

Κατανόηση της EEG ανάλυσης

Γιώργος Μανίκης



Event-Related Potentials (ERPs)

- ▶ Event-Related Potential (ERP) είναι το πρότυπο ηλεκτρικής δραστηριότητας του εγκεφάλου που εμφανίζεται σταθερά ως απόκριση σε ένα συγκεκριμένο συμβάν — ένα ερέθισμα, μια απόφαση ή μια ενέργεια
- ▶ Η λέξη-κλειδί είναι «με συνέπεια»: ο ίδιος τύπος συμβάντος παράγει πάντα ένα παρόμοιο μοτίβο, ενώ η τυχαία συνεχιζόμενη δραστηριότητα υποβάθρου του εγκεφάλου είναι διαφορετική κάθε φορά
- ▶ Η πρόκληση είναι ότι η απόκριση ERP είναι θαμμένη κάτω από μια μεγάλη ποσότητα συνεχούς εγκεφαλικού θορύβου — συνεχείς ταλαντώσεις άλφα, τυχαίες διακυμάνσεις και υπολειμματικό θόρυβο (Το σήμα είναι πολύ μικρότερο από τον θόρυβο)

Event-Related Potentials (ERPs)

💡 Χαρακτηριστικό Παράδειγμα

Φανταστείτε ότι προσπαθείτε να ακούσετε κάποιον να ψιθυρίζει μια συγκεκριμένη λέξη επανειλημμένα

.....αλλά υπάρχει δυνατός τυχαίος θόρυβος στο παρασκήνιο κάθε φορά.

Αν ηχογραφήσετε 100 επαναλήψεις και τις επικαλύψετε, ο τυχαίος θόρυβος έχει μέσο όρο μηδέν

.....(γιατί είναι διαφορετικός κάθε φορά), ενώ ο ψίθυρος γίνεται όλο και πιο καθαρός!!!

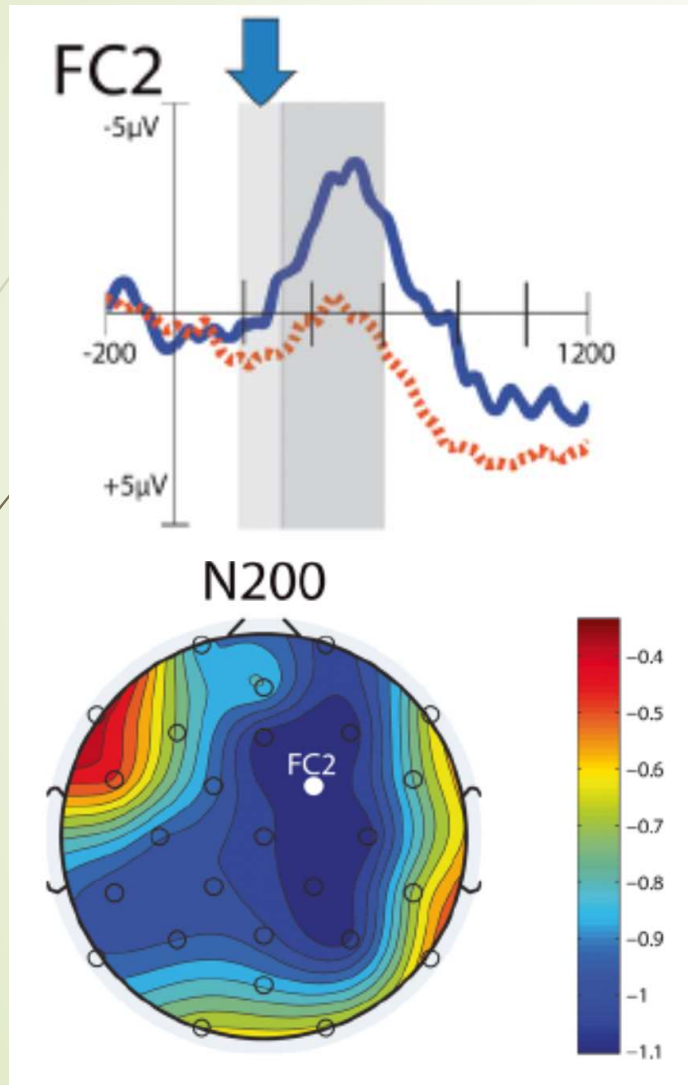
(γιατί κάθε φορά είναι ίδιος ο ψίθυρος).

Αυτό ακριβώς κάνει η μέθοδος υπολογισμού μέσου όρου ERP με τα εγκεφαλικά σήματα.

Event-Related Potentials (ERPs)

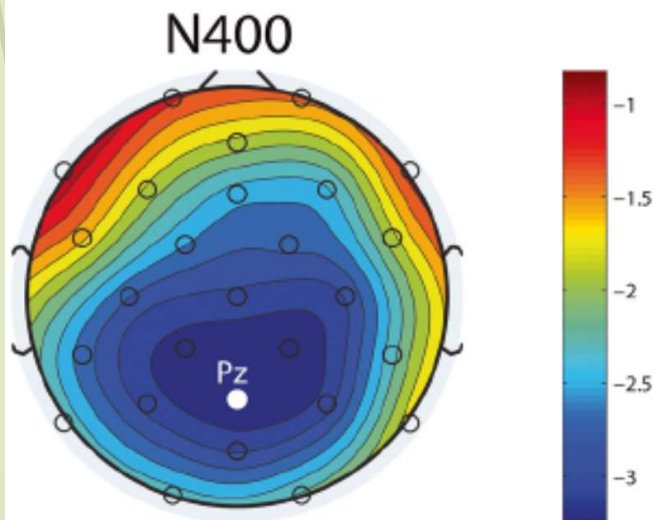
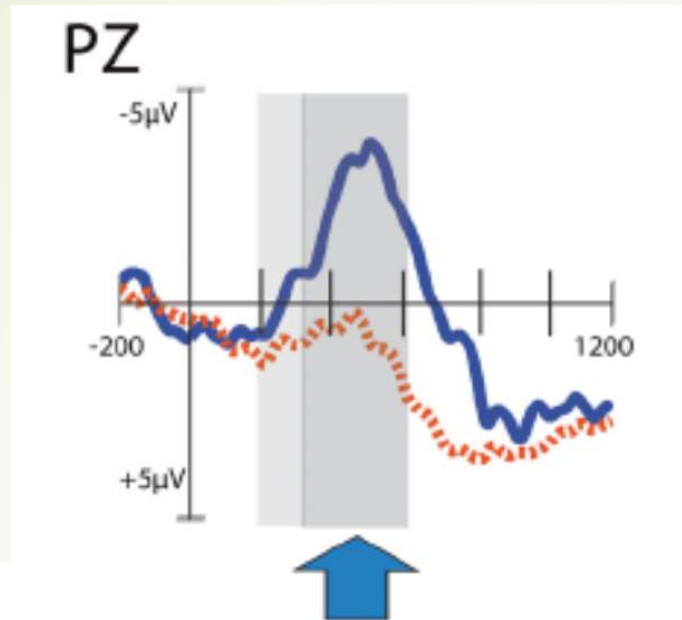
- ▶ Για να υπολογίσουμε ένα ERP, απλώς υπολογίζουμε το μέσο σήμα EEG σε όλες τις δοκιμές (π.χ. μιας πάθησης), από χρονική στιγμή σε χρονική στιγμή
- ▶ Η τυχαία εγκεφαλική δραστηριότητα — η οποία δεν συσχετίζεται από δοκιμή σε δοκιμή — ακυρώνεται
- ▶ Η απόκριση που είναι κλειδωμένη στο ερέθισμα — η οποία συμβαίνει ταυτόχρονα σε σχέση με το συμβάν σε κάθε δοκιμή — επιβιώνει και γίνεται ορατή
- ▶ Μια σημαντική πρακτική συνέπεια: περισσότερες δοκιμές = καθαρότερο ERP.
- ▶ Με 10 δοκιμές, το ERP εξακολουθεί να είναι αρκετά θορυβώδες. Με 100 δοκιμές, γίνεται ομαλό και ερμηνεύσιμο. Ο θόρυβος μειώνεται αναλογικά με την τετραγωνική ρίζα του αριθμού των δοκιμών

Τα Κλασικά Κύματα ERP (Το "Λεξικό" του Εγκεφάλου)



- ▶ Πώς διαβάζουμε τις ονομασίες: Το γράμμα δείχνει αν το κύμα πάει προς τα πάνω ή κάτω (P = Positive/Θετικό, N = Negative/Αρνητικό) και ο αριθμός δείχνει το πότε συμβαίνει σε χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms)
- ▶ **Μερικές από τις πιο γνωστές αντιδράσεις του εγκεφάλου:**
 - ▶ P100 (στα 100ms): Οπίσθιο τμήμα κεφαλής (ινιακός λοβός). Είναι η "επιβεβαίωση παραλαβής" της όρασης (Ο εγκέφαλος λέει: "Μόλις είδα μια εικόνα").
 - ▶ N100 (στα 100ms): Άνω/μετωπιαία περιοχή. Η αντίστοιχη αντίδραση για την ακοή (Ο εγκέφαλος λέει: "Μόλις άκουσα έναν ήχο").
 - ▶ N200 (στα 200ms): Μετωπο-κεντρική περιοχή. Εμφανίζεται όταν βλέπουμε κάτι μη αναμενόμενο ή όταν ο εγκέφαλος καλείται να πάρει μια απόφαση.

Τα Κλασικά Κύματα ERP (Το "Λεξικό" του Εγκεφάλου)



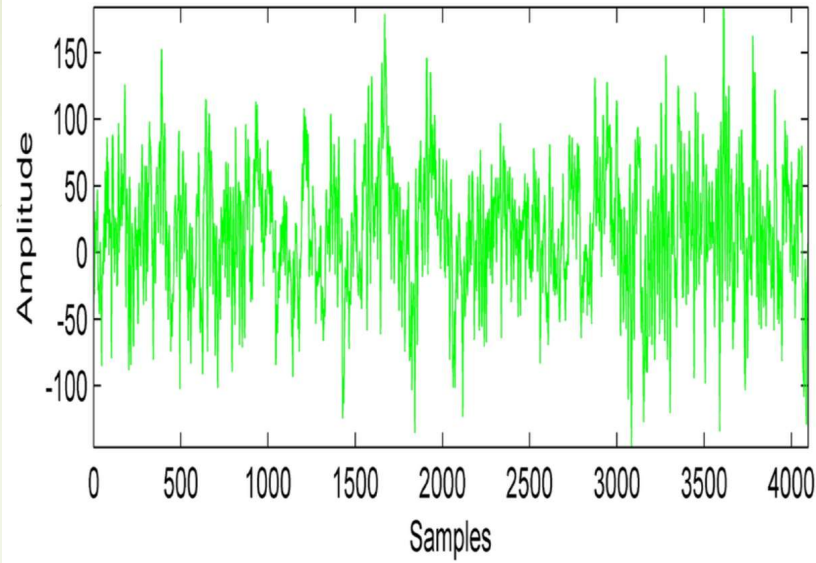
- ▶ P300 (στα 300ms): Εντοπίζεται στο κέντρο-πίσω. Πολύ διάσημο κύμα! Εμφανίζεται όταν αναγνωρίζουμε έναν "στόχο" ή κάτι σημαντικό που περιμέναμε να δούμε.
- ▶ N400 (στα 400ms): Εντοπίζεται αριστερά. Το κύμα του... παραλόγου! Εμφανίζεται όταν κάτι δεν βγάζει γλωσσικό νόημα.
 - ▶ Παράδειγμα: Αν διαβάσετε την πρόταση "Ο σκύλος γαβγίζει στο... σύννεφο", ο εγκέφαλός σας θα βγάλει ένα τεράστιο N400 στη λέξη σύννεφο!
- ▶ BP (Δυναμικό Ετοιμότητας): Εντοπίζεται στην κορυφή του κεφαλιού. Είναι το πιο εντυπωσιακό, γιατί ξεκινάει 500ms **ΠΡΙΝ** καν κουνηθούμε. Ο εγκέφαλος προετοιμάζει την κίνηση προτού καν εμείς αποφασίσουμε συνειδητά να την κάνουμε!

Πώς διαβάζουμε ένα γράφημα ERP

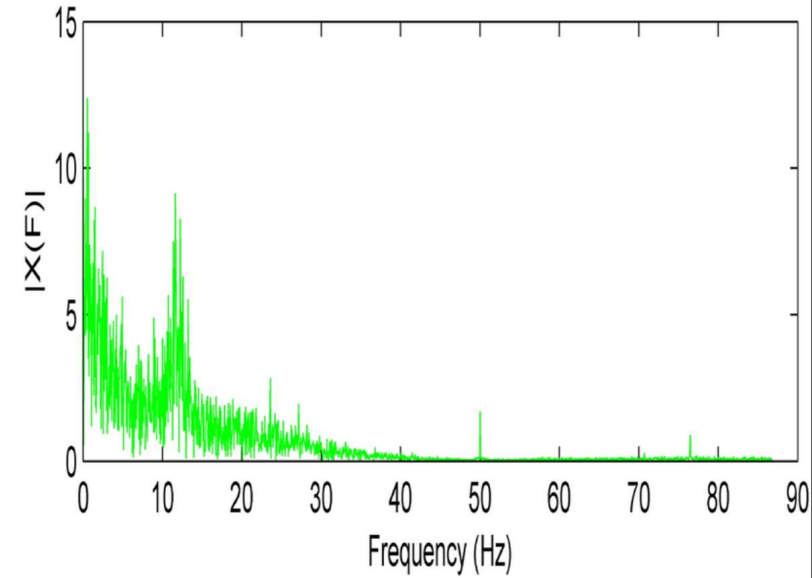
- ▶ Όταν βλέπουμε ένα γράφημα ERP στην οθόνη:
- ▶ Άξονας Χ (Οριζόντιος): Είναι ο χρόνος σε χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms). Το σημείο Μηδέν (0) είναι η ακριβής στιγμή που εμφανίστηκε το ερέθισμα.
- ▶ Άξονας Υ (Κάθετος): Είναι η τάση του ρεύματος (Voltage).
- ▶ Πριν το μηδέν (Baseline): Πρέπει να είναι μια επίπεδη γραμμή (σημαίνει ότι καθαρίσαμε σωστά τα δεδομένα).
- ▶ Μετά το μηδέν: Ψάχνουμε για τις κορυφές (peaks), δηλαδή την αντίδραση του εγκεφάλου.



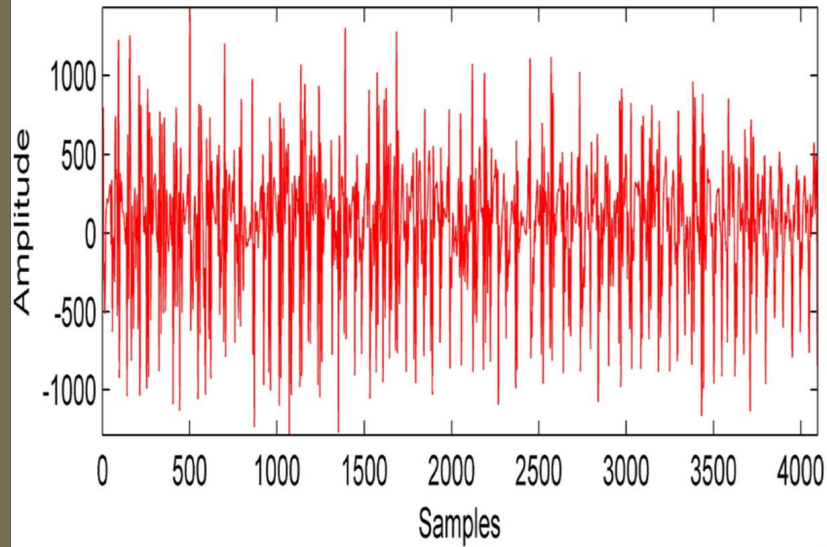
Normal EEG Signal



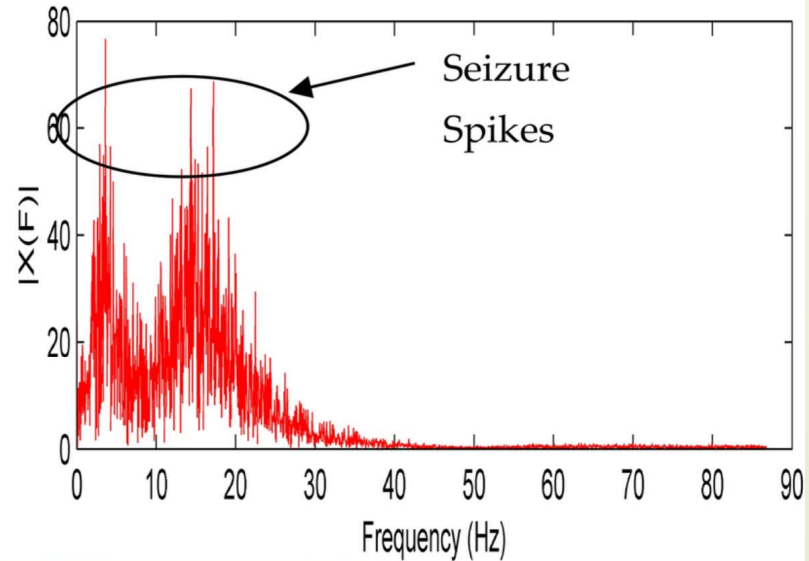
Spectrum of Normal EEG Signal



Seizure EEG Signal



Spectrum of Seizure EEG Signal



Το Πεδίο των Συχνοτήτων

- Κάθε εγκεφαλική κατάσταση έχει τον "ρυθμό" της
- Το σήμα μπορεί να μελετηθεί στον χρόνο, αλλά και στη **Συχνότητα** (πόσο γρήγορα ταλαντώνεται).
- **Παράδειγμα:** Σκεφτείτε μια μουσική συγχορδία. Στον χρόνο ακούμε έναν πολύπλοκο ήχο. Στη συχνότητα, βλέπουμε ακριβώς ποιες επιμέρους νότες παίζουν ταυτόχρονα.
- **PSD (Πυκνότητα Φασματικής Ισχύος):** Ένα γράφημα που μας δείχνει πόση "δύναμη" (ισχύ) έχει η κάθε συχνότητα μέσα στο σήμα μας. Στο EEG, οι χαμηλές συχνότητες έχουν πάντα μεγαλύτερη ισχύ.

Οι Συχνότητες του Εγκεφάλου (Bands)

Δέλτα (Delta / 0.5 – 4 Hz): Βαθύς, ασυνείδητος ύπνος

- Είναι τα πιο αργά κύματα, αλλά με το μεγαλύτερο πλάτος. Εμφανίζονται στα στάδια 3-4 του ύπνου.
- **Παράδειγμα:** Είναι η "Λειτουργία Συντήρησης" (System Update) του εγκεφάλου. Ο εγκέφαλος κλείνει τις επαφές με τον έξω κόσμο για να επουλώσει το σώμα. Στον ξύπνιο άνθρωπο, εμφανίζονται μόνο σε βρέφη ή σε άτομα με σοβαρές εγκεφαλικές βλάβες.

Θήτα (Theta / 4 – 8 Hz): Υπνηλία, ονειροπόληση και μνήμη.

- Είναι η "γέφυρα" μεταξύ ύπνου και ξύπνιου.
- **Παράδειγμα:** Σκεφτείτε την "ύπνωση του αυτοκινητόδρομου". Οδηγείτε σε έναν γνώριμο δρόμο για ώρα, και ξαφνικά συνειδητοποιείτε ότι δεν θυμάστε καθόλου τα τελευταία 5 χιλιόμετρα! Ή εκείνη την περίεργη, θολή κατάσταση μισο-ύπνου ακριβώς πριν αποκοιμηθείτε το βράδυ. Αυτό είναι το κύμα Θήτα!

Οι Συχνότητες του Εγκεφάλου (Bands)

Άλφα (Alpha / 8 – 13 Hz): Ήρεμη εγρήγορση.

- Είμαστε ξύπνιοι, αλλά ο εγκέφαλος δεν επεξεργάζεται κάτι δύσκολο (κυριαρχεί στον οπτικό φλοιό).
- **Παράδειγμα:** Κάθεστε στον καναπέ μετά από μια κουραστική μέρα, παίρνετε μια βαθιά ανάσα και κλείνετε τα μάτια σας. Εκείνη τη στιγμή, το κύμα Άλφα εκτοξεύεται! Αν κάποιος σας φωνάξει "Πόσο κάνει 13x4;" και ανοίξετε τα μάτια σας, το Άλφα εξαφανίζεται αμέσως.

Μυ (Μι / 8 – 12 Hz): Το "ρελαντί" του κινητικού φλοιού.

- Έχει την ίδια συχνότητα με το Άλφα, αλλά βρίσκεται μόνο στο κέντρο του κεφαλιού (εκεί που ελέγχεται η κίνηση).
- **Παράδειγμα:** Είναι η μηχανή του αυτοκινήτου που δουλεύει στο ρελαντί. Μόλις πατήσετε γκάζι (ή φανταστείτε ότι κινείτε το χέρι σας), το ρελαντί σταματάει (αυτό είναι το ERD που λέγαμε!).

Οι Συχνότητες του Εγκεφάλου (Bands)

Βήτα (Beta / 13 – 30 Hz): Ενεργή σκέψη, συγκέντρωση (και... στρες).

- Ο εγκέφαλος δουλεύει στο φουλ, επεξεργάζεται δεδομένα του περιβάλλοντος ή λύνει προβλήματα.
- **Παράδειγμα:** Η κατάσταση στην οποία βρίσκεστε όταν γράφετε ένα δύσκολο διαγώνισμα, όταν κάνετε μια έντονη συζήτηση-διαφωνία με κάποιον, ή αφού έχετε πιει έναν διπλό εσπρέσο!

Ιδανικά, όλοι εσείς που παρακολουθείτε τώρα, εκπέμπετε κύματα Βήτα! Αν εκπέμπετε Θήτα, σημαίνει ότι σας κούρασα και σας παίρνει ο ύπνος!

Γάμμα (Gamma / 30+ Hz): Peak Performance

- Πολύ γρήγορα κύματα. Εμφανίζονται σε στιγμές ακραίας, ταυτόχρονης επεξεργασίας πληροφοριών από πολλά μέρη του εγκεφάλου (π.χ. όταν έχετε μια ξαφνική αναλαμπή / ιδέα "Εύρηκα!")

Ανάλυση Χρόνου-Συχνότητας (Spectrogram)

- **Ο περιορισμός του PSD:** Το PSD μάς λέει ποιες συχνότητες υπάρχουν, αλλά δεν μας λέει **ΠΟΤΕ** εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της καταγραφής.
- Το **Φασματογράφημα (Spectrogram / TFR):** Ένας δισδιάστατος χάρτης όπου ο οριζόντιος άξονας είναι ο χρόνος, ο κάθετος η συχνότητα, και το χρώμα δείχνει την ισχύ. Μοιάζει με μια "παρτιτούρα" του εγκεφάλου.
- Το **δίλημμα της Ανάλυσης (Resolution Trade-off):** Δεν μπορούμε να έχουμε ταυτόχρονα τέλεια ακρίβεια στον χρόνο και τέλεια ακρίβεια στη συχνότητα (Αρχή Αβεβαιότητας).
- Μικρό παράθυρο ανάλυσης = Ξέρουμε πότε έγινε κάτι, αλλά όχι ποια ακριβώς συχνότητα ήταν.
- Μεγάλο παράθυρο = Ξέρουμε την ακριβή συχνότητα, αλλά χάνουμε τον ακριβή χρόνο.
- **Η λύση (Morlet Wavelets):** Μια έξυπνη μέθοδος που προσαρμόζει το παράθυρο ανάλυσης ανάλογα με τη συχνότητα

ERD και ERS - Ο Κινητικός Φλοιός εν Δράσει

Αποκωδικοποιώντας τη Φαντασιακή Κίνηση (Motor Imagery)

- ▶ Όταν ο κινητικός φλοιός (το τμήμα του εγκεφάλου που ελέγχει την κίνηση) δεν κάνει τίποτα, παράγει έναν σταθερό ρυθμό συγχρονισμού (Ρυθμός Mu). Είναι σαν τη μηχανή ενός αυτοκινήτου στο ρελαντί.
- ▶ **ERD (Event-Related Desynchronization):** Όταν κινούμαστε ή απλώς φανταζόμαστε ότι κινούμαστε, αυτός ο σταθερός ρυθμός διασπάται και η ισχύς του πέφτει. Ο φλοιός ενεργοποιείται!
- ▶ **ERS (Event-Related Synchronization):** Μόλις σταματήσουμε να φανταζόμαστε την κίνηση, η ισχύς στο κύμα Beta αυξάνεται απότομα (Beta Rebound). Ο φλοιός "κάνει reset" και επιστρέφει στην αδράνεια.
- ▶ **Παράδειγμα:** Μια ομάδα ανθρώπων που χειροκροτεί ρυθμικά (Ρελαντί). Κάποιοι σταματούν για να κάνουν μια δουλειά (ERD - πτώση έντασης). Όταν τελειώσουν, επιστρέφουν και χειροκροτούν ακόμα πιο δυνατά (ERS).

Πλευρίωση - Διαχωρίζοντας Δεξί και Αριστερό Χέρι

Πώς ξέρουμε ποιο χέρι σκέφτεται ο χρήστης;

- ▶ Η νευρολογία του εγκεφάλου λειτουργεί "χιαστί" (αντίπλευρα).
- ▶ Δεξί χέρι: Η φαντασία κίνησης του δεξιού χεριού προκαλεί πτώση ισχύος (ERD) στο Αριστερό Ημισφαίριο του εγκεφάλου (στο ηλεκτρόδιο C3).
- ▶ Αριστερό χέρι: Η φαντασία κίνησης του αριστερού χεριού προκαλεί αντίστοιχα ERD στο Δεξί Ημισφαίριο (στο ηλεκτρόδιο C4).
- ▶ Αυτή η συμμετρική διαφορά στην ισχύ μεταξύ των αριστερών και δεξιών ηλεκτροδίων είναι η "νευρική υπογραφή" που προσπαθούμε να διδάξουμε στον υπολογιστή να αναγνωρίζει.

Εξαγωγή Χαρακτηριστικών (Feature Extraction)

Γιατί δεν δίνουμε τα EEG raw δεδομένα απευθείας στον αλγόριθμο;

- Το πρόβλημα των πολλών δεδομένων: Μια απλή καταγραφή 4 δευτερολέπτων περιέχει πάνω από 65.000 αριθμούς (64 ηλεκτρόδια × χρόνος). Αν δώσουμε όλα αυτά σε έναν αλγόριθμο, εκείνος απλώς θα τα "αποστηθίσει" (**overfitting**) μαζί με τον θόρυβο και θα αποτύχει σε νέα δεδομένα.
- Η λύση: Πρέπει να "συμπιέσουμε" την πληροφορία, κρατώντας μόνο ό,τι είναι χρήσιμο. Αυτά ονομάζονται **χαρακτηριστικά (Features)**.
- Πώς το κάνουμε (Band Power): Αντί για 65.000 αριθμούς, υπολογίζουμε τον μέσο όρο της ισχύος μόνο στις συγκεκριμένες συχνότητες (Alpha, Beta) και μόνο στα συγκεκριμένα ηλεκτρόδια (C3, C4) που μας ενδιαφέρουν. Έτσι καταλήγουμε με 4-5 κρίσιμους αριθμούς ανά προσπάθεια.
- **Παράδειγμα:** Ο γιατρός δεν εξετάζει κάθε κύτταρο στο αίμα σας. Εξετάζει συγκεκριμένους "δείκτες" (Features) όπως το ζάχαρο ή η χοληστερίνη, για να βγάλει συμπέρασμα.

Χωρικά Φίλτρα - Μέθοδος CSP (Common Spatial Patterns)

Βελτιώνοντας τα δεδομένα μας με εικονικά ηλεκτρόδια

- **Το πρόβλημα των μεμονωμένων ηλεκτροδίων:** Το σήμα του εγκεφάλου απλώνεται. Ένα μόνο ηλεκτρόδιο (π.χ. το C3) καταγράφει το σήμα του χεριού, αλλά μαζί του καταγράφει και σήματα από γειτονικές περιοχές.
- **Τι είναι το CSP;** Είναι ένας αλγόριθμος που δημιουργεί "Χωρικά Φίλτρα". Λαμβάνει υπόψη ΟΛΑ τα ηλεκτρόδια και τα πολλαπλασιάζει με συγκεκριμένα βάρη για να δημιουργήσει ένα "εικονικό" ηλεκτρόδιο.
- **Τι πετυχαίνει το CSP;** Βρίσκει τη μαθηματική φόρμουλα ώστε το φιλτραρισμένο σήμα να έχει τη μέγιστη δυνατή ισχύ όταν ο χρήστης σκέφτεται το Δεξί χέρι, και την ελάχιστη δυνατή ισχύ όταν σκέφτεται το Αριστερό (και αντίστροφα).
- **Παράδειγμα:** Ένας ηχολήπτης σε μια συναυλία ανεβοκατεβάζει την ένταση από τα διάφορα μικρόφωνα της σκηνής για να απομονώσει 100% τον ήχο μόνο της κιθάρας, κρύβοντας τα ντραμς.

Διεπαφές Εγκεφάλου-Υπολογιστή (BCI) στην Πράξη

Μετατρέποντας τη Σκέψη σε Πράξη

Μια διεπαφή BCI διαβάζει τα εγκεφαλικά σήματα, τα περνάει από τη διαδικασία που είδαμε (Καθαρισμός -> Εξαγωγή CSP -> Ταξινομητές/Classifiers) και τα μετατρέπει σε εντολές συσκευών.

Τα 3 βασικά είδη BCI:

- ▶ **Motor Imagery (Φαντασιακή Κίνηση):** Βασίζεται σε καταστολή των ρυθμών Mu/Beta. Χρησιμοποιείται για έλεγχο αναπηρικών αμαξιδίων ή ρομποτικών χεριών και σε προγράμματα νευροαποκατάστασης μετά από εγκεφαλικό (βοηθά τον εγκέφαλο να δημιουργήσει νέες συνδέσεις).
- ▶ **P300 Speller:** Βασίζεται στα ERPs. Γράμματα αναβοσβήνουν σε μια οθόνη. Όταν αναβοσβήσει το γράμμα που κοιτάζει ο χρήστης, ο εγκέφαλος βγάζει ένα κύμα P300. Ιδανικό για πληκτρολόγηση από ασθενείς με πλήρη παράλυση (π.χ. ALS).
- ▶ **SSVEP:** Οπτικά ερεθίσματα αναβοσβήνουν σε διαφορετικές συχνότητες (π.χ. 10Hz, 15Hz). Ο εγκέφαλος "συντονίζεται" στη συχνότητα αυτού που κοιτάμε. Γρήγορος έλεγχος μενού και κερσόρων.