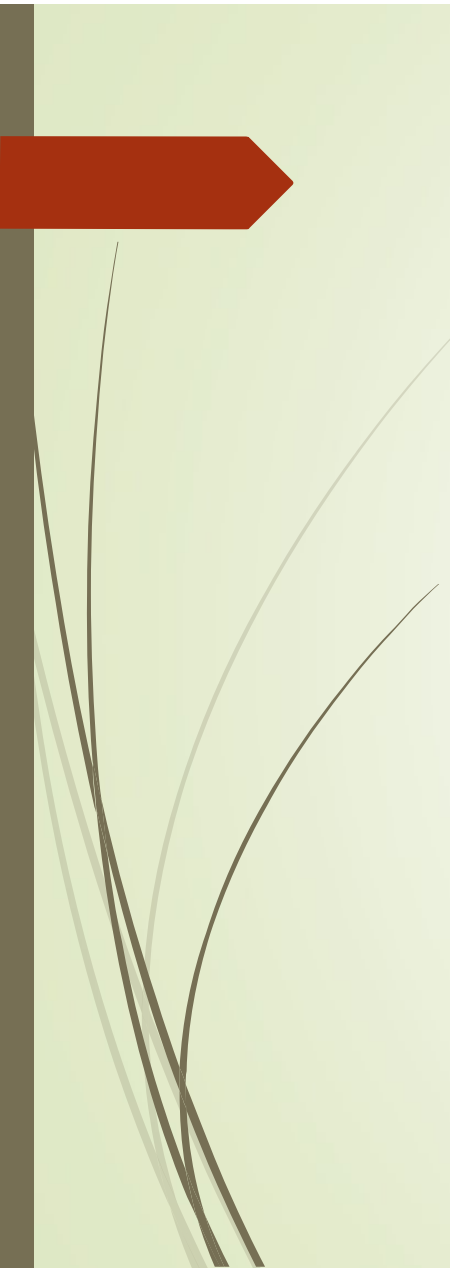




# Κατανόηση της προ- επεξεργασίας του EEG

Γιώργος Μανίκης

- 
- ▶ Ο εγκέφαλος περιέχει περίπου 86 δισεκατομμύρια νευρώνες. Όταν οι νευρώνες ενεργοποιούνται — δηλαδή, όταν στέλνουν ηλεκτρικά σήματα ο ένας στον άλλο — παράγουν μικροσκοπικά ηλεκτρικά πεδία
  - ▶ Το EEG ανιχνεύει τη συνδυασμένη ηλεκτρική δραστηριότητα εκατομμυρίων νευρώνων που ενεργοποιούνται μαζί, η οποία μετρείται ως τάση στην επιφάνεια του τριχωτού της κεφαλής.
  - ▶ Ιδού η πρόκληση: το σήμα που προσπαθούμε να μετρήσουμε είναι απίστευτα μικρό. Ένα τυπικό εγκεφαλικό σήμα είναι μεταξύ 5 και 50 μικροβόλτ ( $\mu\text{V}$ ) — δηλαδή 5 έως 50 εκατομμυριοστά του βολτ. Για λόγους σύγκρισης, μια τυπική μπαταρία AA παράγει 1,5 βολτ — περίπου 30.000 φορές μεγαλύτερη από το εγκεφαλικό σήμα.
  - ▶ Ο ενισχυτής EEG ουσιαστικά προσπαθεί να ακούσει έναν ψίθυρο σε ένα δωμάτιο γεμάτο θόρυβο.

## Πόσο μεγάλα είναι τα artifacts

Πηγή θορύβου	Τυπικό πλάτος	Πόσο μεγαλύτερο από τον εγκέφαλο;	Πώς μοιάζει
Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα εγκεφάλου (τι θέλουμε)	5 – 50 $\mu\text{V}$	$\times 1$ (ο στόχος)	Μικρά κυματιστά κύματα
Ανοιγοκλείσιμο των ματιών	100 – 2000 $\mu\text{V}$	$\times 10$ έως $\times 100$ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ	Γιγαντιαία αιχμηρή αιχμή στα μετωπικά κανάλια
Πλάγια κίνηση των ματιών	50 – 500 $\mu\text{V}$	$\times 5$ έως $\times 50$ μεγαλύτερο	Απότομο βήμα προς τα πάνω ή προς τα κάτω
Μυς της γνάθου / του μετώπου	50 – 1000 $\mu\text{V}$	$\times 5$ έως $\times 100$ μεγαλύτερο	Πυκνός γρήγορος βόμβος
Καρδιακός παλμός (ΗΚΓ)	20 – 200 $\mu\text{V}$	$\times 2$ έως $\times 20$ μεγαλύτερο	Κανονικός παλμός ~μία φορά ανά δευτερόλεπτο
Βόμβος γραμμής ρεύματος (50/60 Hz)	5 – 100 $\mu\text{V}$	Μπορεί να ισούται ή να ξεπερνά τον εγκέφαλο	Σταθερή λεπτή ταλάντωση
Κίνηση ηλεκτροδίων	100 – 5000 $\mu\text{V}$	Μπορεί να καλύψει πλήρως τον εγκέφαλο	Ξαφνικό μεγάλο άλμα ή κύμα

# Η πλήρης διαδικασία προεπεξεργασίας

1

## Set electrode positions (montage)

Tell the software where each of the 64 electrodes sits on the scalp. This is needed for all spatial operations later, like interpolation and topographic maps.

2

## Mark and interpolate bad channels

Identify broken or noisy electrodes and reconstruct their signals from neighboring good channels.

3

## Average re-referencing

Remove the bias introduced by the original recording reference electrode.

4

## Notch filter (50 / 60 Hz)

Remove the constant hum from the mains electricity supply.

5

## Bandpass filter (1 – 40 Hz)

Remove slow electrode drifts and high-frequency muscle noise.

6

## ICA — fit, identify, remove

Mathematically separate the EEG into independent sources and subtract the eye-blink, eye-movement, and cardiac components.

7

## Epoching

Cut the long continuous recording into short fixed-length windows, each aligned to an experimental event.

8

## Baseline correction

Subtract the pre-event average from each trial so all trials start from zero.

9

## Epoch rejection

Discard trials that still contain amplitude spikes too large to be clean brain signals.

10

## Save clean epochs

Store the cleaned data to disk for analysis in Tutorial 3.

## Το ηλεκτρόδιο αναφοράς

- ▶ Πριν μπορέσουμε να κατανοήσουμε το ηλεκτρόδιο αναφοράς, πρέπει να κατανοήσουμε κάτι θεμελιώδες σχετικά με την τάση
- ▶ ***Η τάση δεν είναι ποτέ απόλυτη τιμή. Είναι πάντα η διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ δύο συγκεκριμένων σημείων. Δεν μπορείτε να μετρήσετε «την τάση στο ηλεκτρόδιο Fp1». Μπορείτε να μετρήσετε μόνο «την τάση στο Fp1 σε σύγκριση με κάποιο άλλο επιλεγμένο σημείο». Αυτό το επιλεγμένο σημείο ονομάζεται σημείο αναφοράς.***
- ▶ Το σήμα του εγκεφάλου δεν έχει αλλάξει — αλλά οι αριθμοί που καταγράφονται σε κάθε ηλεκτρόδιο εξαρτώνται εξ ολοκλήρου από το ηλεκτρόδιο αναφοράς που επιλέξατε. Αυτό σημαίνει ότι δύο ερευνητές που καταγράφουν την ίδια εγκεφαλική δραστηριότητα με διαφορετικές τοποθετήσεις αναφοράς θα λάβουν ίχνη EEG διαφορετικής εμφάνισης, παρόλο που η υποκείμενη βιολογία είναι πανομοιότυπη.

## Γιατί έχει σημασία η επιλογή αναφοράς

- ▶ Κατά την καταγραφή, ο ενισχυτής EEG μετρά τη διαφορά τάσης μεταξύ κάθε ενεργού ηλεκτροδίου του τριχωτού της κεφαλής και ενός επιλεγμένου ηλεκτροδίου αναφοράς.
- ▶ Οποιαδήποτε ηλεκτρική δραστηριότητα υπάρχει στο ηλεκτρόδιο αναφοράς αφαιρείται ταυτόχρονα από κάθε μεμονωμένο κανάλι.
- ▶ Αυτό δημιουργεί ένα σοβαρό πρόβλημα: εάν το ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετηθεί κοντά σε οποιαδήποτε περιοχή του εγκεφάλου, η δραστηριότητα από αυτήν την περιοχή του εγκεφάλου αφαιρείται από όλα τα κανάλια, με αποτέλεσμα η περιοχή αυτή να φαίνεται ότι έχει λιγότερη δραστηριότητα από ό,τι στην πραγματικότητα

### ⚠ Ένα συγκεκριμένο παράδειγμα για το τι πάει στραβά

Ας υποθέσουμε ότι το ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετείται στο Cz (στην κορυφή του κεφαλιού, ακριβώς πάνω από τον κινητικό φλοιό). Τώρα φανταστείτε ότι ο συμμετέχων φαντάζεται να κινεί το δεξί του χέρι — αυτό ενεργοποιεί τον αριστερό κινητικό φλοιό, ο οποίος απέχει μόλις λίγα εκατοστά από το Cz.

Επειδή το Cz είναι το σήμα αναφοράς, ο ενισχυτής αφαιρεί το σήμα του κινητικού φλοιού από κάθε άλλο κανάλι. Το αποτέλεσμα: φαίνεται ότι υπάρχει πολύ μικρή δραστηριότητα του κινητικού φλοιού στα δεδομένα — παρόλο που ο εγκέφαλος είναι στην πραγματικότητα πολύ ενεργός. Η επιλογή αναφοράς έχει αποκρύψει το ίδιο το σήμα που θέλαμε να μετρήσουμε.

## Η Μέση Αναφορά — Η Λύση μας

- ▶ Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη λύση στην έρευνα EEG είναι η **μέση τιμή αναφοράς**.

🗨️ Ο μέσος όρος αναφοράς — Με απλά λόγια

Βήμα 1: Σε κάθε χρονικό σημείο, προσθέστε τις τιμές τάσης και από τα 64 ηλεκτρόδια.

Βήμα 2: Διαιρέστε με το 64 για να βρείτε τον μέσο όρο.

Βήμα 3: Αφαιρέστε αυτόν τον μέσο όρο από την τιμή κάθε ηλεκτροδίου σε αυτό το χρονικό σημείο.

Μετά από αυτήν την επέμβαση, ο μέσος όρος όλων των καναλιών είναι μηδέν σε κάθε χρονικό σημείο. Κανένα μεμονωμένο ηλεκτρόδιο δεν κυριαρχεί. Η αναφορά κατανέμεται πλέον ισότιμα σε ολόκληρο το τριχωτό της κεφαλής αντί να συγκεντρώνεται σε μία μόνο θέση.

## Αλλά..... πρέπει πρώτα να διορθώσουμε τα κακά κανάλια

- ▶ Η μέση τιμή αναφοράς λειτουργεί υπολογίζοντας τον μέσο όρο όλων των καναλιών. Εάν ένα κανάλι είναι σπασμένο και καταγράφει 500  $\mu\text{V}$  θορύβου αντί για ένα πραγματικό εγκεφαλικό σήμα, αυτά τα 500  $\mu\text{V}$  προστίθενται στον μέσο όρο — ο οποίος στη συνέχεια αφαιρείται από κάθε άλλο κανάλι, κατανέμοντας τον θόρυβο και στα 63 υπόλοιπα κανάλια.
- ▶ **Γι' αυτό ο κανόνας είναι απόλυτος:** διορθώστε τα προβληματικά κανάλια πριν υπολογίσετε τη μέση αναφορά. Ένα μόνο προβληματικό κανάλι μπορεί να μολύνει ολόκληρο το σύνολο δεδομένων εάν αγνοηθεί αυτός ο κανόνας.

## Φιλτράρισμα: Διατήρηση των συχνοτήτων που θέλουμε

- ▶ Τα σήματα EEG αποτελούνται από ταλαντώσεις — ρυθμικές διακυμάνσεις προς τα πάνω και προς τα κάτω. Ένα σήμα 10 Hz εναλλάσσεται 10 φορές ανά δευτερόλεπτο. Ένα σήμα 50 Hz εναλλάσσεται 50 φορές ανά δευτερόλεπτο
- ▶ Διαφορετικοί τύποι εγκεφαλικής δραστηριότητας παράγουν ταλαντώσεις με διαφορετικές ταχύτητες (συχνότητες)
- ▶ Διαφορετικοί τύποι θορύβου έχουν επίσης χαρακτηριστικές συχνότητες
- ▶ Αυτή η δομή συχνότητας είναι που καθιστά δυνατό το φιλτράρισμα: εάν ο θόρυβος καταλαμβάνει διαφορετικό εύρος συχνοτήτων από τα εγκεφαλικά σήματα που μας ενδιαφέρουν, μπορούμε μαθηματικά να τον αφαιρέσουμε

## Φιλτράρισμα: Διατήρηση των συχνοτήτων που θέλουμε

### 💡 Η αναλογία του ισοσταθμιστή

Σκεφτείτε τον γραφικό ισοσταθμιστή σε μια συσκευή αναπαραγωγής μουσικής — τη συσκευή που σας επιτρέπει να ελέγχετε ανεξάρτητα τα μπάσα, τις μεσαίες και τις υψηλές συχνότητες. Μπορείτε να ενισχύσετε τα μπάσα χωρίς να επηρεάσετε τα πρίμα και να μειώσετε τα πρίμα χωρίς να αγγίξετε τα μπάσα. Κάθε ζώνη συχνοτήτων είναι ανεξάρτητη.

Ένα φίλτρο στο EEG κάνει ακριβώς αυτό. Μπορεί να μειώσει ή να εξαλείψει συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων από το σήμα, αφήνοντας άλλες περιοχές εντελώς ανέπαφες. Το φίλτρο εγκοπής «χαμηλώνει» μια συγκεκριμένη συχνότητα (50 Hz). Το φίλτρο ζώνης διέλευσης «αυξάνει» την περιοχή που θέλουμε (1–40 Hz) και αφαιρεί οτιδήποτε βρίσκεται έξω από αυτήν.

## Οι ζώνες συχνοτήτων EEG

Εύρος συχνοτήτων	Όνομα	Τι υπάρχει;	Η Δράση μας
<b>Κάτω από 1 Hz</b>	Υπο-δέλτα (αργή μετατόπιση)	Κίνηση ηλεκτροδίων, ιδρώτας, αλλαγές θερμοκρασίας — ΟΧΙ εγκέφαλος	Αφαίρεση (φίλτρο υψηλής διέλευσης)
<b>0,5 – 4 Hz</b>	Δέλτα	Βαθύς ύπνος, πολύ αργές εγκεφαλικές διεργασίες	Διατήρηση (για μελέτες ύπνου)
<b>4 – 8 Hz</b>	Θήτα	Κωδικοποίηση μνήμης, υπνηλία, συναισθηματική επεξεργασία	Διατήρηση
<b>8 – 13 Hz</b>	Άλφα / Μου	Χαλαρή εγρήγορση · ρυθμός αδράνειας κινητικού φλοιού (Μυ) πάνω από C3/C4	Διατήρηση — κρίσιμη για την κινητική απεικόνιση BCI
<b>13 – 30 Hz</b>	Βήτα	Ενεργητική σκέψη, κινητικός σχεδιασμός, προσοχή	Διατήρηση — κρίσιμη για την κινητική απεικόνιση BCI
<b>30 – 80 Hz</b>	Γάμμα	Υψηλού επιπέδου γνωστική λειτουργία · περιέχει επίσης σημαντικό μυϊκό θόρυβο ΗΜΓ	Διατήρηση ή μερική αφαίρεση
<b>Πάνω από 40–80 Hz</b>	Θόρυβος υψηλής συχνότητας	Κυρίως μυς της γνάθου, του λαιμού και του μετώπου (ΗΜΓ) — ΟΧΙ εγκέφαλος	Αφαίρεση (φίλτρο χαμηλής διέλευσης)
<b>50 Hz ακριβώς</b>	Βουητό γραμμής ρεύματος	ηλεκτρικό δίκτυο — ΟΧΙ στον εγκέφαλο (50 Hz EU, 60 Hz στις ΗΠΑ)	Αφαίρεση (φίλτρο εγκοπής)

## Τα τρία φίλτρα που εφαρμόζουμε

- **Φίλτρο 1: Το φίλτρο εγκοπής (notch filter) — Σίγαση του βουητού της πρίζας ρεύματος**
- Οι ευρωπαϊκές ηλεκτρικές πρίζες παρέχουν ρεύμα ακριβώς στα 50 Hz (60 Hz στις ΗΠΑ)
- Αυτό το ταλαντευόμενο ρεύμα παράγει ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που ακτινοβολεί από κάθε καλώδιο τροφοδοσίας στο κτίριο
- Τα καλώδια καταγραφής EEG είναι αρκετά ευαίσθητα ώστε να ανιχνεύουν αυτήν την ακτινοβολία, δημιουργώντας μια σταθερή ταλάντωση 50 Hz που εμφανίζεται πανομοιότυπα σε κάθε κανάλι
- Ένα φίλτρο εγκοπής αφαιρεί μια εξαιρετικά στενή ζώνη συχνοτήτων — μόλις 50 Hz — ενώ αφήνει όλα τα στοιχεία πάνω και κάτω από αυτήν εντελώς ανέπαφα. Είναι το πιο στοχευμένο από όλα τα φίλτρα EEG

Εάν αναλύετε ένα σύνολο δεδομένων που έχει καταγραφεί στην Ευρώπη χρησιμοποιήστε την εντολή `notch_filter(freqs=50)`.

Εάν το σύνολο δεδομένων έχει καταγραφεί στις ΗΠΑ ή τον Καναδά, χρησιμοποιήστε την εντολή `notch_filter(freqs=60)`.

Αυτό είναι ένα από τα πρώτα πράγματα που πρέπει να ελέγξετε όταν εργάζεστε με ένα νέο σύνολο δεδομένων.

## Τα τρία φίλτρα που εφαρμόζουμε

- ▶ **Φίλτρο 2: Το φίλτρο υψηλής διέλευσης (high pass filter) — Αφαίρεση αργών μετατοπίσεων**
- ▶ Το τζελ ηλεκτροδίων, το δέρμα και ο ιδρώτας προκαλούν πολύ αργές αλλαγές στην αντίσταση επαφής ηλεκτροδίων-τριχωτού της κεφαλής
- ▶ Αυτές οι αλλαγές δημιουργούν ομαλές, περιπλανώμενες μετατοπίσεις τάσης που μπορούν να διαρκέσουν δεκάδες δευτερόλεπτα — πολύ πιο αργές από οποιαδήποτε γνήσια ταλάντωση του εγκεφάλου.
- ▶ Ομοίως, οι αργές κινήσεις του σώματος και οι αλλαγές θερμοκρασίας συμβάλλουν σε αυτές τις μακροχρόνιες μετατοπίσεις
- ▶ Ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης αφαιρεί οτιδήποτε βρίσκεται κάτω από μια συχνότητα αποκοπής, ενώ περνάει οτιδήποτε βρίσκεται πάνω από αυτήν. Χρησιμοποιούμε μια συχνότητα αποκοπής 1 Hz, που σημαίνει ότι αφαιρείται οτιδήποτε είναι πιο αργό από έναν κύκλο ανά δευτερόλεπτο, ενώ όλες οι ταλαντώσεις του εγκεφάλου (άλφα στα 10 Hz, βήτα στα 20 Hz, θήτα στα 6 Hz) διέρχονται με ασφάλεια.

## Τα τρία φίλτρα που εφαρμόζουμε

- ▶ **Φίλτρο 3: Το φίλτρο χαμηλής διέλευσης — Αφαίρεση μυϊκού θορύβου**
- ▶ Οι σκελετικοί μύες παράγουν ηλεκτρική δραστηριότητα (που ονομάζεται ΗΜΓ - ηλεκτρομυογραφία) κάθε φορά που συστέλλονται
- ▶ Οι μύες της γνάθου, οι μύες του μετώπου και οι μύες του λαιμού είναι ιδιαίτερα προβληματικοί στις καταγραφές EEG επειδή βρίσκονται κοντά στα ηλεκτρόδια
- ▶ Το μυϊκό ΗΜΓ είναι μια πηγή θορύβου ευρείας ζώνης: εξαπλώνεται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από περίπου 20 Hz έως 300 Hz ή υψηλότερα
- ▶ Ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης αφαιρεί οτιδήποτε βρίσκεται πάνω από μια συχνότητα αποκοπής, ενώ περνάει οτιδήποτε βρίσκεται κάτω από αυτήν
- ▶ Χρησιμοποιούμε μια συχνότητα αποκοπής 40 Hz, αφαιρώντας το χειρότερο μέρος του μυϊκού θορύβου, διατηρώντας παράλληλα όλες τις τυπικές ζώνες συχνοτήτων EEG

★ Ζωνοπερατότητα (bandpass) = Συνδυασμός Υψηλοπερατότητας + Χαμηλοπερατότητας

Όταν εφαρμόζετε ταυτόχρονα ένα φίλτρο υψιπερατού (1 Hz) και ένα φίλτρο χαμηλοπερατού (40 Hz), το αποτέλεσμα ονομάζεται φίλτρο ζώνης διέλευσης. Διατηρεί μόνο τη ζώνη μεταξύ 1 και 40 Hz, αφαιρώντας οτιδήποτε βρίσκεται εκτός αυτού του εύρους.

Τυπική απεικόνιση κινητήρα EEG: Ζωνοπερατότητα 1 – 40 Hz

Μελέτες ERP (P300, N400, κ.λπ.): Ζωνοπερατότητα 0,1 – 40 Hz

Ο λόγος που οι μελέτες ERP χρησιμοποιούν 0,1 Hz αντί για 1 Hz είναι ότι τα ERP περιέχουν πολύ αργά εγκεφαλικά στοιχεία (όπως η Ενδεχόμενη Αρνητική Μεταβολή) που θα αφαιρούνταν από ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης 1 Hz. Για την κινητική απεικόνιση BCI, αυτά τα αργά στοιχεία δεν είναι σχετικά, επομένως το 1 Hz είναι μια χαρά και βοηθά στην αφαίρεση περισσότερης απόκλισης.

## Φιλτράρισμα μηδενικής φάσης (Zero-Phase Filtering) — Γιατί διατηρείται ο χρονισμός

- ▶ Όταν ένα φίλτρο επεξεργάζεται ένα σήμα, υπάρχει ο κίνδυνος να το μετατοπίσει χρονικά — με αποτέλεσμα μια εγκεφαλική απόκριση να εμφανιστεί νωρίτερα ή αργότερα από ό,τι στην πραγματικότητα συνέβη
- ▶ Αυτό ονομάζεται παραμόρφωση φάσης και έχει τεράστια σημασία για την έρευνα όπου ο χρονισμός είναι το παν
- ▶ Για παράδειγμα, σε μια μελέτη P300 ERP, το στοιχείο P300 εμφανίζεται κανονικά περίπου 300 χιλιοστά του δευτερολέπτου μετά από ένα ερέθισμα

### 🗨️ Πώς λειτουργεί το φιλτράρισμα μηδενικής φάσης

Το MNE-Python εφαρμόζει τα φίλτρα του σε λειτουργία μηδενικής φάσης από προεπιλογή. Αυτό σημαίνει:

1. Εφαρμόστε το φίλτρο μία φορά προς τα εμπρός (από αριστερά προς τα δεξιά χρονικά)
2. Εφαρμόστε ξανά το φίλτρο προς τα πίσω (από δεξιά προς τα αριστερά χρονικά)
3. Η χρονική παραμόρφωση από το πέρασμα προς τα εμπρός ακυρώνεται ακριβώς από το πέρασμα προς τα πίσω

Το αποτέλεσμα: το φιλτραρισμένο σήμα έχει τον ίδιο χρονισμό με το αρχικό σήμα. Δεν εμφανίζονται αποκρίσεις νωρίτερα ή αργότερα από ό,τι εμφανίστηκαν στην πραγματικότητα.

Σημαντική πρακτική σημείωση: το φιλτράρισμα μηδενικής φάσης απαιτεί να είναι διαθέσιμο στη μνήμη ολόκληρο το σήμα ταυτόχρονα — τόσο η αρχή όσο και το τέλος. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο φορτώνουμε πάντα δεδομένα με `preload=True` όταν χρησιμοποιούμε MNE.

## Κακά κανάλια: Όταν τα ηλεκτρόδια αποτυγχάνουν

- Σε έναν ιδανικό κόσμο, κάθε ηλεκτρόδιο θα εφαρμόζει τέλεια στο τριχωτό της κεφαλής, δημιουργώντας καλή ηλεκτρική επαφή και καταγράφοντας μόνο την πραγματική εγκεφαλική δραστηριότητα
- Στην πράξη, αυτό δεν συμβαίνει ποτέ τέλεια. Η καταγραφή EEG είναι σωματικά δύσκολη — συνδέετε 64 μικρούς μεταλλικούς δίσκους στο τριχωτό της κεφαλής ενός ατόμου που καλύπτεται από τρίχες, συχνά χρησιμοποιώντας αγώγιμο τζελ, και του ζητάτε να καθίσει ακίνητος για 30-60 λεπτά

Αιτία αποτυχίας	Τι βλέπετε στα δεδομένα	Πώς να το αποτρέψετε
Κακή επαφή του τζελ — ανεπαρκής αγώγιμη γέλη μεταξύ ηλεκτροδίου και τριχωτού της κεφαλής	Εξαιρετικά θορυβώδες κανάλι — πολύ μεγαλύτερο πλάτος από τα γειτονικά	Εφαρμόστε επαρκή ποσότητα τζελ. Βεβαιωθείτε ότι το ηλεκτρόδιο βρίσκεται στο δέρμα, όχι στα μαλλιά. Ελέγξτε τις αντιστάσεις.
Ξηρό ηλεκτρόδιο — η γέλη έχει στεγνώσει κατά τη διάρκεια μιας μακράς συνεδρίας	Σταδιακά επιδεινούμενος θόρυβος · ολοένα και πιο ομαλός στα επόμενα τμήματα	Χρησιμοποιήστε φρέσκο τζελ. Διατηρήστε τις συνεδρίες για λιγότερο από 2 ώρες. Εφαρμόστε ξανά το τζελ εάν χρειάζεται.
Σπασμένο καλώδιο — το λεπτό καλώδιο που συνδέει το ηλεκτρόδιο με τον ενισχυτή έχει υποστεί ζημιά	Εντελώς επίπεδη γραμμή (μηδέν) ή εξαιρετικά υψηλός σταθερός θόρυβος σε όλη την έκταση	Ελέγξτε τα καλώδια πριν από κάθε συνεδρία. Αντικαταστήστε τα φθαρμένα καλώδια.
Γεφυρωμένα ηλεκτρόδια — δύο γειτονικά ηλεκτρόδια συνδεδεμένα με περίσσεια γέλης	Και τα δύο κανάλια καταγράφουν ακριβώς το ίδιο σήμα — τέλεια συσχέτιση	Χρησιμοποιήστε την ελάχιστη απαραίτητη γέλη. Ελέγξτε για γέφυρες γέλης κατά την εφαρμογή του καπακιού.
Κορεσμένος ενισχυτής — μια πολύ μεγάλη παροδική μεταβολή ώθησε τον ενισχυτή εκτός της εμβέλειάς του	Το σήμα έχει περικοπεί — μια επίπεδη γραμμή στη μέγιστη θετική ή αρνητική τάση για αρκετά δευτερόλεπτα	Ζητήστε από τον συμμετέχοντα να αποφεύγει τις μεγάλες κινήσεις. Διακόψτε προσωρινά την ηχογράφηση εάν χρειάζεται.

## Πώς να εντοπίσετε ένα κακό κανάλι

- ▶ Όταν επιθεωρείτε οπτικά τα ακατέργαστα δεδομένα EEG (χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `raw.plot()` του MNE), τα κακά κανάλια είναι συνήθως προφανή:
- ▶ Επίπεδη οριζόντια γραμμή στο μηδέν ή σε σταθερό επίπεδο — νεκρό ηλεκτρόδιο
- ▶ Πλάτος σήματος 5–10 φορές μεγαλύτερο από όλα τα γειτονικά κανάλια — κακή επαφή
- ▶ Το κανάλι μοιάζει με ένα παρακείμενο κανάλι — γέφυρα ηλεκτροδίων (υπερβολική ποσότητα γέλης)
- ▶ Τακτικοί, οξύς παλμοί ακριβώς μία φορά ανά δευτερόλεπτο — ηλεκτρόδιο πάνω από ένα αιμοφόρο αγγείο του τριχωτού της κεφαλής
- ▶ Το σήμα φαίνεται φυσιολογικό, αλλά ξαφνικά μεταβαίνει σε νέο επίπεδο — ηλεκτρόδιο σκάει (σύντομη αποσύνδεση)

## Spherical Spline Interpolation — Rebuilding a Bad Channel

- Μόλις εντοπίσουμε ένα κακό κανάλι, δεν το διαγράφουμε απλώς και δεν αφήνουμε ένα κενό στα δεδομένα — κάτι που θα δημιουργούσε προβλήματα για όλες τις αναλύσεις που αναμένουν 64 κανάλια
- Αντίθετα, ανακατασκευάζουμε μια εύλογη εκτίμηση για το τι θα έπρεπε να έχει καταγράψει το κανάλι, χρησιμοποιώντας τα σήματα από όλα τα γύρω καλά ηλεκτρόδια
- Η μέθοδος ονομάζεται spherical spline interpolation

### 🗨 Πώς λειτουργεί η σφαιρική παρεμβολή Spline — Βήμα προς βήμα

1. Πάρτε όλα τα ηλεκτρόδια που λειτουργούν στο τριχωτό της κεφαλής (π.χ., 63 καλά κανάλια από τα 64).
2. Σε κάθε χρονικό σημείο, αυτά τα 63 ηλεκτρόδια λαμβάνουν δείγματα από το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια του τριχωτού της κεφαλής σε 63 γνωστές θέσεις.
3. Περάστε μια λεία μαθηματική επιφάνεια μέσα από όλες τις 63 τιμές — σαν να τεντώνετε ένα λεπτό εύκαμπτο φύλλο από καουτσούκ πάνω από το τριχωτό της κεφαλής που είναι καρφισσόμενο σε όλες τις 63 καλές θέσεις ηλεκτροδίων.
4. Διαβάστε την τιμή αυτής της λείας επιφάνειας στη θέση του ελαττωματικού ηλεκτροδίου.
5. Αυτή η εκτιμώμενη τιμή αντικαθιστά τα δεδομένα του κατεστραμμένου καναλιού για αυτό το χρονικό σημείο.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε χρονικό σημείο της εγγραφής, ανακατασκευάζοντας μια πλήρη χρονοσειρά για το προβληματικό κανάλι.

Η spherical spline interpolation λειτουργεί καλά όταν μόνο ένας μικρός αριθμός καναλιών είναι προβληματικός — γενικά έως περίπου 5 από τα 64 (περίπου 8%)

## Independent Component Analysis (ICA)

- ▶ **Το πρόβλημα που δεν μπορούν να λύσουν τα φίλτρα**
- ▶ Ίσως αναρωτιέστε: μετά το φιλτράρισμα ζώνης διέλευσης στα 1–40 Hz, γιατί χρειαζόμαστε περαιτέρω προ-επεξεργασία;
- ▶ Η απάντηση είναι ότι τα ίδια τα φυσιολογικά σήματα του σώματος - το ανοιγοκλείσιμο των ματιών, οι κινήσεις των ματιών και οι καρδιακοί παλμοί - παράγουν ηλεκτρική δραστηριότητα ακριβώς στην ίδια περιοχή συχνοτήτων με τα σήματα του εγκεφάλου
- ▶ **Το φιλτράρισμα δεν μπορεί να τα αφαιρέσει**
- ▶ Σκεφτείτε ένα ανοιγοκλείσιμο των ματιών. Παράγει μια αιχμή τάσης που είναι 10 έως 100 φορές μεγαλύτερη από τα σήματα του εγκεφάλου, συγκεντρωμένη στα μετωπιαία ηλεκτρόδια. Αλλά το ανοιγοκλείσιμο των ματιών έχει φασματικό περιεχόμενο κάτω από 10 Hz — πολύ εντός του εύρους του σήματος του εγκεφάλου. Εάν εφαρμόσετε ένα φίλτρο αρκετά επιθετικό για να αφαιρέσετε τα ανοιγοκλείματα των ματιών, θα καταστρέψετε επίσης όλη τη δραστηριότητα του εγκεφάλου σας δέλτα και θήτα.

## Independent Component Analysis (ICA)

### 💡 Η αναλογία με το πάρτι

Φανταστείτε ένα δωμάτιο όπου πέντε άτομα μιλάνε ταυτόχρονα. Τοποθετείτε πέντε μικρόφωνα σε διαφορετικές θέσεις στο δωμάτιο. Κάθε μικρόφωνο ηχογραφεί ένα μοναδικό μείγμα και των πέντε φωνών — τα πιο κοντινά ηχεία ακούγονται πιο δυνατά, τα πιο μακρινά ηχεία πιο σιγά.

Ερώτηση: δεδομένων μόνο των πέντε ηχογραφήσεων μικροφώνου, μπορείτε να ανακτήσετε τι έλεγε το καθένα ξεχωριστά;

Αυτό φαίνεται αδύνατο, αλλά η Independent Component Analysis (ICA) μπορεί να το κάνει — αρκεί να ισχύει μία βασική υπόθεση: οι πέντε φωνές είναι στατιστικά ανεξάρτητες. Το να γνωρίζετε ότι το Άτομο A μόλις είπε «γεια» δεν σας λέει τίποτα για το τι λέει το Άτομο B την ίδια στιγμή. Οι πηγές είναι ανεξάρτητες.

Το ICA εκμεταλλεύεται αυτήν την στατιστική ανεξαρτησία για να αποσυνδέσει μαθηματικά τα σήματα και να ανακτήσει τις αρχικές πηγές από τις μικτές ηχογραφήσεις.

### Στο EEG:

- Τα μικρόφωνα = ηλεκτρόδια EEG
- Τα ηχεία = πηγές ηλεκτρικής δραστηριότητας: διαφορετικές περιοχές του εγκεφάλου, μύες των ματιών, καρδιά
- Οι μικτές ηχογραφήσεις = τι πραγματικά καταγράφουν τα ηλεκτρόδια
- Η δουλειά του ICA = να βρει τις αρχικές πηγές και να τις διαχωρίσει

Η εγκεφαλική δραστηριότητα και τα ανοιγοκλείσιμο των ματιών είναι στατιστικά ανεξάρτητα — ο χρόνος ενός ανοιγοκλεισίματος των ματιών δεν έχει καμία σχέση με την κατάσταση του ρυθμού άλφα του κινητικού φλοιού. Η ICA χρησιμοποιεί αυτό το γεγονός για να τα διαχωρίσει.

## Independent Component Analysis (ICA)

- Το ICA αναλύει και τα 64 κανάλια EEG ταυτόχρονα και βρίσκει έναν μαθηματικό μετασχηματισμό που παράγει ένα σύνολο 20 (ή περισσότερων) ανεξάρτητων συνιστωσών (ICs). Κάθε στοιχείο είναι μια πηγή που αναμείχθηκε στα καταγεγραμμένα σήματα
- Κάθε στοιχείο έχει δύο αναπαραστάσεις που χρησιμοποιείτε για να προσδιορίσετε τι είναι:

Αναπαράσταση	Τι δείχνει	Πώς να το ερμηνεύσετε
Τοπογραφικός χάρτης (χάρτης τριχωτού της κεφαλής)	Η χωρική κατανομή — ποια ηλεκτρόδια «αισθάνονται» αυτήν την πηγή πιο έντονα και με ποια πολικότητα	Μετωπική συμμετρική κηλίδα = ανοιγοκλείσιμο του ματιού · ινιακή κηλίδα = άλφα · κηλίδα C3/C4 = κινητική μυϊκή μάζα
Χρονικές σειρές	Όταν η πηγή ήταν ενεργή — η πλήρης δραστηριότητα με την πάροδο του χρόνου	Απότομες αιχμές κάθε λίγα δευτερόλεπτα = ανοιγοκλείσιμο των ματιών · τακτικοί παλμοί 1/δευτερόλεπτο = καρδιακός παλμός

## Independent Component Analysis (ICA)

- Μετά την ICA, εξετάζετε τόσο τον χάρτη του τριχωτού της κεφαλής όσο και τη χρονοσειρά κάθε συστατικού και το ταξινομείτε είτε ως εγκέφαλο είτε ως artifact

Τύπος εξαρτήματος	Εμφάνιση χάρτη τριχωτού της κεφαλής	Εμφάνιση χρονοσειρών	Διατήρηση ή αφαίρεση;
<b>Ανοιγοκλείσιμο των ματιών</b>	Μεγάλη ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗ κηλίδα στο μπροστινό μέρος του κεφαλιού, κεντραρισμένη πάνω από το Fp1/Fp2	Περιστασιακές μεγάλες τριγωνικές αιχμές — περίπου μία φορά κάθε 3-5 δευτερόλεπτα	ΑΦΑΙΡΩ
<b>Οριζόντια κίνηση των ματιών</b>	Αντίθετη πολικότητα αριστερά μπροστά έναντι δεξιά μπροστά — θετική στη μία πλευρά, αρνητική στην άλλη	Οριζόντιες μετατοπίσεις που μοιάζουν με βήματα όταν το άτομο κινεί τα μάτια του	ΑΦΑΙΡΩ
<b>Καρδιακός παλμός (ΗΚΓ/BCG)</b>	Διάσπαρτα, συχνά ορατά στα κροταφικά ηλεκτρόδια	Κανονικός, οξύς σφυγμός στους ~60–80 παλμούς ανά λεπτό (περίπου μία φορά ανά δευτερόλεπτο)	ΑΦΑΙΡΕΣΤΕ εάν είναι ισχυρό
<b>Μυς της γνάθου / του αυχένα</b>	Εστιακές ακανόνιστες κηλίδες στις άκρες και στο κάτω μέρος του τριχωτού της κεφαλής	Εκρήξεις πυκνού θορύβου υψηλής συχνότητας όταν το άτομο τεντώνεται	ΑΦΑΙΡΕΣΤΕ εάν είναι ισχυρό
<b>Εγκέφαλος — Άλφα</b>	Ομαλή συμμετρική κηλίδα στο ΠΙΣΩ ΜΕΡΟΣ του κεφαλιού (ινιακή περιοχή)	Αύξηση και μείωση της ταλάντωσης 10 Hz — ισχυρότερη όταν τα μάτια είναι κλειστά	ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ
<b>Εγκέφαλος — Κινητικός Μυ</b>	Ομαλή κηλίδα με κέντρο πάνω από το C3 ή το C4 (κινητικός φλοιός)	Ρυθμική ταλάντωση 8–12 Hz που εξαφανίζεται όταν το άτομο κινείται ή φαντάζεται ότι κινείται	ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ

## Epochs: Cutting the Recording into Trials

### ➤ From Continuous Recording to Event-Locked Trials

- Μετά από όλα τα βήματα καθαρισμού, έχουμε μία μακρά συνεχή καταγραφή EEG— ίσως 5 λεπτά δεδομένων από 64 κανάλια
- Αλλά το πείραμά μας δεν ήταν ένα συνεχές συμβάν: είχε πολλές μεμονωμένες δοκιμές. Κάθε δοκιμή ξεκινούσε όταν ο συμμετέχων λάμβανε ένα σύνθημα να φανταστεί ότι κινεί το χέρι του
- Για να αναλύσουμε τις αντιδράσεις του εγκεφάλου σε αυτά τα συμβάντα, πρέπει να χωρίσουμε τη συνεχή καταγραφή σε σύντομα παράθυρα, καθένα από τα οποία ευθυγραμμίζεται με έναν συγκεκριμένο δείκτη συμβάντος. Αυτά τα παράθυρα ονομάζονται εποχές ή δοκιμές

Παράμετρος	Τεχνική ονομασία	Τι σημαίνει	Τυπική τιμή για κινητική απεικόνιση
Ώρα έναρξης	tmin	Πόσα δευτερόλεπτα ΠΡΙΝ από τον δείκτη συμβάντος θα ξεκινήσει το παράθυρο. Χρησιμοποιείται για τη γραμμή βάσης.	-0,5 δευτ. (μισό δευτερόλεπτο πριν από το σύνθημα)
Ώρα λήξης	tmax	Πόσα δευτερόλεπτα ΜΕΤΑ τον δείκτη συμβάντος για να τερματιστεί το παράθυρο. Καλύπτει την περίοδο απόκρισης.	3,0 δευτ. (τρία δευτερόλεπτα μετά το σύνθημα)
Περίοδος βάσης	γραμμή βάσης	Το χρονικό παράθυρο εντός της εποχής που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της τάσης «ηρεμίας» πριν από το συμβάν.	(tmin, 0) — από την έναρξη της εποχής έως την έναρξη της ένδειξης

### 💬 Η Μορφή των Δεδομένων Μετά την Εποχή

Πριν από την εποχική μετατροπή: κανάλια × δείγματα χρόνου (π.χ., 64 × 20.000)

Μετά την εποχική μετατροπή: δοκιμές × κανάλια × χρονικά σημεία (π.χ., 40 × 64 × 561)

Αυτή η τρισδιάστατη μορφή είναι η τυπική είσοδος για όλες τις αναλύσεις ERP, την ανάλυση συχνότητας και την ταξινόμηση μηχανικής μάθησης στην έρευνα EEG.

## Baseline Correction — Zeroing Out the Starting Point

- ▶ Ακόμα και μετά το φιλτράρισμα και την ICA, οι μεμονωμένες δοκιμές θα έχουν ελαφρώς διαφορετικά επίπεδα τάσης τη στιγμή που εμφανίζεται το σήμα
- ▶ Αυτές οι διαφορές δεν σχετίζονται με την πειραματική εργασία — απλώς αντανακλούν την κατάσταση του σήματος EEG τη συγκεκριμένη στιγμή
- ▶ Η σύγκριση δοκιμών με διαφορετικές τάσεις εκκίνησης θα εισήγαγε ψευδείς διαφορές μεταξύ των συνθηκών.
- ▶
- ▶ Η διόρθωση γραμμής βάσης εξαλείφει αυτό το πρόβλημα αφαιρώντας τη μέση τάση κατά την περίοδο πριν από το σήμα από κάθε χρονικό σημείο της δοκιμής

## Epoch Rejection: Discarding Ruined Trials

- ▶ **Γιατί ορισμένες δοκιμασίες δεν μπορούν να σωθούν**
- ▶ Παρά την εφαρμογή re-referencing, φιλτραρίσματος, παρεμβολής κακού καναλιού και ICA, ορισμένες μεμονωμένες δοκιμές θα εξακολουθούν να περιέχουν artefacts που είναι απλώς πολύ μεγάλα για να αγνοηθούν
- ▶ Ο συμμετέχων κούνησε απότομα το κεφάλι του — δημιουργώντας ένα τεράστιο παροδικό artefacts σε κάθε κανάλι
- ▶ Ένα ηλεκτρόδιο αποκολλήθηκε και επανήλθε κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής — δημιουργώντας μια ξαφνική μεγάλη αύξηση τάσης
- ▶ Ο συμμετέχων φτερνίστηκε, έβηξε, γέλασε ή κατάπιε κατά τη διάρκεια της δοκιμής
- ▶ Μια πολύ μεγάλη μυϊκή συστολή υπερνίκησε την αποσύνθεση του ICA — το artefacts ήταν πολύ μεγάλο για να μοντελοποιηθεί καθαρά από το ICA
- ▶ **Αυτές οι δοκιμές είναι ανεπανόρθωτες. Το σήμα είναι τόσο μολυσμένο που η διατήρησή τους στην ανάλυση θα αλλοιώνει τα αποτελέσματα. Η μόνη επιλογή είναι να αφαιρεθούν εντελώς**

## Η μέθοδος κατώφλιου πλάτους (Amplitude Threshold Method)

- ▶ Γιατί ορισμένες δοκιμασίες δεν μπορούν να σωθούν
- ▶ Η τυπική μέθοδος απόρριψης εποχής είναι απλή: για κάθε δοκιμή και κάθε κανάλι, υπολογίστε το πλάτος από κορυφή σε κορυφή (μέγιστη τιμή μείον ελάχιστη τιμή εντός της δοκιμής).
- ▶ Εάν αυτό υπερβαίνει ένα φυσιολογικά απίθανο όριο, απορρίψτε ολόκληρη τη δοκιμή

🗨 Πώς λειτουργεί το κατώφλι — Με απλά λόγια

Για ένα καθαρό EEG ενηλίκου μετά από προεπεξεργασία:

- Κανονικά σήματα εγκεφάλου: πλάτος 5 – 50  $\mu\text{V}$
- Περιστασιακές μεγάλες ταλαντώσεις άλφα: έως  $\sim 100 \mu\text{V}$  από κορυφή σε κορυφή
- Σφίξιμο της γνάθου ή κίνηση του κεφαλιού: μπορεί να φτάσει τα 500 – 2000  $\mu\text{V}$

Συνεπώς, ένα όριο 150  $\mu\text{V}$  αναφέρει: «Εάν οποιοδήποτε κανάλι σε αυτήν τη δοκιμή έχει πλάτος από κορυφή σε κορυφή πάνω από 150  $\mu\text{V}$ , ολόκληρη η δοκιμή είναι μολυσμένη — απορρίψτε το».

## The Complete Pipeline With Context

#	Βήμα	Γιατί το κάνουμε	Τι συμβαίνει αν το παραλείψουμε
1	Σετ μοντάζ (θέσεις ηλεκτροδίων)	Λέει στο MNE πού βρίσκεται κάθε ηλεκτρόδιο στο τριχωτό της κεφαλής σε τρισδιάστατο χώρο	Η παρεμβολή είναι αδύνατη. Οι τοπογραφικοί χάρτες είναι λανθασμένοι. Οι χάρτες τριχωτού της κεφαλής ICA είναι άνευ νοήματος.
2	Επισήμανση κακών καναλιών	Επισημαίνει ηλεκτρόδια που δεν καταγράφουν χρησιμοποιήσιμα εγκεφαλικά σήματα	Τα κακά κανάλια διαφθείρουν τη μέση αναφορά και συγχέουν το ICA
3	Παρεμβολή κακών καναλιών	Ανασυνθέτει τα κακά σήματα ηλεκτροδίων από τα καλά γύρω τους	Κενά ή αλλοιωμένα κανάλια στα δεδομένα. Το ICA προσπαθεί να μοντελοποιήσει το σπασμένο κανάλι ως «πηγή»
4	Μέση αναφορά	Αφαιρεί τη μόλυνση από το αρχικό ηλεκτρόδιο αναφοράς καταγραφής	Όλα τα κανάλια φέρουν τη δραστηριότητα μιας αυθαίρετης τοποθεσίας του τριχωτού της κεφαλής, αφαιρούμενης.
5	Φίλτρο εγκοπής (50 Hz)	Αφαιρεί τον σταθερό βόμβο 50 Hz από το ηλεκτρικό δίκτυο	Η παρεμβολή των 50 Hz μολύνει όλες τις φασματικές αναλύσεις· εμφανίζεται ως αιχμή στο PSD· καταστρέφει το ICA
6	Ζωνοπερατό φίλτρο (1–40 Hz)	Αφαιρεί τις αργές μετατοπίσεις και τον μυϊκό θόρυβο υψηλής συχνότητας	Οι αργές μετατοπίσεις κυριαρχούν στο ICA. Ο μυϊκός θόρυβος θεωρείται λανθασμένα ως γάμμα εγκεφαλικά δραστηριότητα.
7	ICA fit	Μαθαίνει τα χωρικά μοτίβα όλων των πηγών (εγκέφαλος + artefact)	Δεν είναι δυνατή η διαδικασία ταυτοποίησης. Το μοντέλο ICA δεν υπάρχει ακόμη.
8	Το ICA αναγνωρίζει και αφαιρεί	Αφαιρεί τις πηγές ανοιγοκλεισίματος των ματιών, τις καρδιακές και μυϊκές πηγές από όλα τα κανάλια	Αυτά τα φυσιολογικά τεχνουργήματα κυριαρχούν στα ERP. Οι ταξινομητές μαθαίνουν να ανιχνεύουν τα ανοιγόκλειμα των ματιών, όχι τις κινητικές εικόνες.
9	Δημιουργία εποχών	Κόβει το συνεχές σήμα σε δοκιμές με κλειδωμένα συμβάντα	Δεν υπάρχει τρόπος να συνδεθούν νευρωνικά σήματα με πειραματικά συμβάντα· ο χρονικός μέσος όρος είναι αδύνατος.
10	Διόρθωση βάσης	Αφαιρεί την αργή υπολειμματική μετατόπιση σε κάθε δοκιμή	Οι δοκιμές έχουν διαφορετικές μετατοπίσεις DC. Η σύγκριση μεταξύ των συνθηκών είναι στατιστικά άκυρη.
11	Απόρριψη εποχής	Αφαιρεί δοκιμές με εναπομείναντα μεγάλα τεχνουργήματα	Οι δοκιμές με ακραίες τιμές μολύνουν την ανάλυση. Οι ταξινομητές και οι μέσοι όροι παραμορφώνονται από μερικές κακές δοκιμές.
12	Αποθήκευση καθαρισμένων εποχών	Αποθηκεύει προεπεξεργασμένα δεδομένα για ανάλυση του Tutorial 3	Πρέπει να επαναλαμβάνεται κάθε φορά όλη η προεπεξεργασία· υπάρχει κίνδυνος τυχαίας διακύμανσης μεταξύ των εκτελέσεων