rev Neurol	293	Review	Multiple	BCI	Communication
Kos D[27]	2008	Neurorehabil Neural Repair	274	Review	MS	MS	Rehabilitation
Rizzolatti G[16]	2009	Nat Clin Pract Neurol	268	Review	Multiple	Mirror neurons	Rehabilitation
Donati Arc[23]	2016	Sci Rep	197	Research	SCI	BCI	Rehabilitation
Kevric J[26]	2017	Biomed Signal Process	194	Research	Multiple	BCI	Rehabilitation
Wagner J[18]	2012	Neuroimage	173	Research	Multiple	Robotcs	Rehabilitation
Dobkin BH[22]	2007	J Physiol	165	Conference	ALS, Locked-in Syndrome	BCI	Rehabilitation
Lebedev MA[10]	2017	Physiol Rev	162	Review	Multiple	BCI	Rehabilitation
Soekadar SR[17]	2015	Neurobiol Dis	156	Review	Stroke	BCI	Rehabilitation
Lew E[11]	2012	Front Neuroengineering	153	Research	Stroke	EEG decomposition	Rehabilitation
Elbert T[24]	2004	Neuroscientist	152	Review	TBI	Plasticity	Rehabilitation
Obrig H[14]	2014	Neuroimage	151	Review	Multiple	NIRS	Clinical
Ang KK[9]	2010	Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc EMBC	148	Review	Stroke	BCI	Rehabilitation
Altenmuller E[8]	2009	Ann New York Acad Sci	146	Research	Stroke	Plasticity	Rehabilitation
Ramos_Murguialday A[31]	2012	PLOS One	138	Reasearch	Stroke	BCI	Rehabilitaion

**Table 3.** Most locally cited authors, sources, and keywords

Rank	Authors		Sources		Keywords	
	Name	Citations	Name	Articles	Words	Occurrences
1	Pfurtscheller G	975	IEEE Transactions On Neural Systems And Rehabilitation Engineering	27	neurorehabilitation	147
2	Birbaumer N	875	Frontiers In Human Neuroscience	23	eeg	115
3	Wolpaw J R	501	Frontiers In Neuroscience	22	stroke	105
4	Cohen L G	450	Journal of Neural Engineering	20	rehabilitation	78
5	Neuper C	438	Journal of Neuroengineering And Rehabilitation	19	brain-computer interface	74
6	Mcfarland D J	329	Proceedings of The Annual International Conference Of The IEEE Engineering In Medicine And Biology Society EMBS	18	motor imagery	64
7	Guan C	326	Frontiers In Neurology	16	electroencephalography	53
8	Farina D	286	Neuroscience And Behavioral Physiology	14	bci	37
9	Hallett M	284	Neuroimage	11	brain computer interface	30
10	Ang K K	276	Neurorehabilitation And Neural Repair	11	virtual reality	28
11	Blankertz B	275	Clinical Neurophysiology	10	disorders of consciousness	25
12	Gharabaghi A	266	IFMBE Proceedings	10	electroencephalography (eeg)	25
13	Scherer R	259	Neurorehabilitation	10	electroencephalogram	24
14	Makeig S	237	Restorative Neurology And Neuroscience	10	neurofeedback	23
15	Nitsche M A	219	Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes In Artificial Intelligence And Lecture Notes In Bioinformatics)	9	neuroplasticity	23
16	Ramos Murguialday A	218	Sensors (Switzerland)	8	transcranial magnetic stimulation	22
17	Paulus W	215	Annals Of Physical And Rehabilitation Medicine	7	brain-computer interface (bci)	21
18	Pascual Leone A	205	Frontiers In Systems Neuroscience	7	braincomputer interface	19
19	Schalk G	191	Neural Plasticity	7	brain-machine interface	18
20	Laureys S	189	Biomedical Signal Processing And Control	6	minimally conscious state	17

**Table 4.** Top-20 scientific production by country

<b>Country</b>	<b>Articles</b>	<b>Frequency</b>	<b>SCP</b>	<b>MCP</b>	<b>MCPRatio</b>
USA	96	0,1435	76	20	0,2083
Italy	91	0,13602	73	18	0,1978
Germany	66	0,09865	38	28	0,4242
China	49	0,07324	41	8	0,1633
United Kingdom	40	0,05979	24	16	0,4
Japan	34	0,05082	32	2	0,0588
Korea	33	0,04933	28	5	0,1515
Spain	28	0,04185	11	17	0,6071
SWITZERLAND	22	0,03288	14	8	0,3636
India	20	0,0299	15	5	0,25
Canada	17	0,02541	9	8	0,4706
Denmark	16	0,02392	4	12	0,75
France	15	0,02242	7	8	0,5333
Austria	13	0,01943	9	4	0,3077
Poland	13	0,01943	12	1	0,0769
Australia	11	0,01644	6	5	0,4545
Brazil	10	0,01495	4	6	0,6
Belgium	9	0,01345	5	4	0,4444
Mexico	9	0,01345	9	0	0
Singapore	8	0,01196	3	5	0,625

SCP, single country publication; MCP, multiple country publication

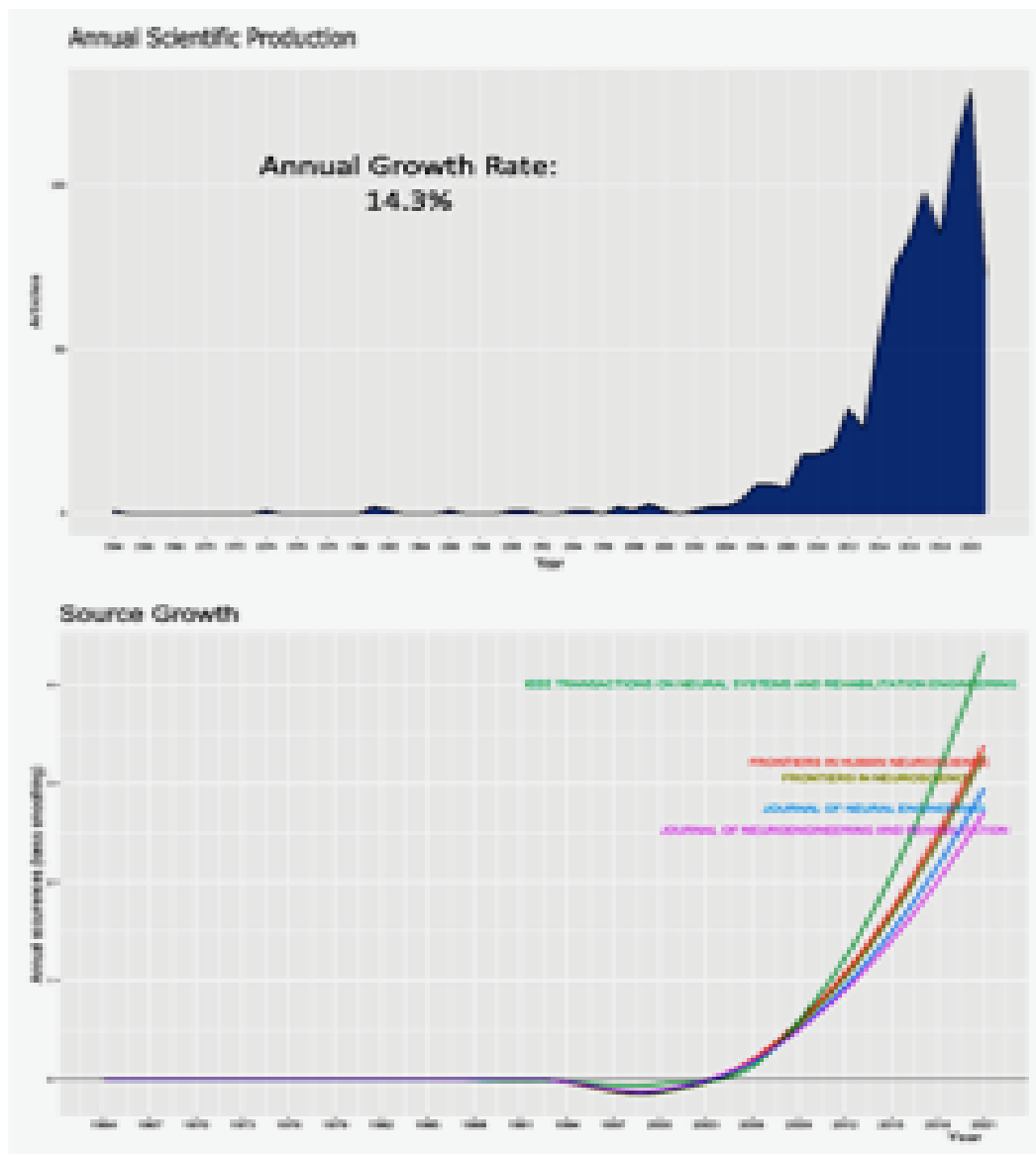
Table 5. Cluster analysis based on author's keyword co-occurrence.

Node	Cluster	Betweenness	Closeness	Page Rank
brain-computerinterface (bci)	1	2,19	0,01	0,01
electroencephalography (eeg)	1	2,74	0,01	0,01
motorimagery (mi)	1	0,00	0,01	0,01
bci	2	2,98	0,01	0,03
eeg	2	215,55	0,01	0,08
fmri	2	0,42	0,01	0,01
p300	2	0,00	0,01	0,00
virtualreality	2	5,73	0,01	0,02
braincomputerinterface	2	0,84	0,01	0,02
emg	2	0,00	0,01	0,01
neuro-rehabilitation	2	0,00	0,01	0,01
cerebralpalsy	2	0,13	0,01	0,01
disorders of consciousness	3	11,57	0,01	0,02
traumaticbraininjury	3	3,13	0,01	0,01
minimallyconsciousstate	3	4,93	0,01	0,02
vegetativestate	3	7,70	0,01	0,02
outcome	3	0,63	0,01	0,01
prognosis	3	0,00	0,01	0,01
coma	3	0,38	0,01	0,01
unresponsivewakefulnesssyndrome	3	0,00	0,01	0,01
neurorehabilitation	4	513,51	0,02	0,13
brain-machineinterface	4	0,49	0,01	0,01
brain-computerinterface	4	42,45	0,01	0,04
electroencephalography	4	17,28	0,01	0,06
transcranialmagneticstimulation	4	1,38	0,01	0,01
electroencephalogram (eeg)	4	0,13	0,01	0,01
motorimagery	4	27,94	0,01	0,05
neurofeedback	4	2,39	0,01	0,02
event-relateddesynchronization	4	0,00	0,01	0,01
motorlearning	4	0,16	0,01	0,01
functionalnear-infraredspectroscopy	4	0,02	0,01	0,01
electroencephalogram	4	0,89	0,01	0,01
spinalcordinjury	4	0,24	0,01	0,01
brain-robotinterface	4	0,00	0,01	0,01
functionalconnectivity	4	0,08	0,01	0,01
brain-computerinterfaces	4	0,00	0,01	0,01
functionalelectricalstimulation	4	0,91	0,01	0,01
neuromodulation	4	0,00	0,01	0,01
stroke	5	132,77	0,01	0,09
rehabilitation	5	78,27	0,01	0,05
multiplesclerosis	5	0,00	0,01	0,00
neuroplasticity	5	1,04	0,01	0,01
plasticity	5	0,83	0,01	0,01
motorcortex	5	0,04	0,01	0,01
non-invasivebrainstimulation	5	0,43	0,01	0,01
tdds	5	0,64	0,01	0,01
transcranialdirectcurrentstimulation	5	1,60	0,01	0,01
motorcontrol	5	0,00	0,01	
exoskeleton	5	0,47	0,01	0,02
braincomputerinterface	5	0,12	0,01	0,01

The cluster analysis was based on centrality measures, including betweenness, closeness, and a page rank. Betweenness refers to the number of the shortest paths passing through a given node. The higher the betweenness centrality of the node, the greater the ability to control information passing between the other nodes. The closeness is used to measure the distance of one node to other nodes in a network. Nodes with high closeness centrality obtain information better than other nodes or tend to have a more direct influence on other nodes.

## Figure Legends

**Figure 1.** There is a rising scientific interest in the use of EEG in neurorehabilitation, according to the annual scientific production (top) and source growth (bottom).

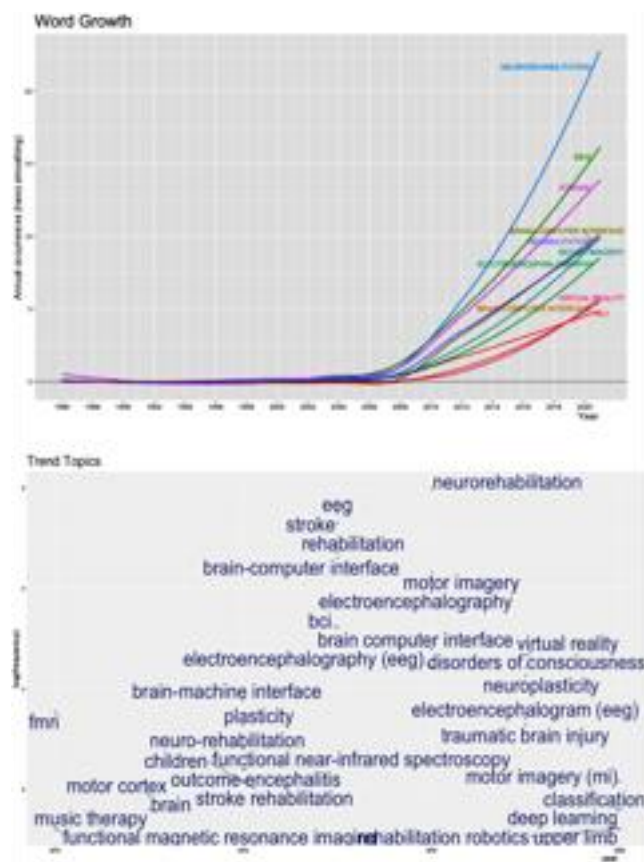




**Figure 2.** The figure shows the scientific production of the most influential authors.



**Figure 3.** We noted important changes in the scientific trends with time as recorded from the words growth (top) and trend topics (bottom) according to the author's keywords.



**Figure 4.** There are significant international collaborations among institutions and countries on the use of EEG in neurorehabilitation.

