



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Η Μελέτη Εξοικείωσης Ακουστικών Ερεθισμάτων  
Προκλητών Δυναμικών με Χρήση της Κυματιδιακής  
Ανάλυσης**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Νικόλαος Κ. Σμπόνιας

**Επιβλέπων : Κωνσταντίνα Σ. Νικήτα**  
Καθηγήτρια,

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Η Μελέτη Εξοικείωσης Ακουστικών Ερεθισμάτων Προκλητών Δυναμικών με Χρήση της Κυματιδιακής Ανάλυσης

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Κ. Σμπόνιας

**Επιβλέπων : Κωνσταντίνα Σ. Νικήτα**

Καθηγήτρια

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2010.

.....  
Κωνσταντίνα Σ. Νικήτα  
Καθηγήτρια

.....  
Γεώργιος Κ. Ματσόπουλος  
Επικουρος Καθηγητής

.....  
Διονύσιος-Δημήτριος Κουτσούρης  
Καθηγητής

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010

.....  
Νικόλαος Κ. Σμπόνιας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Νικόλαος Κ. Σμπόνιας

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η κυματιδιακή ανάλυση (wavelet analysis) εφαρμόζεται σε ηλεκτροεγκεφαλικές καταγραφές μαρτύρων με μαθησιακές δυσκολίες με σκοπό την μελέτη εξοικείωσης σε εξωτερικά ακουστικά ερεθίσματα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το πλάτος χαρακτηριστικών κορυφώσεων των προκλητών δυναμικών ως δείκτης του βαθμού εξοικείωσης τους. Η εξοικείωση ορίζεται ως η μείωση της απόκρισης συναρτήσει της επανάλυσης του ερεθίσματος. Στην περίπτωση όμως που το ερέθισμα αλλάζει τότε η απόκριση αυξάνεται. Το χαρακτηριστικό αυτό της εξοικείωσης ονομάζεται ευαισθητοποίηση και χωρίζεται σε βραχυπρόθεσμη (αυξημένη απόκριση μετά από μερικά ερεθίσματα με επακόλουθη μείωσή της) και μακροπρόθεσμη (συντήρηση και αύξηση του χρόνου εμφάνισης της μεταβολής της απόκρισης, ως αποτέλεσμα μιας μακράς περιόδου προσαρμογής στο ερέθισμα). Ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου χρησιμοποιήθηκε για την αποθορυβοποίηση των μεμονωμένων καταγραφών, αφού δεν απαιτεί την στασιμότητα του σήματος, αποσυνθέτει το σήμα στις υψίσυχνες και χαμηλόσυχνες συνιστώσες του και δίνει την δυνατότητα διάκρισης των προκλητών δυναμικών. Η αποθορυβοποίηση έγινε τόσο στο πεδίο του χρόνου, χρησιμοποιώντας τους συντελεστές των περιοχών ενδιαφέροντος (P50, N100, P200, N200, P300 και P600), όσο και στο πεδίο της συχνότητας, χρησιμοποιώντας μόνο τα εύρη συχνοτήτων που αντιστοιχούν στους φυσιολογικούς ρυθμούς του εγκεφάλου ( $\delta$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$  και  $\beta$ ). Οι μάρτυρες με μαθησιακές δυσκολίες καθώς και τα υγιή αδέρφια τους δέχτηκαν δυο σειρές παρουσιάσεων ακουστικών ερεθισμάτων από 26 δοκιμές η κάθε μια. Η στατιστική ανάλυση ανέδειξε ότι οι δύο ομάδες διέφεραν όμως ως προς τον βαθμό ευαισθητοποίησης. Οι διαφορές για την βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση παρατηρήθηκαν στις περιοχές P50 και N100 του μετωπιαίου λοβού (απαγωγές F3 και Fp2) και στις περιοχές P200, N200, P300 και P600 του βρεγματικού λοβού (απαγωγές C4, C6 και Cz). Στην μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση οι διαφορές σημειώθηκαν στις απαγωγές F3, Fp2 και Pz σε όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος. Τέλος, οι διαφορές στις μέσες τιμές του πλάτους μόνο στο 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> τεστ δοκιμών (μικρότερες στο 1<sup>ο</sup>) αντικατοπτρίζει την επανα-ευαισθητοποίηση των μαρτύρων στην απόκριση του εξωτερικού ερεθίσματος με τους υγιείς να παρουσιάζουν μεγαλύτερη μέση τιμή στις κορυφώσεις των απαγωγών F3, και Fp2 υποδεικνύοντας διαφορές στη διαδικασία μάθησης.

***Λέξεις Κλειδιά : Κυματίδιο, Αποθορυβοποίηση, ΗΕΓ, Προκλητά Δυναμικά, Εξοικείωση, Ευαισθητοποίηση, Μεμονωμένη Δοκιμή***

# Abstract

In this project wavelet analysis is applied to EEG signals of dyslexic subjects for the estimation of habituation processes during an external acoustic stimulus. To this end, the amplitude of Event Related Potential (ERP) components was used. Habituation is a reduction in responding to a stimulus with repeated stimulus presentations. In contrast, when stimulus alters, increases in the responses are related to a sensitization process. Sensitization can be fast and only temporary (short-term sensitization-STS), which is usually observed when stimuli are presented with short inter-stimulus intervals or may develop slowly (long-term habituation-LTS) and is found at longer inter-stimulus intervals. By multiple habituation sessions, the response will subsequently habituate to a larger extent and more rapidly within each following session (enhanced re-sensitization). Discrete wavelet transform, due to its ability to deal with nonstationary signals, is used to denoise the EEG recording in terms of their ERP (P50, N100, P200, N200, P300 and P600) and basic frequency components ( $\delta$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$  and  $\beta$ ). Participants (dyslexic subjects and their control siblings) received two blocks of 26 auditory stimulus presentations. Statistical analysis showed that they differ in the degree of sensitisation processes. More specifically, controls indicated higher amplitude increase within (STS) blocks in P50 and N100 in the frontal lobe (F3 and Fp2) and in P200, N200, P300 and P600 in the parietal lobe (C4, C6 and Cz). Controls also indicated higher amplitude increase across (LTS) blocks in all ERP components (mainly on F3, Fp2 and Pz). It should be marked that the amplitude increased more rapidly during the second than the first trial block, suggesting enhanced re-sensitization which, in turn, reflects differences in learning process.

**Keywords: Wavelet; Denoising; EEG; Evoked potential; Habituation; Sensitization  
Single trial;**

# Πρόλογος

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας στο εργαστήριο Βιοϊατρικών Προσομοιώσεων και Απεικονιστικής Τεχνολογίας (BIOSIM) στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών θα ήθελα να ευχαριστήσω τη καθηγήτρια μου κ. Κωνσταντίνα Νικήτα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, δίνοντας μου έτσι τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινά τον υποψήφιο διδάκτωρ κ. Νικόλαο Τσιαπάρα για την άριστη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα, καθώς και για την υπομονή και καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, την μνηστή μου και τους φίλους μου που όλα αυτά τα χρόνια με στήριξαν με το καλύτερο δυνατό τρόπο.

<b>Περίληψη</b> .....	<b>4</b>
<b>Πρόλογος</b> .....	<b>6</b>
<b>Λίστα Σχημάτων</b> .....	<b>8</b>
<b>Λίστα Πινάκων</b> .....	<b>10</b>
<b>Εισαγωγή</b> .....	<b>11</b>
<b>1. Νευροφυσιολογία εγκεφάλου</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1. Εισαγωγή</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2. Εγκέφαλος και γνωσιακές λειτουργίες</b> .....	<b>13</b>
1.2.1. Φυσιολογία εγκεφάλου .....	13
1.2.2. Γνωσιακές λειτουργίες-δυσλεξία .....	15
<b>1.3. Δομή και λειτουργία του νευρώνα</b> .....	<b>18</b>
<b>1.4. Συμπέρασμα</b> .....	<b>22</b>
<b>2. Εγκεφαλογράφημα και προκλητά δυναμικά</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1. Εισαγωγή</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2. Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα</b> .....	<b>23</b>
2.2.1. Λειτουργία του Ηλεκτροεγκεφαλογράφου .....	23
2.2.2. Χαρακτηριστικά του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος.....	26
<b>2.3. Βιωματικά δυναμικά του εγκεφάλου</b> .....	<b>27</b>
2.3.1. Ορισμοί και κατηγορίες των βιωματικών δυναμικών.....	27
2.3.2. Έρευνα βιωματικών δυναμικών στην ψυχιατρική και τη νευρολογία .....	30
2.3.3. Προκλητά δυναμικά μεμονωμένης δοκιμής.....	33
<b>2.4. Χαρακτηριστικά Εξοικείωσης</b> .....	<b>34</b>
<b>2.5. Συμπέρασμα</b> .....	<b>37</b>
<b>3. Κυματιδιακή ανάλυση</b> .....	<b>38</b>
<b>3.1. Εισαγωγή</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2. Ανάλυση Fourier</b> .....	<b>38</b>
3.2.1. <i>Windowed μετασχηματισμός Fourier (WFT) ή μετασχηματισμός Fourier μικρής διάρκειας (STFT)</i> 39	
3.2.2. Ανακατασκευή .....	40
<b>3.3. Συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου</b> .....	<b>41</b>
<b>3.4. Διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου</b> .....	<b>43</b>
3.4.1. Πλαισία κυματιδίου ( <i>wavelet frames</i> ) .....	44
3.4.2. Αναδιακό πλέγμα και ορθοκανονικός μετασχηματισμός κυματιδίου .....	45
3.4.3. Διαφορές με το συνεχές μετασχηματισμό .....	46
3.4.4. Η συνάρτηση κλίμακας και η αναπαράσταση πολλαπλής ανάλυσης .....	46
3.4.5. Η εξίσωση της συνάρτησης κλίμακας, οι συντελεστές κλίμακας και η σχετική συνάρτηση κυματιδίου. ....	49
3.4.6. Αλγόριθμος πολλαπλής αποσύνθεσης- ανακατασκευής ( <i>multiresolution analysis</i> ) .....	51
3.4.7. Κωδικοποίηση με ζώνες συχνοτήτων -Φιλτράρισμα .....	54
3.4.8. Είσοδος διακριτών σημάτων πεπερασμένου μεγέθους.....	56
3.4.9. Αποθορυβοποίηση .....	56
<b>3.5. Συμπέρασμα</b> .....	<b>57</b>
<b>4. Πειραματικό μέρος</b> .....	<b>58</b>
<b>4.1. Μεθοδολογία</b> .....	<b>58</b>
4.1.1. Αντικείμενα μελέτης και καταγραφής δεδομένων.....	58
4.1.2. Μετασχηματισμός κυματιδίου .....	59
4.1.3. Αποθορυβοποίηση των προκλητών δυναμικών .....	60
<b>4.2. Αποτελέσματα</b> .....	<b>68</b>
<b>Συμπεράσματα</b> .....	<b>84</b>
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>87</b>



# Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1-1 Το κεντρικό νευρικό σύστημα διαιρείται σε 7 κύρια μέρη.....	14
Σχήμα 1-2 Οι τέσσερις λοβοί του φλοιού των εγκεφαλικών ημισφαιρίων.....	15
Σχήμα 1-3. Περιοχές που σχετίζονται με τον λόγο . Η περιοχή Wernicke επεξεργάζεται τις ακουστικές πληροφορίες για τη γλώσσα και είναι σημαντική για την κατανόηση του λόγου. Βρίσκεται κοντά στον πρωτοταγή ακουστικό φλοιό και στη γωνιώδη έλικα, η οποία συνδυάζει ακουστικές πληροφορίες με πληροφορίες από άλλες αισθήσεις. Η περιοχή Broca ελέγχει την παράγωγή του λόγου. Βρίσκεται, κοντά στην κινητική περιοχή και ελέγχει τις κινήσεις του στόματος και της γλώσσας για την προαγωγή των λέξεων. Η περιοχή Wernicke επικοινωνεί με την περιοχή Broca με μια δεσμίδα ινών, την τοξοειδή δεσμίδα.....	16
Σχήμα 1-4. Περιοχές κατά Brodmann. Αρκετές περιοχές που καθορίστηκαν από τον Brodmann βρέθηκε ότι ελέγχουν ειδικές εγκεφαλικές λειτουργίες. Οι περιοχές 41 και 42 περιλαμβάνουν τον πρωτοταγή ακουστικό φλοιό.....	17
Σχήμα 1-5. Η δομή του νευρώνα.....	19
Σχήμα 1-6. Δυναμικό δράσης. Το σχήμα δίνει τη διαφορά δυναμικού $\Delta V = V$ (εσωκυττάρειο χώρο) – $V$ (εξωκυττάρειο χώρο) συναρτήσει του χρόνου σε ένα σημείο της μεμβράνης.....	21
Σχήμα 2-1 Καταγραφή ΗΕΓ.....	23
Σχήμα 2-2 Διεθνές Σύστημα 10-20. Τυποποιημένες απαγωγές στην επιφάνεια του κεφαλιού σύμφωνα με το Διεθνές Σύστημα της Ηλεκτροεγκεφαλογραφίας 10-20.....	25
Σχήμα 2-3. Οι βασικοί ρυθμοί (συχνοτικές συνιστώσες) του EEG σήματος.....	26
Σχήμα 2-4. Νεύρωση του οργάνου του Corti.....	28
Σχήμα 2-5. Καταγραφή Προκλητών Δυναμικών.....	32
Σχήμα 2-6 Οι μεταβολές του πλάτους του συστατικού P20 από 100 μεμονωμένες δοκιμές προκλητών ακουστικών δυναμικών σε αρουραίους. Η ελάττωση του πλάτους από δοκιμή σε δοκιμή σχετίζεται με μια μορφή εξοικείωσης [5].....	34
Σχήμα 2-7 Οι μεταβολές του πλάτους του συστατικού N24 από 100 μεμονωμένες δοκιμές προκλητών ακουστικών δυναμικών σε αρουραίους. Η αύξηση του πλάτους από δοκιμή σε δοκιμή σχετίζεται με μια μορφή ευαισθητοποίησης [5].....	36
Σχήμα 3-1. Μετασχηματισμός Fourier μικρής διάρκειας.....	40
Σχήμα 3-2. Η διερεύνηση του σήματος από το κυματίδιο. a) Το κυματίδιο συγκεκριμένης διεύθυνσης και μετατόπισης εφαρμοσμένο στο σήμα. Οι περιοχές που δίνουν θετικές και αρνητικές συνεισφορές στο ολοκλήρωμα είναι οριοθετημένες με διακεκομμένες γραμμές και σημειωμένες με + ή -. b) Το κυματίδιο σταθερής διεύθυνσης σε 4 διακριτές θέσεις στο σήμα. Στη θέση b1 λαμβάνεται μια μεγάλη θετική τιμή. Στην θέση b2 μια τιμή σχεδόν μηδενική και στην b3 μια μεγάλη αρνητική τιμή. Στην b4 ένα τοπικό ελάχιστο στο σήμα αντιστοιχεί με ένα θετικό κομμάτι του κυματιδίου και κάποια τμήματα του σήματος με σχετικά υψηλότερες τιμές αντιστοιχούν με αρνητικά τμήματα του κυματιδίου. Αυτοί οι συνδυασμοί δίνουν υψηλές αρνητικές τιμές του μετασχηματισμού.....	42
Σχήμα 3-3. Αναπαράσταση του διακριτού κυματιδίου στο δυαδικό πλέγμα χρόνου – κλίμακας. Όπου $S$ είναι η κλίμακα $a_0^m$ . Οι πιο μεγάλες κλίμακες (π.χ $4s = 2^2s$ ) αντιστοιχούν σε χαμηλότερες συχνότητες. Η επιλογή του $a_0 = 2$ εξυπηρετεί την δειγματοληψία της συχνότητας ώστε να αντιστοιχεί σε δυαδική δειγματοληψία [13].....	45
Σχήμα 3-4 Η συνάρτηση κλίμακας και διάφορες προσεγγίσεις του κύματος ημίτονου.....	47
Σχήμα 3-5. Αποσύνθεση και ανακατασκευή με μετασχηματισμό κυματιδίου. Το σήμα $x_0(t)$ (original signal) έχει αποσυντεθεί με την χρήση κυματιδίου daubechies D20 (κορυφή του πρώτου διαγράμματος). Τα σήματα (D1 ως D10) είναι οι συντελεστές λεπτομέρειας όπως προκύπτουν από την αποσύνθεση του σήματος (δεν είναι τα σήματα λεπτομέρειας). Στο κάτω μέρος του πρώτου διαγράμματος είναι η προσέγγιση του σήματος (approximation signal) και όχι οι συντελεστές προσέγγισης. Στο δεύτερο διάγραμμα οι προσεγγίσεις του σήματος $x1$ έως $x10$ προκύπτουν προσθέτοντας την προσέγγιση (approximation signal) και το λεπτομερές σήμα (detail signal) σε χαμηλότερη κλίμακα.....	49
Σχήμα 3-6. Διακριτό ορθοκανονικό κυματίδιο και η συνάρτηση κλίμακας. a) Η συνάρτηση κλίμακας ως άθροισμα δυο εκδοχών της (μια συνεσταλαμμένη στο χρόνο κατά $2t$ και η δεύτερη η οποία επιπλέον είναι μετατοπισμένη στο χρόνο κατά $1$ ), οι οποίες έχουν πολλαπλασιαστεί με συντελεστές $c_k = 1$ . b) Η αντίστοιχη συνάρτηση κυματιδίου που προκύπτει ως άθροισμα των εκδοχών της συνάρτησης κλίμακας οι οποίες είναι πολλαπλασιασμένες με συντελεστές $(-1)^k c_{1-k}$ .....	50
Σχήμα 3-7. Αλγόριθμος αποσύνθεσης πολλαπλής ανάλυσης. Η ανάλυση έγινε μέχρι την πέμπτη κλίμακα για ένα σήμα $N$ δειγμάτων.....	53
Σχήμα 3-8. Διαίρεση του φάσματος με χρήση επαναλαμβανόμενου φιλτραρίσματος.....	54
Σχήμα 3-9. Φιλτράρισμα σήματος με μετασχηματισμό κυματιδίου Διαδικασία α) αποσύνθεσης και β) ανακατασκευής.....	55
Σχήμα 4-1 Κυματίδιο bior 3.9. Οι δυο συναρτήσεις (κλίμακας (PHI) και μητρικής (PSI)) τόσο για την αποσύνθεση (dec) όσο και για την ανακατασκευή (rec).....	59
Σχήμα 4-2. Συναρτήσεις κυματιδίων a) haar ή αλλιώς db1, b) db2, c) coif3, d) sym8.....	60
Σχήμα 4-3 Διαδικασία αποθρομβοποίησης Αρχικά το σήμα αποσυντίθεται (πάνω) στις διάφορες συχνοτικές	

συνιστώσες του (κόκκινο χρώμα) και στη συνέχεια ανακατασκευάζεται (κάτω) χρησιμοποιώντας μόνο τις συνιστώσες ενδιαφέροντος (μαύρο χρώμα). Απαγωγή Pz, 1 <sup>η</sup> δοκιμή.....	62
Σχήμα 4-4. Διαδικασία αποθρομβοποίησης Αρχικά το σήμα αποσυντίθεται (πάνω) στις διάφορες συχνοτικές συνιστώσες του (κόκκινο χρώμα) και στη συνέχεια ανακατασκευάζεται (κάτω) χρησιμοποιώντας μόνο τις συνιστώσες ενδιαφέροντος (μαύρο χρώμα). Απαγωγή Pz, 2 <sup>η</sup> δοκιμή.....	63
Σχήμα 4-5 Μεμονωμένες ΗΕΓ καταγραφές πριν και μετά την αποθρομβοποίηση για τις απαγωγές O1, C5 P3 Fz, F4, F3 και Fr2.....	65
Σχήμα 4-6 Μεμονωμένες ΗΕΓ καταγραφές πριν και μετά την αποθρομβοποίηση για τις απαγωγές O2, C5, P3, Fz, F4, F3 και Fr1.....	66
Σχήμα 4-7 Μεμονωμένες ΗΕΓ καταγραφές πριν και μετά την αποθρομβοποίηση για τις απαγωγές O2, C3, P4, Fz, F4, F3 και Fr2.....	67
Σχήμα 4-8: Μέσος όρος πλάτους κορυφής για κάθε τεστ δοκιμών και περιοχή ενδιαφέροντος (από πάνω αριστερά και δεξιόστροφα: P50, N100, P200, N200, P300, P600). Η μπλε και πράσινη γραμμή αντιστοιχεί στους υγιείς και δυσλεκτικούς μάρτυρες. Απαγωγές: F3 και Fr2.....	81
Σχήμα 4-9: Μέσος όρος πλάτους κορυφής για κάθε σειρά δοκιμών και περιοχή ενδιαφέροντος (από πάνω αριστερά και δεξιόστροφα: P50, N100, P200, N200, P300, P600). Η μπλε και πράσινη μπάρα αντιστοιχεί στους υγιείς και δυσλεκτικούς μάρτυρες. Απαγωγές: F3, Fr2 και Pz.....	82
Σχήμα 4-10: Μέσος όρος πλάτους απαγωγής Fr2 για κάθε ομάδα, τεστ και σειρά δοκιμών. Η μπλε, πράσινη και κίτρινη μπάρα αντιστοιχεί στο 1 <sup>ο</sup> , 2 <sup>ο</sup> και 3 <sup>ο</sup> τεστ δοκιμών. Οι μπάρες λάθους αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα των μέσων όρων.....	83

# Λίστα Πινάκων

Πίνακας 4-1 Πειραματικά Δεδομένα.....	58
Πίνακας 4-2 Σχέση απαγωγών με τα αριθμημένα ηλεκτρόδια.....	58
Πίνακας 4-3 P50 - Βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση.....	70
Πίνακας 4-4: P50 - Μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση.....	71
Πίνακας 4-5: P50 – Επανα- ευαισθητοποίηση.....	71
Πίνακας 4-6: N100 - Βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση.....	72
Πίνακας 4-7: N100 - Μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση.....	72
Πίνακας 4-8: N100 – Επανα-ευαισθητοποίηση.....	73
Πίνακας 4-9: P200 - Βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση.....	73
Πίνακας 4-10: P200 - Μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση.....	74
Πίνακας 4-11: P200 – Επανα-ευαισθητοποίηση.....	74
Πίνακας 4-12: N200 - Βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση.....	75
Πίνακας 4-13: N200 - Μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση.....	75
Πίνακας 4-14: N200 – Επανα-ευαισθητοποίηση.....	76
Πίνακας 4-15: P300 - Βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση.....	76
Πίνακας 4-16: P300 - Μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση.....	77
Πίνακας 4-17: P300 – Επανα-ευαισθητοποίηση.....	77
Πίνακας 4-18: P600 - Βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση.....	78
Πίνακας 4-19: P600 - Μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση.....	78
Πίνακας 4-20: P600 – Επανα-ευαισθητοποίηση.....	79

# Εισαγωγή

Μέχρι σήμερα, η έρευνα που έχει διεξαχθεί από πολλούς επιστήμονες, αφορά την μελέτη της εγκεφαλικής δραστηριότητας με την χρήση εναλλακτικών τεχνολογιών, όπως η αξονική τομογραφία (CT), η λειτουργική μαγνητική τομογραφία (fMRI), η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίου (PET), παρέχοντας αποτελέσματα εύκολα στην ερμηνεία τους. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις, το κόστος της διάγνωσης του ιατρικού προβλήματος είναι μεγάλο και σε ορισμένες από αυτές επιβαρύνεται η υγεία των ασθενών.

Αντίθετα, η οπτική ανάλυση των ακατέργαστων ηλεκτροεγκεφαλογραφικών (HEG) καταγραφών εξακολουθεί να παρέχει σημαντική πληροφορία μη επεμβατικά και σε χαμηλό κόστος. Μελέτες που χρησιμοποιούν το HEG είναι η πολυσωματογραφική μελέτη του ύπνου (*Polysomnography*), η απορρόφηση και ο μεταβολισμός των φαρμάκων, η ανίχνευση και περιγραφή των επιληπτικών αιχμών, καθώς και ο εντοπισμός των πηγών επιληψίας. Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιείται το HEG στην ανάλυση του πλάτους των χαρακτηριστικών κορυφώσεων των προκλητών δυναμικών, για τον χαρακτηρισμό του βαθμού εξοικείωσης υγιών και δυσλεκτικών μαρτύρων σε μια ακουστική πειραματική διαδικασία.

Η αναπτυξιακή δυσλεξία αποτελεί ειδική δυσκολία στην ανάγνωση, η οποία εκδηλώνεται στην παιδική ηλικία. Θεωρείται ότι τα κύρια συστατικά της γλωσσικής επικοινωνίας είναι η ακουστική επεξεργασία σήματος, η παραγωγή του λόγου και η κίνηση των μυών του προσώπου για να παραχθεί η ομιλία. Σε άτομα, με τέτοιες μαθησιακές δυσκολίες, η φωνολογική επεξεργασία ενός σήματος είναι μειωμένη και χαρακτηρίζεται από βραδεία και ανακριβή επεξεργασία του ακουστικού περιεχομένου της γλώσσας.

Η εξοικείωση ορίζεται ως μία απόκριση που ελαττώνεται συναρτήσει της επανάληψης του ακουστικού ερεθίσματος. Η εξοικείωση θεωρείται ότι αντανακλά μια στοιχειώδη διαδικασία μάθησης, αν δεν οφείλεται σε άλλους παράγοντες, όπως π.χ. λόγω κούρασης, λόγω βλάβης στο σύστημα των αισθήσεων ή λόγω περιόδων όπου δεν ανταποκρίνεται ο ασθενής. Χωρίζεται σε βραχυπρόθεσμη (*short term habituation* STH), η οποία παρατηρείται όταν το ερέθισμα εμφανίζεται με μικρές διακοπές μεταξύ των ερεθισμάτων και μακροπρόθεσμη (*Long term Habituation* LTH), η οποία συμβαίνει σε μεγαλύτερα μεσοδιαστήματα μεταξύ των ερεθισμάτων. Η εφαρμογή ενός διαφορετικού ερεθίσματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μειωμένης απόκρισης στο αρχικό ερέθισμα. Αυτή η βελτίωση των αντανακλαστικών αποκρίσεων ονομάζεται ευαισθητοποίηση. Όπως η εξοικείωση έτσι και η ευαισθητοποίηση έχει και βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη μορφή που καθορίζονται σύμφωνα με τα μεσοδιαστήματα μεταξύ των ερεθισμάτων.

Οι ΗΕΓ καταγραφές αποτελούν μη στάσιμα σήματα, γεγονός που καθιστά την ανάλυσή τους δύσκολη και απαιτεί την χρήση εξειδικευμένων μεθόδων επεξεργασίας σημάτων. Επιπλέον, τα συστατικά (κορυφές ενδιαφέροντος) ενός προκλητού δυναμικού είναι εντοπισμένα χρονικά, εμφανή πάνω από ορισμένες περιοχές στο τριχωτό της κεφαλής (εντοπισμένα στο χώρο) και περιορίζονται σε ορισμένες περιοχές των χρονικών και χωρικών συχνοτήτων (συγκεκριμένη κλίμακα). Επίσης, λόγω της εν εξελίξει εγκεφαλικής δραστηριότητας, η οποία έχει μεγαλύτερο πλάτος κατα μια τάξη μεγέθους σε σχέση με τα υπο μελέτη προκλητά δυναμικά, ο σηματοθορυβικός λόγος είναι χαμηλός. Η Κυματιδιακή ανάλυση (wavelet analysis) αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο αποθορυβοποίησης με πολύ καλή διακριτική ικανότητα, τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση των προκλητών δυναμικών, όπου συνήθως η δραστηριότητα, που έχει ενδιαφέρον μελέτης, λαμβάνει χώρα σε ένα κλάσμα του δευτερολέπτου και σχετίζεται με διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων.

Αυτή η εργασία περιλαμβάνει 4 βασικά κεφάλαια, εκτός από την Εισαγωγή και τα Συμπεράσματα. Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται ορισμένα γενικά στοιχεία της εγκεφαλικής νευροφυσιολογίας, έτσι ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να καταλάβει πώς λαμβάνονται οι πληροφορίες από το περιβάλλον, μεταφέρονται και επεξεργάζονται. Δίνεται επίσης μια σύντομη εισαγωγή στη δυσλεξία που σχετίζεται με δυσλειτουργία περιοχών του εγκεφάλου που αφορούν κέντρα λήψης και επεξεργασίας ακουστικών ερεθισμάτων. Στο κεφάλαιο 2 αναπτύσσονται τα κύρια χαρακτηριστικά του Ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος (ΗΕΓ), όπως οι φασματικές συνιστώσες και οι βασικές κορυφώσεις των προκλητών δυναμικών σε σχέση με το χρόνο, επίσης δίνονται οι ορισμοί τους και ο τρόπος μέτρησης τους. Στόχος είναι η κατανόηση και χρησιμότητα των κυματομορφών στη διάγνωση πνευματικών και ψυχικών δυσλειτουργιών. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια σύντομη περιγραφή του μετασχηματισμού Fourier, αναφέρονται οι περιορισμοί του στην περίπτωση ανάλυσης ΗΕΓ καταγραφών, και λεπτομερή περιγραφή του μετασχηματισμού κυματιδίου (μέθοδος ανάλυσης σημάτων στην παρούσα εργασία). Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αποθορυβοποίησης των ΗΕΓ καταγραφών καθώς και η στατιστική επεξεργασία του χαρακτηριστικού εξοικείωσης των αποκρίσεων. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και οι πιθανές μελλοντικές της προεκτάσεις.

# 1. Νευροφυσιολογία εγκεφάλου

## 1.1. Εισαγωγή

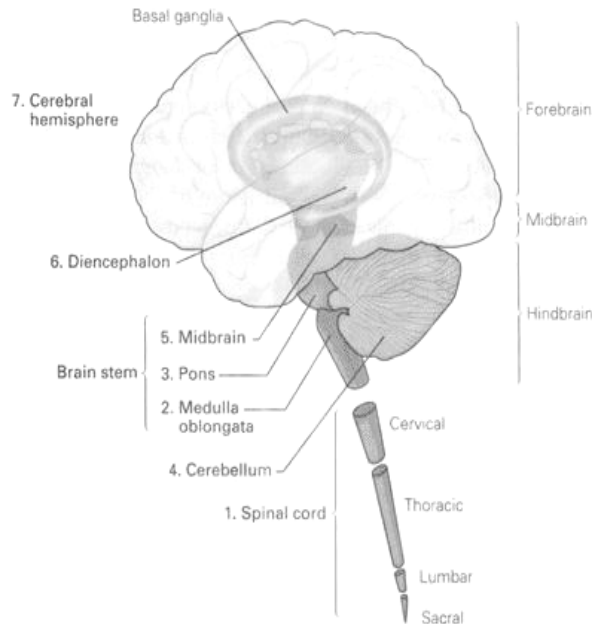
Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή της νευροφυσιολογίας του εγκεφάλου, και εξετάζεται ο βαθμός στον οποίο εγκεφαλικές λειτουργίες που σχετίζονται με τις γνωστικές μας ικανότητες, μπορούν να βρίσκονται σε συγκεκριμένες περιοχές του εγκεφάλου. Ακόμα μελετάται ο τρόπος που γίνεται επεξεργασία των οπτικών και ακουστικών ερεθισμάτων από τον εγκέφαλο. Εξετάζεται επίσης ο βαθμός στον οποίο η δυσλεξία συνοδεύεται με άλλες αναπτυξιακές διαταραχές σε ένα ή περισσότερα τμήματα, του εγκεφάλου.

## 1.2. Εγκέφαλος και γνωσιακές λειτουργίες

### 1.2.1. Φυσιολογία εγκεφάλου

Το νευρικό σύστημα είναι ένα δίκτυο επικοινωνίας, που επιτρέπει σε έναν οργανισμό να αλληλεπιδρά κατάλληλα με το περιβάλλον. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει, αισθητικά μέρη που ανιχνεύουν δρώμενα στο περιβάλλον, μέρη απαρτίωσης που επεξεργάζονται τα αισθητικά δεδομένα και πληροφορίες αποθηκευμένες στη μνήμη και τέλος κινητικά μέρη που παράγουν και ρυθμίζουν κινήσεις. Διαιρείται στο Περιφερικό Νευρικό Σύστημα (ΠΝΣ) και στο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα (ΚΝΣ) .

Το κεντρικό νευρικό σύστημα, είναι μια αμφίπλευρη και συμμετρική δομή, που αποτελείται από 7 κύρια μέρη: τον νωτιαίο μυελό (1. *Spinal cord*), τον προμήκη μυελό (2. *medulla oblongata*), τη γέφυρα (3. *pons*), την παρεγκεφαλίδα (4. *cerebellum*), τον μέσο εγκέφαλο (5. *midbrain*), τον διάμεσο εγκέφαλο (6. *diencephalon*) και τα εγκεφαλικά ημισφαίρια (7. *cerebral hemisphere*) (Σχήμα 1.1).



**Σχήμα 1-1 Το κεντρικό νευρικό σύστημα διαιρείται σε 7 κύρια μέρη.\***

Οι απεικονιστικές τεχνικές που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια, επιτρέπουν την αναγνώριση των δομών αυτών στον ζωντανό ανθρώπινο εγκέφαλο. Με τη βοήθεια διαφόρων πειραματικών μεθόδων, τέτοιες εικόνες μπορούν να ληφθούν ενώ οι εξεταζόμενοι ασχολούνται με συγκεκριμένες εργασίες, οι οποίες στη συνέχεια μπορούν να συσχετιστούν με τη δραστηριότητα συγκεκριμένων περιοχών του εγκεφάλου. Κατά συνέπεια, η άποψη του Gall\*\* ότι συγκεκριμένες, διαφορετικές περιοχές του φλοιού, είναι εξειδικευμένες σε συγκεκριμένες λειτουργίες θεωρείται ως ακρογωνιαίος λίθος της σύγχρονης επιστήμης του εγκεφάλου.

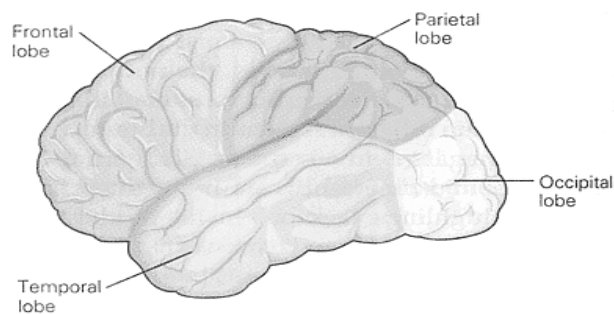
Ένας από τους λόγους για τους οποίους το γεγονός αυτό διέφευγε από τους ερευνητές για τόσα πολλά χρόνια βρίσκεται σε μια άλλη οργανωτική του νευρικού συστήματος που είναι γνωστή ως παράλληλη επεξεργασία. Όπως θα δούμε πολλές αισθητικές, κινητικές και γνωσιακές λειτουργίες διεκπεραιώνονται από περισσότερες της μιας νευρικής οδού.

Οι εγκεφαλικές λειτουργίες που σχετίζονται με τις γνωσιακές μας ικανότητες εντοπίζονται κατά κύριο λόγο, στον φλοιό των εγκεφαλικών ημισφαιρίων (στη φαιά ουσία που περιβάλλει και καλύπτει τα εγκεφαλικά ημισφαίρια). Σε κάθε ένα από τα δύο εγκεφαλικά ημισφαίρια, ο φλοιός διαιρείται σε τέσσερις ανατομικώς διακριτούς λοβούς: τον μετωπιαίο, τον βρεγματικό, τον κροταφικό και τον ινιακό (βλ Σχήμα 1.2), τα ονόματα των οποίων προκύπτουν από τα ονόματα των υπερκείμενων οστών του κρανίου. Αυτοί οι λοβοί

\*Eric R. Kandel, James H. Schwartz et al. ,”*The Neurobiology of Behavior*” in Principles of Neural Science, 4th Edition, NY: McGraw-Hill ,2000, fig 1-2A

\*\* Franz Joseph Gall, MD (9 Μαρτίου του 1758 - 22 του Αυγούστου 1828) ήταν νευροανατόμος, φυσιολόγος, και πρωτοπόρος στη μελέτη του εντοπισμού των νοητικών λειτουργιών του εγκεφάλου. Γύρω στο 1800, ανέπτυξε την κρανιοσκοπία, μια μέθοδο για να καθορίσει την προσωπικότητα και την ανάπτυξη των ψυχικών και πνευματικών ικανοτήτων με βάση το εξωτερικό σχήμα του κρανίου. Μετονομάστηκε αργότερα σε φρενολογία.

έχουν εξειδικευμένες λειτουργίες. Ο μετωπιαίος λοβός (*frontal*) σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τον προγραμματισμό της μελλοντικής δράσης και με τον έλεγχο της κίνησης, ο βρεγματικός λοβός (*parietal*) σχετίζεται με τη σωματική αισθητικότητα και τη σωματική εικόνα, ο ινιακός λοβός (*occipital*) με την όραση, ο κροταφικός λοβός (*temporal*) με την ακοή και μέσω των εν τω βάθει δομών του ιππόκαμπου και της αμυγδαλής, με πλευρές της μάθησης, της μνήμης και του συναισθήματος. Κάθε λοβός έχει αρκετές χαρακτηριστικές πτυχές. Πρόκειται για ένα εξελικτικό στρατήγημα προκειμένου να αυξηθεί το ωφέλιμο εμβαδόν σε έναν περιορισμένο χώρο. Οι πτυχές αυτές ονομάζονται έλικες, ενώ μεταξύ αυτών παρεμβάλλονται οι αύλακες. Οι πιο ανεπτυγμένες έλικες είναι ίδιες σε όλα τα άτομα και έχουν συγκεκριμένες ονομασίες. Η λειτουργική μονάδα του εγκεφάλου είναι ο νευρώνας. Τα κύτταρα που συμμετέχουν στη λειτουργία αυτή είναι εξειδικευμένα, αφενός μεν στη λήψη πληροφοριών, αφετέρου δε στη λήψη αποφάσεων και τη μετάδοση σημάτων σε άλλους νευρώνες [1].



Σχήμα 1-2Οι τέσσερις λοβοί του φλοιού των εγκεφαλικών ημισφαιρίων

### 1.2.2. Γνωσιακές λειτουργίες-δυσλεξία

Η οργάνωση του φλοιού των εγκεφαλικών ημισφαιρίων έχει δύο σημαντικά χαρακτηριστικά:

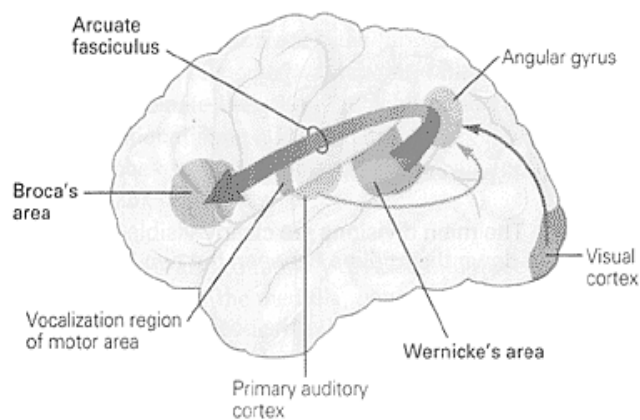
- Πρώτον, κάθε ημισφαίριο σχετίζεται κυρίως με αισθητικές και κινητικές λειτουργίες του αντίπλευρου (αντίθετου) ημιμορίου του σώματος. Έτσι, μια αισθητική πληροφορία που φθάνει στον νωτιαίο μυελό, π.χ. από το αριστερό χέρι, φέρεται στη δεξιά πλευρά του νευρικού συστήματος (είτε στον νωτιαίο μυελό, είτε στο στέλεχος) προτού μεταβιβαστεί στον φλοιό των ημισφαιρίων. Αντίστοιχα, οι κινητικές περιοχές του δεξιού ημισφαιρίου ασκούν έλεγχο των κινήσεων του αντίθετου αριστερού ημιμορίου του σώματος.
- Δεύτερον, αν και τα ημισφαίρια φαίνονται όμοια, δεν είναι απολύτως συμμετρικά, ούτε ως προς την κατασκευή, ούτε ως προς τη λειτουργία.

Ο Γάλλος νευρολόγος Pierre Paul Broca επηρεάστηκε αρκετά από τον Gall και από την ιδέα ότι οι εγκεφαλικές λειτουργίες μπορούν να εντοπιστούν. Ο Broca επέκτεινε τη



σκέψη του Gall κατά έναν σημαντικό τρόπο. Υποστήριξε ότι η φρενολογία, δηλαδή η προσπάθεια να εντοπιστούν οι νοητικές λειτουργίες, πρέπει να βασιστεί στην εξέταση εγκεφαλικών βλαβών που προκαλούνται από κλινικές βλάβες και όχι στην εξέταση των εξογκωμάτων στην εξωτερική επιφάνεια της κεφαλής.

Ο Wernicke θεώρησε ως αξίωμα ότι ο λόγος εμπεριέχει ξεχωριστά κινητικά και αισθητικά προγράμματα, το κάθε ένα από το οποία ελέγχεται από ξεχωριστές περιοχές του φλοιού. Υποστήριξε ότι το κινητικό πρόγραμμα, το οποίο ελέγχει τις κινήσεις του στόματος κατά την ομιλία εντοπίζεται στην περιοχή Broca, η οποία βρίσκεται στην κατάλληλη θέση μπροστά από την κινητική περιοχή που ελέγχει το στόμα, τη γλώσσα, την υπερώα και τις φωνητικές χορδές (Σχήμα 1-3).



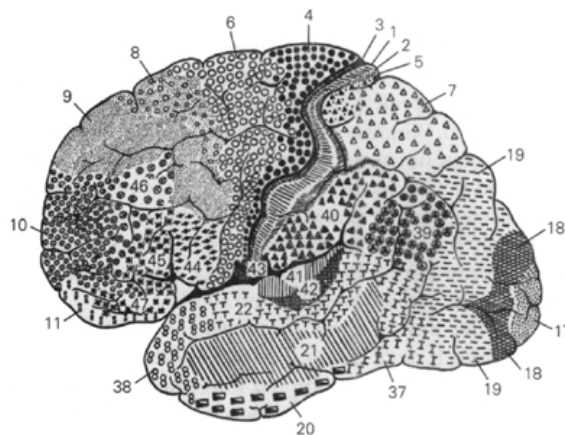
**Σχήμα 1-3. Περιοχές που σχετίζονται με τον λόγο . Η περιοχή Wernicke επεξεργάζεται τις ακουστικές πληροφορίες για τη γλώσσα και είναι σημαντική για την κατανόηση του λόγου. Βρίσκεται κοντά στον πρωτοταγή ακουστικό φλοιό και στη γωνιώδη έλικα, η οποία συνδυάζει ακουστικές πληροφορίες με πληροφορίες από άλλες αισθήσεις. Η περιοχή Broca ελέγχει την παράγωγή του λόγου. Βρίσκεται, κοντά στην κινητική περιοχή και ελέγχει τις κινήσεις του στόματος και της γλώσσας για την προαγωγή των λέξεων. Η περιοχή Wernicke επικοινωνεί με την περιοχή Broca με μια δεσμίδα ινών, την τοξοειδή δεσμίδα .**

Το αισθητικό πρόγραμμα, το οποίο ελέγχει την αντίληψη των λέξεων, αποδόθηκε στην περιοχή του κροταφικού λοβού που είχε ανακαλύψει ο ίδιος και ονομάζεται, περιοχή Wernicke. Η περιοχή αυτή περιβάλλεται από τον ακουστικό φλοιό, όπως επίσης και από περιοχές που συνολικά είναι γνωστές ως συνειρμικός φλοιός, δηλαδή περιοχές που ολοκληρώνουν ακουστικές οπτικές και σωματοαισθητικές πληροφορίες για να προκύψουν σύνθετες αντιλήψεις.

Τα πρώτα βήματα στην επεξεργασία των προφορικών ή γραπτών λέξεων από τον εγκέφαλο γίνονται σε ξεχωριστές αισθητικές περιοχές του φλοιού, εξειδικευμένες για ακουστικές και οπτικές πληροφορίες. Η νευρική αντιπροσώπευση κάθε μιας από τις παραστάσεις αυτές, μεταβιβάζεται στη συνέχεια σε μία φλοιϊκή συνειρμική περιοχή που

είναι εξειδικευμένη για οπτικές και ακουστικές πληροφορίες, τη γωνιώδη έλικα. Εδώ σύμφωνα με τον Wernicke, προφορικές ή γραπτές λέξεις μετασχηματίζονται σε μια κοινή νευρική αναπαράσταση που άφορα και την ομιλία και τη γραφή. Από την γωνιώδη έλικα η αναπαράσταση αυτή μεταβιβάζεται στην περιοχή Wernicke, όπου αναγνωρίζεται ως λόγος και συνδέεται με το νόημα. Χωρίς αυτή την σύνδεση, η ικανότητα κατανόησης του λόγου χάνεται. Η κοινή νευρική αναπαράσταση μεταβιβάζεται στην συνέχεια στη περιοχή Broca, όπου μετασχηματίζεται από αισθητική αναπαράσταση σε κινητική αναπαράσταση, που μπορεί να οδηγήσει σε προφορικό ή γραπτό λόγο.

Εμπνευσμένη από τον Wernicke, μια νέα σχολή φλοιϊκής εντόπισης, με επικεφαλής τον ανατόμο Korbinian Brodmann εμφανίστηκε στη Γερμανία στις αρχές του 20ου αιώνα. Η σχολή αυτή προσπάθησε να διακρίνει τις διαφορετικές λειτουργικές περιοχές του φλοιού των εγκεφαλικών ημισφαιρίων, βασιζόμενη στη μορφολογία των κυττάρων και στη χαρακτηριστική διάταξη των κυττάρων αυτών σε στιβάδες. Χρησιμοποιώντας κυτταροαρχιτεκτονική αυτή μέθοδο, ο Brodmann διέκρινε 52 ανατομικώς και λειτουργικώς διακριτές περιοχές στον φλοιό εγκεφαλικών ημισφαιρίων του ανθρώπου (Σχήμα 1-4) [1].



**Σχήμα 1-4.Περιοχές κατά Brodmann. Αρκετές περιοχές που καθορίστηκαν από τον Brodmann βρέθηκε ότι ελέγχουν ειδικές εγκεφαλικές λειτουργίες. Οι περιοχές 41 και 42 περιλαμβάνουν τον πρωτοταγή ακουστικό φλοιό.**

Η ανάγνωση απαιτεί μεγαλύτερη επιδεξιότητα σε σύγκριση με τον προφορικό λόγο, διότι απαιτεί υψηλού επιπέδου συνδυασμό των οπτικών κινήσεων σάρωσης και της ακουστικής κατανόησης (εσωτερική ομιλία). Η ανάγνωση ενεργοποιεί ταυτόχρονα δύο οδούς:

- η μία πορεύεται μέσω της γωνιώδους έλικας προς το κέντρο του Wernicke και επεξεργάζεται η φωνολογική αντιπροσώπευση κάθε συλλαβής στα μνημονικά εγγράμματα του κροταφικού λοβού
- και η άλλη οδός πορεύεται προς τον αριστερό έξω ραχιαίο προμετωπιαίο φλοιό και επεξεργάζεται τα εννοιολογικά μνημονικά εγγράμματα της κάθε λέξης.

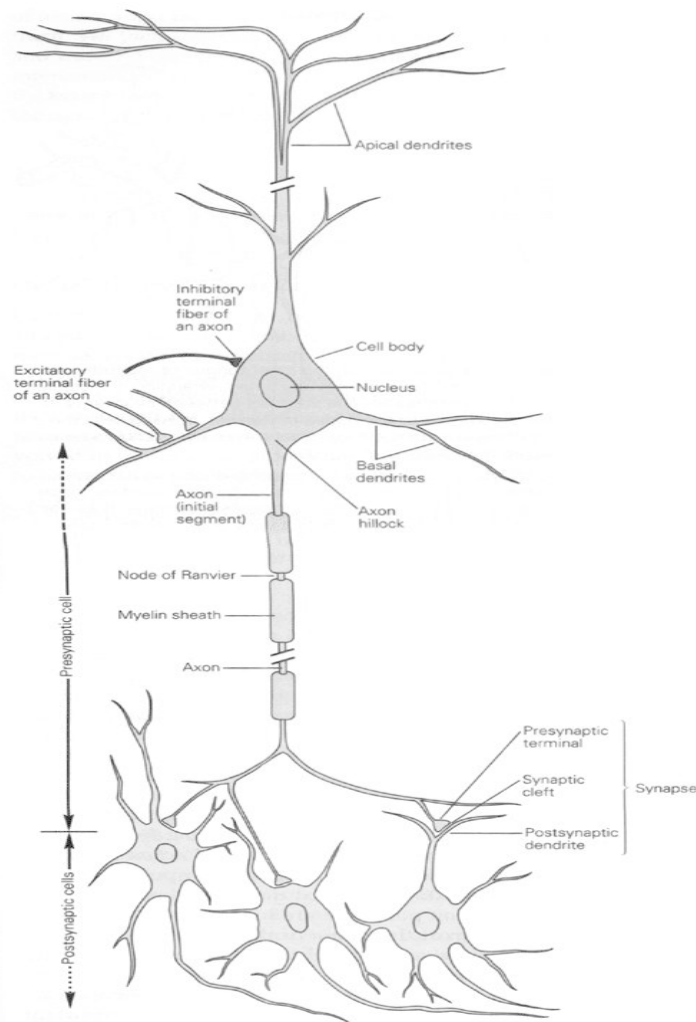
Η αναπτυξιακή δυσλεξία αποτελεί ειδική και εκσεσημασμένη δυσκολία στην ανάγνωση, που εκδηλώνεται στην παιδική ηλικία. Σταθερό εύρημα στην τομογραφία εκπομπής ηλεκτρονίων και στη μαγνητική τομογραφία είναι η μειωμένη δραστηριότητα της αριστερής κροταφοβρεγματικής περιοχής (πεδία 22, 39, 40). Η μειωμένη φωνολογική επεξεργασία, χαρακτηρίζεται από βραδεία και ανακριβή επεξεργασία του ακουστικού περιεχομένου της γλώσσας. Η διαταραχή αυτή συνήθως περιγράφεται, ως φωνολογική δυσλεξία αν και μπορεί να συνυπάρχουν διαταραχές και στα άλλα στάδια επεξεργασίας του λόγου. Ωστόσο, η οξεία δυσλεξία, συνήθως συνοδεύεται με άλλες αναπτυξιακές διαταραχές σε ένα ή περισσότερα τμήματα του εγκεφάλου (συμμετοχή μέχρι και τεσσάρων διαφορετικών χρωμοσωμάτων).

- Στη μαγνητική τομογραφία απεικονίζεται συνήθως μικρότερου μεγέθους αριστερό κροταφικό επίπεδο σε σύγκριση με το φυσιολογικό μέσο όρο. Στο φλοιό του κροταφικού επιπέδου έχει βρεθεί κατά τη διενέργεια ερευνών, ατελής μετανάστευση των νευρώνων από την αιθουσαία ζώνη προς τον κροταφικό φλοιό κατά τη διάρκεια της εμβρυϊκής ζωής, παθολογικά μικρός αριθμός νευρώνων στις στριβάδες I-III, παθολογικά μεγάλος αριθμός νευρώνων στις στριβάδες IV-VI και συναθροίσεις νευρώνων στην υποκείμενη λευκή ουσία.
- Οι ενδοκυττάρια νευρώνες του έσω γονατώδους σώματος, που προβάλλουν στον πρωτογενή ακουστικό φλοιό είναι μικρότεροι σε μέγεθος. Ως αποτέλεσμα πιθανότατα μειώνεται η ικανότητα ανίχνευσης της συχνότητας και του εύρους των ήχων, που εκδηλώνονται ως παθολογική αντίληψη των λέξεων που εκφωνούνται.
- Όπως διαπιστώνεται με τη διενέργεια τομογραφία εκπομπής ηλεκτρονίων σε δυσλεκτικούς, η νήσος του εγκεφάλου είναι ανενεργή κατά την εκτέλεση συγκεκριμένων δοκιμασιών. Η νήσος του εγκεφάλου αποτελεί πιθανότατα ενδιάμεσο σταθμό σύνδεσης της υπερχειλίας έλικας και της γωνιώδους έλικας με το κέντρο Broca. Επομένως βλάβη στην σύνδεση αυτή παρακωλύει την εσωτερική ομιλία κατά την διάρκεια της ανάγνωσης [3].

### **1.3. Δομή και λειτουργία του νευρώνα**

Οι βασικές μονάδες του εγκεφάλου είναι τα νευρικά κύτταρα ή νευρώνες. Οι νευρώνες έχουν την ίδια βασική αρχιτεκτονική αν και μπορούν να ταξινομηθούν σε χίλιους διαφορετικούς τύπους.

Ένας τυπικός νευρώνας αποτελείται από τέσσερις μορφολογικά καθοριζόμενες περιοχές, το κυτταρικό σώμα, τους δενδρίτες (*apical dendrites*), το νευράξονα (*axon*) και τα συναπτικά τελικά κομβία (*presynaptic terminal*) (Σχήμα1-5). Κάθε μία από τις περιοχές διαδραματίζει ιδιαίτερο ρόλο στην παραγωγή και στη μετάδοση των σημάτων μεταξύ των νευρικών κυττάρων.



Σχήμα 1-5. Η δομή του νευρώνα \*

Το κυτταρικό σώμα (*cell body*) είναι το μεταβολικό κέντρο του κυττάρου. Περιέχει τον πυρήνα (*nucleus*), στον οποίο βρίσκονται τα γονίδια του κυττάρου, αλλά και το ενδοπλασματικό δίκτυο. Το δίκτυο αυτό αποτελεί επέκταση του πυρήνα και σε αυτό συντίθενται οι πρωτεΐνες του κυττάρου. Χορηγεί συνήθως δυο ειδών προεκβολές ή αποφυάδες: αρκετές κόντες, τους δενδρίτες και μια μακριά κυλινδρική, τον νευράξονα. Οι δενδρίτες είναι προέκταση του κυτταρικού σώματος οι οποίοι διακλαδίζονται όπως ένα δέντρο και χρησιμεύουν ως κύριο σύστημα υποδοχής σημάτων από άλλα νευρικά κύτταρα.

Ο νευράξονας είναι υπεύθυνος για την αγωγή των σημάτων που εκπορεύονται από τον συγκεκριμένο νευρώνα προς τους άλλους νευρώνες ενώ μπορεί να άγει σήματα σε αποστάσεις που κυμαίνονται από 0,1mm έως και 3m. Αυτά τα σήματα ονομάζονται δυναμικά ενεργείας και είναι ταχείες παροδικές νευρικές ώσεις. Τα δυναμικά ενεργείας παράγονται σε εξειδικευμένη περιοχή πυροδότησης, στο σημείο έκφυσης του άξονα που ονομάζεται εκφυτικός κώνος (*axon hillock*). Προκειμένου να αυξηθεί η ταχύτητα αγωγής των δυναμικών, οι μεγάλοι νευράξονες περιβάλλονται από ένα λιπώδες μονωτικό μυελώδες

\* Eric R. Kandel, James H. Schwartz et.al. „*The Neurobiology of Behavior*” in Principles of Neural Science, 4th Edition, NY: Mcgraw-Hill ,2000, fig 2-2

έλυτρο (*myelin sheath*) το οποίο διακόπτεται κατά διαστήματα από τους κόμβους Ranvier (*node of ranvier*). Σε αυτά τα μη μονωμένα σημεία κατά μήκος του νευράξονα αναγεννάζεται το δυναμικό ενεργείας.

Η σύναψη (*synapse*) είναι το σημείο επαφής των επιφανειών ενός δενδρίτη και ενός νευράξονα. Οι νευράξονες καταλήγουν στην προσυναπτική μεμβράνη που συμμετέχει στο σχηματισμό της σύναψης, δηλαδή της περιοχής όπου έρχεται ο νευρώνας σε ηλεκτροχημική επαφή με άλλους νευρώνες για να τους μεταδώσει το σήμα. Το προσυναπτικό κύτταρο (*presynaptic cell*), το οποίο μεταδίδει το σήμα και το μετασυναπτικό κύτταρο (*postsynaptic cell*), το οποίο δέχεται το σήμα, δεν έρχονται σε επαφή αφού τα δύο κύτταρα χωρίζονται μεταξύ τους στη σύναψη από ένα διάστημα το οποίο καλείται συναπτική σχισμή (*synaptic cleft*) (σχήμα 1-5).

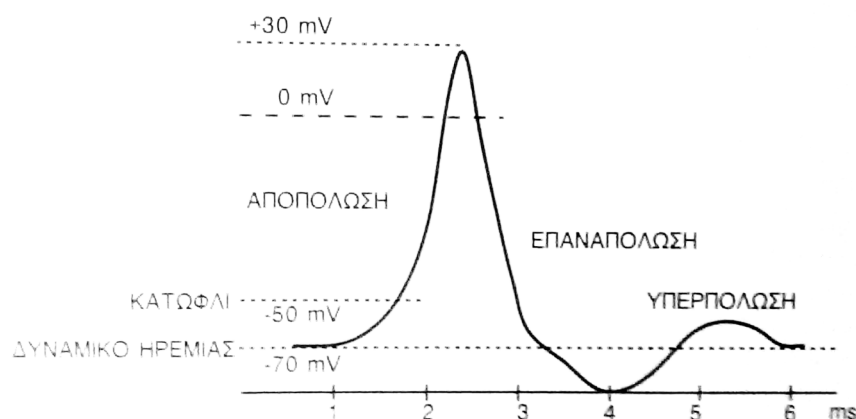
Ο νευρώνας μαζί με τον άξονα και τους δενδρίτες καλύπτεται από την κυτταρική μεμβράνη, πάχους 8–10nm, η οποία είναι ένα διπλό στρώμα από μόρια λιπιδίων μέσα στο οποίο υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη πρωτεϊνών. Κάποιες από τις πρωτεΐνες αυτές λειτουργούν ως δίοδοι ιόντων κάνοντας την μεμβράνη εκλεκτικά διαπερατή σε ιόντα κυρίως  $\text{Na}^+$  και  $\text{K}^+$ . Ουσιαστικός ρόλος της είναι να διατηρεί σε κατάσταση ηρεμίας μια διαφορά δυναμικού, τέτοια ώστε το εσωτερικό του κυττάρου να βρίσκεται σε αρνητικό δυναμικό σε σχέση με τον εξωτερικό χώρο.

Τα διεγερσιμα κύτταρα όπως τα νευρικά και τα μυϊκά, διαφέρουν από τα άλλα κύτταρα ως προς το ότι το δυναμικό της μεμβράνης τους μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά και γρήγορα. Αυτή η αλλαγή μπορεί να χρησιμεύσει ως μηχανισμός μετάδοσης του σήματος. Ελαττώνοντας το δυναμικό της μεμβράνης κατά 10 mV, η μεμβράνη γίνεται περισσότερο διαπερατή από το  $\text{Na}^+$  από ότι από το  $\text{K}^+$ . Αυτή η εισροή θετικά φορτισμένων ιόντων νατρίου εξουδετερώνει τα αρνητικά φορτία στο εσωτερικό του κυττάρου και έχει ως αποτέλεσμα περαιτέρω ελάττωση στο δυναμικό της μεμβράνης, πρόκειται για το δυναμικό ενεργείας [1].

Κατά μήκος της μεμβράνης των κυττάρων διατηρείται, σε κατάσταση ηρεμίας, μια διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού, τέτοια ώστε το εσωτερικό του κυττάρου να βρίσκεται σε αρνητικό δυναμικό ως προς τον εξωτερικό χώρο. Στην περίπτωση των νευρικών και μυϊκών κυττάρων, αυτό το δυναμικό ηρεμίας είναι της τάξης των λίγων δεκάδων mV ( $> -70$  mV) και οφείλεται στην άνιση κατανομή ιόντων μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης, η οποία κατανομή διατηρείται από τη μεταβολική δραστηριότητα του κυττάρου. Τα δυναμικά τα οποία μετρούμε μεταξύ δύο απαγωγών στην εξωτερική δερματική επιφάνεια του κεφαλιού οφείλονται ουσιαστικά σε ρεύματα ιόντων διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης των νευρώνων που συμμετέχουν στην εκάστοτε εγκεφαλική διεργασία. Τα ρεύματα αυτά διαχέονται στην περιοχή από τα σημεία δημιουργίας τους έως την εξωτερική δερματική επιφάνεια, διότι ο εγκεφαλικός ιστός, οι μήνιγγες, το κρανίο και το δέρμα άγουν το

ηλεκτρικό ρεύμα. Υπάρχουν δύο είδη διαμεμβρανικής ρευματικής ροής, που σχετίζονται με τη μετάδοση και επεξεργασία πληροφοριών μεταξύ των νευρώνων και προκαλούν τα εξής διαφορετικής φύσης δυναμικά:

- Δυναμικό Δράσης ή ενεργείας (action potential): Προκαλείται όταν το διαμεμβρανικό δυναμικό στο σώμα του νευρώνα, ως συνολικό άθροισμα των ερεθισμών που καταφθάνουν από τους δενδρίτες, αλλάζει από την τιμή ηρεμίας και περνά ένα ορισμένο κατώφλι (συνήθως περίπου  $-50\text{mV}$ ). Τότε συμβαίνει ενεργοποίηση του νευρώνα, αποπόλωση της κυτταρικής μεμβράνης στη «ρίζα» όπου ο άξονας ξεκινά από το σώμα, και εμφάνιση μιας αιχμής δυναμικού ως τα  $30\text{mV}$ , με επακόλουθη επιστροφή στην αρχική κατάσταση ηρεμίας αφού συμβεί επαναπόλωση και υπερπόλωση (Σχήμα 1-6) [4]. Η ελάττωση του δυναμικού της μεμβράνης λέγεται εκπόλωση ή αποπόλωση. Επειδή η αποπόλωση ενισχύει την ικανότητα του κυττάρου να παράγει ένα δυναμικό δράσης, είναι διεγερτική. Αντιθέτως, η αύξηση του δυναμικού της μεμβράνης (π.χ. από  $-65$  σε  $-75\text{mV}$ ) καλείται υπερπόλωση και δρα ανασταλτικά[1]. Αυτή η κρουστική ώση διαδίδεται ταχύτατα κατά μήκος του άξονα, αναπαράγοντας τον κύκλο πόλωση - αποπόλωση - πόλωση και τη συνακόλουθη ρευματική ροή μέσα και έξω από την κυτταρική μεμβρανών.



**Σχήμα 1-6 .Δυναμικό δράσης. Το σχήμα δίνει τη διαφορά δυναμικού  $\Delta V=V$  (εσωκυττάριου χώρου) –  $V$  (εξωκυττάριου χώρου) συναρτήσει του χρόνου σε ένα σημείο της μεμβράνης**

- Μετασυναπτικό Δυναμικό (Post Synaptic Potential – PSP): Το δυναμικό αυτό εμφανίζεται στη μετασυναπτική μεμβράνη, όταν μεταδοθεί ο ερεθισμός μέσω του συναπτικού χάσματος από την προσυναπτική μεμβράνη, ερεθισμός ο οποίος οφείλεται σε ενεργοποίηση του προσυναπτικού νευρώνα. Έχει πιο συνεχή μορφολογία από τα δυναμικά δράσης, είναι πιο περιορισμένο στο χώρο (εμφανίζεται στην περιοχή της σύναψης) και έχει χαμηλότερη τιμή, διότι η μετασυναπτική μεμβράνη αποπολώνεται ή υπερπολώνεται σε μικρότερο βαθμό από ότι το σώμα του νευρώνα, όπου αθροίζονται όλα τα σήματα τα προερχόμενα από τους δενδρίτες. Όταν

έχουμε αποπόλωση το δυναμικό ονομάζεται μετασυναπτικό δυναμικό διέγερσης (excitatory PSP - EPSP), ενώ στην αντίθετη περίπτωση μετασυναπτικό δυναμικό καταστολής ή αναστολής (inhibitory PSP - IPSP), διότι διαδιδόμενο προς το σώμα και αθροιζόμενο με άλλες συνεισφορές από διαφορετικές συνάψεις, δεν διευκολύνει ενδεχόμενη αποπόλωση του νευρώνα. Σε μια σύναψη του εγκεφάλου μπορεί να εμφανισθεί συνήθως, είτε μόνο EPSP, οπότε η σύναψη ονομάζεται σύναψη διέγερσης ή διεγείρουσα σύναψη (excitatory synapse), είτε μόνο IPSP, οπότε αυτή ονομάζεται κατασταλτική ή ανασταλτική σύναψη (inhibitory synapse).

#### **1.4. Συμπέρασμα**

Το σύνολο των ηλεκτροχημικών επιδράσεων από νευρώνα σε νευρώνα, αθροιζόμενο για όλες τις περιοχές του εγκεφάλου, μέσα από ένα δίκτυο ανεξερεύνητης ακόμη πολυπλοκότητας, δημιουργεί αυτό που ονομάζουμε εγκεφαλική λειτουργία, της οποίας μόνο μερικώς μπορούμε να ανιχνεύσουμε και να μελετήσουμε τις διάφορες διαδικασίες και εκδηλώσεις.

Η απεικόνιση του εγκεφάλου μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους όπως εγκεφαλική αγγειογραφία, αξονική (CT) ή λειτουργική μαγνητική τομογραφία (fMRI), τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίου (PET), μαγνητική αγγειογραφία (MRA) ή μαγνητική φασματοσκοπία και το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα.

Καθεμιά από αυτές αποτελεί διαγνωστικό βοήθημα για κακώσεις του εγκεφάλου και αρκετές από αυτές, όπως η μαγνητική φασματοσκοπία, η μαγνητική τομογραφία και η αξονική τομογραφία έχουν υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα και προτιμούνται έναντι του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος στην απεικόνιση της εγκεφαλικής δραστηριότητας. Όταν όμως αυτές οι μέθοδοι δεν είναι διαθέσιμες, η πιο απλή μη επεμβατική μέθοδος, είναι το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα.

## 2. Εγκεφαλογράφημα και προκλητά δυναμικά

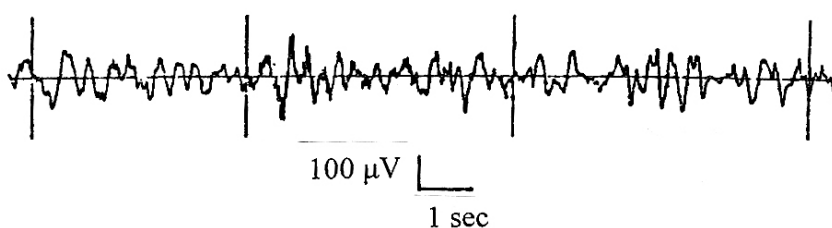
### 2.1. Εισαγωγή

Το Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (ΗΕΓ) και τα προκλητα δυναμικά (ΠΔ) είναι καταγραφές της ηλεκτρικής δραστηριότητας του εγκεφάλου, μέσω ηλεκτροδίων που τοποθετούνται στο δέρμα του κεφαλιού. Κατά την καταγραφή αυτής της ηλεκτρικής δραστηριότητας παρατηρούνται, διάφορες συχνότητες οι οποίες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το πότε εμφανίζονται. Είναι δηλαδή, εντοπισμένα σε συγκεκριμένο χρόνο και έχουν συγκεκριμένη συχνότητα. Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσονται τα κύρια χαρακτηριστικά του Ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος (ΗΕΓ), δίνονται οι ορισμοί τους και ο τρόπος μέτρησης και ανάλυσης τους.

### 2.2. Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα

#### 2.2.1. Λειτουργία του Ηλεκτροεγκεφαλογράφου

Η λειτουργία του ηλεκτροεγκεφαλογράφου στηρίζεται στην καταγραφή των διαφορών δυναμικού, οι οποίες παρουσιάζονται πάνω στην εξωτερική δερματική επιφάνεια του ανθρώπινου κρανίου. Το αποτέλεσμα της καταγραφής είναι γνωστό ως εγκεφαλογράφημα (ΗΕΓ) και αναπαριστά, ένα ηλεκτρικό σήμα που είναι το αποτέλεσμα της ηλεκτρικής δραστηριότητας ενός μεγάλου αριθμού νευρώνων. Η μέτρηση αυτών των δυναμικών είναι δυνατή, επειδή ο εγκεφαλικός ιστός, οι μήνιγγες, το κρανίο και το δέρμα άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Τα μετρούμενα ηλεκτρικά σήματα είναι ασθενή από περίπου 1μV ως 100μV (σχήμα 2-1). Εξαρχής λοιπόν, υπάρχει η απαίτηση της όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ενίσχυσης των υπό εξέταση σημάτων, και μόνο αυτών, καθώς και της πυκνότερης κάλυψης του κεφαλιού με απαγωγά ηλεκτρόδια. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αναμένεται ότι θα έχουμε μια ουσιαστική απεικόνιση - αντανάκλαση της εγκεφαλικής δραστηριότητας που θέλουμε να μελετήσουμε.



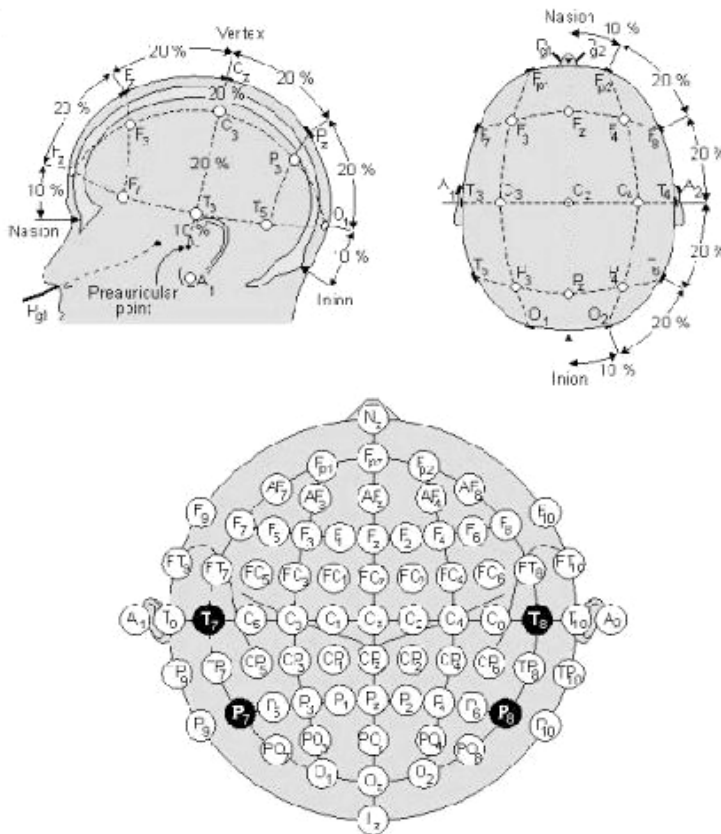
Σχήμα 2-1Καταγραφή ΗΕΓ

Το πρώτο στάδιο στην εξαγωγή των σημάτων του ΗΕΓ αποτελούν τα ηλεκτρόδια, οι αισθητήρες του συστήματος, οι οποίοι μετατρέπουν το ρεύμα ιόντων μέσα στο ανθρώπινο σώμα σε ρεύμα ηλεκτρονίων μέσα στα καλώδια. Η επαφή τους με το δέρμα γίνεται μέσω μιας κολλώδους ουσίας ή μέσω ενός μικρού δακτυλιδιού, που από τη μια μεριά προσκολλάται στο δέρμα και από την άλλη στο κυρίως ηλεκτρόδιο. Στα σημεία στα οποία θα



τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια, το δέρμα πρέπει να καθαριστεί καλά με οινόπνευμα για να επιτύχουμε χαμηλή αντίσταση επαφής, κάτω των  $5k\Omega$ . Το ηλεκτρόδιο έρχεται σε απ' ευθείας επαφή με τον υποκείμενο ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται. Έτσι είναι δυνατή η κίνηση ιόντων μέσω του συνόρου ηλεκτροδίου - ηλεκτρολύτη μέχρι να επέλθει ισορροπία. Η ισορροπία αυτή είναι συνάρτηση της ιοντικής συγκέντρωσης που υπάρχει στις δύο πλευρές του συνόρου. Δημιουργούνται τελικά δύο φορτισμένα στρώματα στις δύο πλευρές του συνόρου, ένα στη μεταλλική επιφάνεια και ένα πάνω στις υγρές ουσίες γύρω από το ηλεκτρόδιο, εμφανίζοντας έτσι μια διαφορά δυναμικού η οποία εμποδίζει τη συνέχιση της κίνησης των ιόντων, αλλά είναι ταυτοχρόνως ευαίσθητη στις μεταβολές των συγκεντρώσεων των ιόντων. Όταν μέσα στον εγκέφαλο υπάρξει σήμα, δηλ. ροή ιόντων, αυτό θα προκαλέσει μεταβολή της ιοντικής συγκέντρωσης και αυτόματα μεταβολή της διαφοράς δυναμικού των στρωμάτων, άρα και ροή ηλεκτρονίων από την πλευρά του αγωγίμου ηλεκτροδίου. Είναι επιθυμητό η τάση στο σύνορο να επηρεάζεται μόνο από ιοντικά ρεύματα του ανθρώπινου κεφαλιού και όχι από θερμοκρασιακές μεταβολές ή μηχανικές μετακινήσεις των ηλεκτροδίων. Αυτό επιτυγχάνεται όταν προσδίδουμε μεγαλύτερη ευχέρεια κινήσεων στα ιόντα της συνοριακής περιοχής. Την απαίτηση αυτή ικανοποιούν ηλεκτρόδια αποτελούμενα από το συνδυασμό ενός μετάλλου με το αντίστοιχο άλας του. Ένα από τα συνηθέστερα ηλεκτρόδια είναι αυτό που κατασκευάζεται από άργυρο (Ag) και χλωριούχο άργυρο (AgCl) και χρησιμοποιείται με ηλεκτρολύτη που περιέχει κυρίως ανιόντα χλωρίου ( $Cl^-$ ).

Για την επιλογή των θέσεων του κάθε ηλεκτροδίου πάνω στο κεφάλι έχουν δημιουργηθεί διάφορα πρότυπα, το δημοφιλέστερο εκ των οποίων είναι το Διεθνές Σύστημα 10-20. Η ονομασία του συστήματος οφείλεται στην επιλογή του 20% της αποστάσεως μεταξύ των δύο αυτιών ως την απόσταση ανάμεσα σε δύο οποιαδήποτε ηλεκτρόδια (Σχήμα 2-2 (άνω αριστερά)) και επίσης στην επιλογή του 10% της αποστάσεως μεταξύ των δύο αυτιών ως την απόσταση από το αυτί στο κοντινότερο προς αυτό ηλεκτρόδιο του (Σχήμα 2-2 (άνω δεξιά)). Κατ' αυτόν τον τρόπο οι θέσεις των ηλεκτροδίων προσαρμόζονται ανάλογα με τις διαστάσεις του κρανίου του εξεταζόμενου.



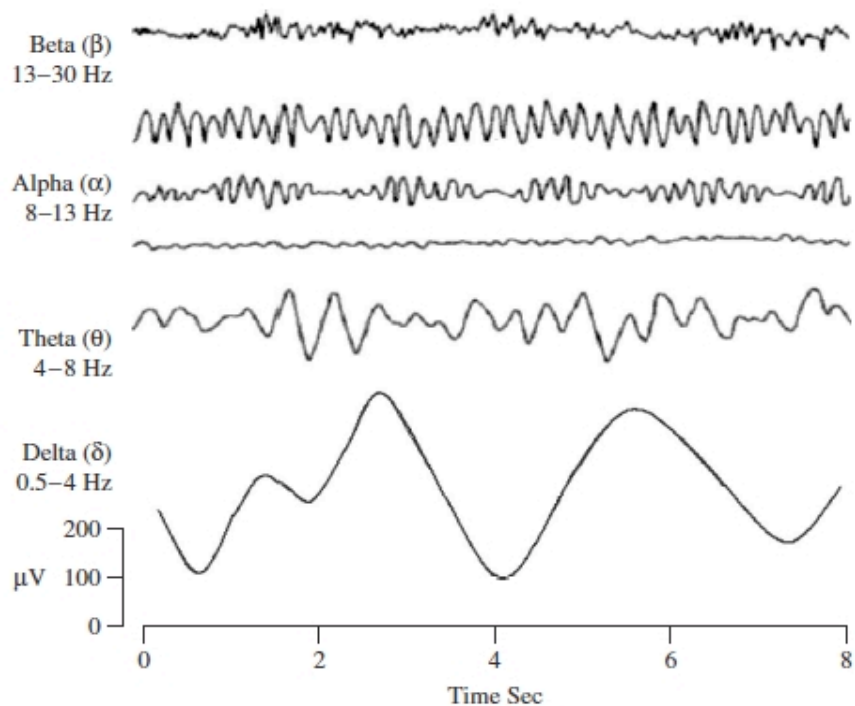
**Σχήμα 2-2 Διεθνές Σύστημα 10-20. Τυποποιημένες απαγωγές στην επιφάνεια του κεφαλιού σύμφωνα με το Διεθνές Σύστημα της Ηλεκτροεγκεφαλογραφίας 10-20**

Το κάθε σήμα το οποίο ενισχύεται στον ηλεκτροεγκεφαλογράφο είναι η διαφορά μεταξύ των δυναμικών που ανά πάσα στιγμή παρουσιάζουν δύο ηλεκτρόδια μεταξύ τους. Ηλεκτρόδια τα οποία βρίσκονται «πάνω» από εγκεφαλικές περιοχές, οι οποίες ενδεχομένως θα παρουσιάσουν δραστηριότητα, λέγεται ότι αντιστοιχούν σε ενεργά σημεία (σχήμα 2-2 (κάτω)). Τέτοια σημεία π.χ. είναι το αυτί ή τα ενωμένα με αγώγιμο δρόμο δύο αυτιά, σημεία του λαιμού κ.ά. Όταν το μετρούμενο σήμα προκύπτει ως διαφορά δυναμικού δύο ηλεκτροδίων ενεργών περιοχών, τότε, σύμφωνα με την ορολογία του ΗΕΓ, έχουμε «διπολική» μέτρηση. Διπολικές μετρήσεις για 15 ως 30 ηλεκτρόδια είναι η κοινή μεθοδολογία σε κλινικές νευρολογικές εξετάσεις ΗΕΓ. Αυτή η μέθοδος προσφέρει το πλεονέκτημα ότι απορρίπτει τυχόν παράσιτα τα οποία είναι κοινά στα δύο ηλεκτρόδια. Στην περίπτωση της ψυχοφυσιολογικής έρευνας όμως, συνήθως το μετρούμενο σήμα προκύπτει ως διαφορά δυναμικού ενός ηλεκτροδίου ενεργής περιοχής και ενός ηλεκτροδίου ανενεργής περιοχής, οπότε έχουμε «μονοπολική» μέτρηση. Το ηλεκτρόδιο ανενεργής περιοχής είναι κοινό για όλες τις μετρήσεις και αποτελεί το σημείο αναφοράς, το οποίο κανονικά δεν θα πρέπει να επηρεάζεται από εγκεφαλικά ρεύματα. Επιζητείται κατ' αυτόν τον τρόπο να υπάρχει μια ολοκληρωμένη και ταυτόχρονη, από όλα τα ηλεκτρόδια ενεργών περιοχών, πληροφόρηση σχετικά με κάθε εγκεφαλικό ρεύμα ιόντων το οποίο φτάνει στην εξωτερική δερματική επιφάνεια του κεφαλιού.

Οι διαφορές δυναμικού που επιλέγουμε εντέλει να μετρήσουμε, οδηγούνται στο τμήμα της ενισχυτικής διάταξης του ΗΕΓ, η οποία περιέχει και διατάξεις φιλτραρίσματος. Εκεί κάθε σήμα ,που ανιχνεύεται, ενισχύεται ώστε να μπορεί να μετρηθεί με ευχέρεια. Συνηθίζεται οι συντελεστές ενίσχυσης να είναι της τάξης του  $10^5$ .

### 2.2.2. Χαρακτηριστικά του ηλεκτροεγκεφαλογράφηματος

Η μελέτη του ΗΕΓ βασίζεται στη διάκριση, στις καταγραφές δυναμικού ως συνάρτηση του χρόνου, της ύπαρξης ή μη συγκεκριμένων κυματομορφών των λεγόμενων ρυθμών(σχήμα 2-3), κύριο χαρακτηριστικό των οποίων είναι οι συχνότητες των αρμονικών από τις οποίες αποτελούνται, δηλ. το φασματικό τους περιεχόμενο [4].



Σχήμα 2-3 .Οι βασικοί ρυθμοί (συχνοτικές συνιστώσες) του EEG σήματος

- Ο ρυθμός δέλτα ορίζει όλες τις συχνότητες κάτω από το φάσμα των άλφα συχνοτήτων, δηλαδή σε ένα εύρος από 0,5 έως 4 Hz. Αυτά τα κύματα κατά κύριο λόγο συνδέονται με βαθύ ύπνο και μπορεί να υπάρχουν και σε κατάσταση εγρήγορσης.
- Ο θήτα ρυθμός ( 4 - 7,5 Hz). Ο όρος θήτα μπορεί να έχει επιλεχθεί για να δείξει ότι η προέλευσή του είναι ο θάλαμος του εγκεφάλου. Εμφανίζεται ως ένδειξη ότι υπάρχει συνείδηση πριν την είσοδο στον ύπνο. Έχει συσχετισθεί με την πρόσβαση σε ασυνείδητο υλικό, δημιουργική έμπνευση και βαθύ διαλογισμό. Ένα κύμα θήτα συνοδεύεται συχνά από άλλες συχνότητες που σχετίζονται με το επίπεδο της έγερσης από τον ύπνο.

- Ο *άλφα* ρυθμός (8-13Hz) λαμβάνεται κυρίως από το οπίσθιο μισό του κεφαλιού και συνήθως από την ινιακή περιοχή του εγκεφάλου. Μπορούν να ανιχνευθούν σε όλα τα μέρη του οπίσθιων λοβών του εγκεφάλου. Σχετίζεται με χαλαρή αντίληψη χωρίς καμία προσοχή ή συγκέντρωση. Είναι ο πιο σημαντικός ρυθμός της εγκεφαλικής δραστηριότητας. Στα περισσότερα άτομα εμφανίζονται μερικά κύματα άλφα με τα μάτια τους κλειστά ως ένα μοτίβο αναμονής ή σάρωσης που παράγεται από τις οπτικές περιοχές του εγκεφάλου.
- Ο ρυθμός *βήτα* (13-30 Hz) είναι ο συνηθισμένος ρυθμός έγερσης του εγκεφάλου και σχετίζεται με την σκέψη, την ενεργό προσοχή, την επίλυση δύσκολων προβλημάτων. Ένα υψηλού επιπέδου κύμα βήτα μπορεί να ληφθεί όταν κάποιος βρίσκεται σε κατάσταση πανικού. Ρυθμική δραστηριότητα βήτα λαμβάνεται κυρίως από την μετωπική και κεντρική περιοχή του εγκεφάλου.
- Οι συχνότητες άνω των 30 Hz (κυρίως έως 45 Hz) αντιστοιχούν στο γάμα ρυθμό (μερικές φορές αποκαλείται γρήγορος ρυθμός βήτα). Αν και το πλάτος αυτού του ρυθμού είναι πολύ χαμηλό και η εμφάνισή του σπάνια, η ανίχνευση του μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιβεβαίωση ορισμένων νόσων του εγκεφάλου. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι είναι μια καλή ένδειξη συγχρονισμού του εγκεφάλου με προκλητά γεγονότα. Οι εκφορτίσεις μπορεί να έχουν πλάτος 0,5 - 1,5 mV και μέχρι αρκετά mV για αιχμές. Εντούτοις, στο τριχωτό της κεφαλής τα πλάτη των ρυθμών είναι συνήθως 10 -100  $\mu$ V [12].

## **2.3. Βιοματικά δυναμικά του εγκεφάλου**

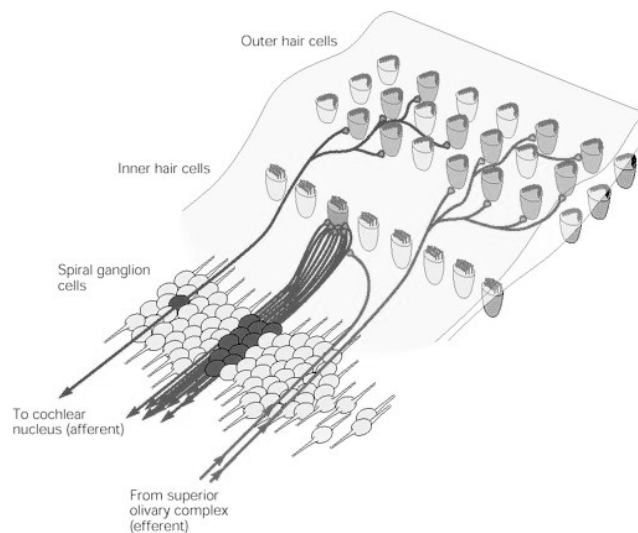
### **2.3.1. Ορισμοί και κατηγορίες των βιοματικών δυναμικών**

Τα τελευταία είκοσι έτη παρουσιάζεται αυξημένο ενδιαφέρον για τη μελέτη των εγκεφαλικών διαδικασιών οι οποίες προκαλούνται από συγκεκριμένα γεγονότα. Βιοματικά Δυναμικά - ΒΔ (Event Related Potentials - ERP), ονομάζονται οι διαφορές δυναμικού που μετρούνται, συνήθως στη δερματική επιφάνεια του κεφαλιού, οι οποίες προκαλούνται ως προετοιμασία ή ως απόκριση σε συγκεκριμένο γεγονός, το οποίο συμβαίνει είτε στον εξωτερικό φυσικό κόσμο, είτε λαμβάνει χώρα ως ψυχολογική διαδικασία. Τα διακρίνουμε σε Προκλητά Δυναμικά - ΠΔ (Evoked Potentials - EP), όταν το ερέθισμα ή το γεγονός, προέρχεται απ' τον εξωτερικό κόσμο, και σε Εκπεμπόμενα Δυναμικά (Emitted Potentials) όταν σχετίζονται με μία ψυχολογική διαδικασία.

Εφόσον τα ΠΔ αντικατοπτρίζουν εγκεφαλική δραστηριότητα σχετιζόμενη με ένα εξωτερικό ερέθισμα, είναι αυτά τα οποία μπορούμε να μελετήσουμε μέσω προδιαγεγραμμένων πειραματικών διαδικασιών στο εργαστήριο. Υπάρχουν τρεις κυρίως κατηγορίες ΠΔ ανάλογα με το είδος του εξωτερικού ερεθίσματος που τα προκαλεί:

- 1) **Οπτικά προκλητά δυναμικά (Visual Evoked Potentials - VEP):** Προκαλούνται από οπτικό ερεθισμό, όπως εμφάνιση μιας συγκεκριμένης εικόνας, αλλαγή χρωμάτων, λάμπεις κ.ά.
- 2) **Ακουστικά προκλητά δυναμικά (Auditory Evoked Potentials - AEP):** Προκαλούνται από ακουστικό ερεθισμό, δηλ. ήχους, λέξεις, τόνους διαφόρων συχνοτήτων και έντασης [4].

Η ακουστική ευαισθησία των αξόνων του κοχλιακού νεύρου δείχνει το μοτίβο νεύρωσης των κυττάρων του σπειροειδούς γαγγλίου (spiral ganglion cells) (Σχήμα 2-4). Κάθε άξονας αποκρίνεται περισσότερο σε ερεθίσματα αντίστοιχης συγκεκριμένης συχνότητας που λέγεται χαρακτηριστική συχνότητα του άξονα. Ερέθισμα υψηλότερης ή χαμηλότερης συχνότητας μπορεί να προκαλεί μια απόκριση μόνο όταν η ένταση είναι μεγαλύτερη. Η σχέση μεταξύ του επιπέδου της πίεσης του ήχου και του ρυθμού πυροδότησης σε κάθε ίνα του κοχλιακού νεύρου είναι σχεδόν γραμμική. Ωστόσο η πίεση του ήχου κωδικοποιείται λογαριθμικά από τη δραστηριότητα των νευρώνων. Πολύ δυνατοί ήχοι φθάνουν σε κορεσμό την απόκριση του νευρώνα. Επειδή το προκλητό δυναμικό και η ακόλουθη ανερέθιστη περίοδος διαρκούν περίπου 1ms, ο μεγαλύτερος ανεκτός ρυθμός πυροδότησης είναι περίπου 500 αιχμές/s. Ακόμα και μεταξύ νευρικών ινών με ίδια χαρακτηριστική συχνότητα το κατώφλι στην αποκριτικότητα ποικίλει από άξονα σε άξονα [1].



**Σχήμα 2-4. Νεύρωση του οργάνου του Corti**

Όταν εμφανίζεται ένα περιοδικό ερέθισμα όπως ένας απλός τόνος, ο ρυθμός πυροδότησης των ινών του όγδου κρανιακού νεύρου κωδικοποιεί την πληροφορία σχετικά με την περιοδικότητα του ερεθίσματος. Αν ακουστεί ένας τόνος σχετικά χαμηλής συχνότητας μέσης έντασης, μια από τις ίνες του κρανιακού νεύρου μπορεί να πυροδοτεί μια αιχμή σε κάθε κύκλο του ερεθίσματος.

Παρόλα αυτά η φάση της πυροδότησης είναι στερεότυπη. Για παράδειγμα ένα ακουστικό προκλητό δυναμικό μπορεί να συμβαίνει κατά την φάση που το ερέθισμα συμπιέζεται (τελειώνει). Καθώς η συχνότητα του ερεθίσματος μεγαλώνει, το ερέθισμα τελικά γίνεται πολύ γρήγορο για την αντίστοιχη νευρική ίνα του ακουστικού νεύρου και έτσι το προκλητό δυναμικό αυτού του ερεθίσματος, δεν μπορεί να ακολουθήσει το ερέθισμα σε αυτή την βάση (από κύκλο σε κύκλο). Πάνω από τα 4 KHz, παρά το ότι δεν υπάρχει κλειδώμα στην φάση, η ίνα μπορεί να πυροδοτεί μονό ανά κάποιους κύκλους του ερεθίσματος. Ωστόσο η πυροδότηση της συνεχίζει να είναι κλειδωμένη στην φάση σε εκείνο τον κύκλο του ερεθίσματος. Η περιοδικότητα της νευρωνικής πυροδότησης ενισχύει την μετάδοση της πληροφορίας σχετικά με την συχνότητα του ερεθίσματος.

Έτσι το ΚΝΣ μπορεί να λαμβάνει πληροφορίες για την συχνότητα του ερεθίσματος με δύο τρόπους. Ο ένας είναι με τον κωδικό θέσης: οι ακουστικές ίνες χαρτογραφούνται σε ένα «τονικό» πίνακα, έτσι ώστε η θέση τους στον πίνακα να σχετίζεται με την χαρακτηριστική τους συχνότητα. Και ο άλλος με τον κώδικα συχνότητας. Οι ίνες πυροδοτούν και προκαλούν ένα αντίστοιχο δυναμικό με ρυθμούς που αντανακλούν στην συχνότητα του ερεθίσματος [1].

### 3) Σωματοαισθητικά προκλητά δυναμικά (Somatosensory Evoked Potentials -

**SEP):** Προκαλούνται όταν ένα μικρής διάρκειας και έντασης ηλεκτρικό ρεύμα ερεθίσει κάποιο συγκεκριμένο νεύρο.

Τα ΠΔ μπορούν επίσης να χαρακτηριστούν σε σχέση με το χρόνο εμφάνισής τους μετά από το εκλυτικό γεγονός (λανθάνων χρόνος). Στην περίπτωση των ακουστικών προκλητών δυναμικών υπάρχει π.χ. η διάκριση σε πρώιμα (early, fast), μέσα (middle) και αργά ή ύστερα (late) δυναμικά, που αντιστοιχούν περίπου στα χρονικά διαστήματα 2 ως 12 msec, 12 ως 50msec και 50 ως 800msec από τη στιγμή που χορηγείται ο εξωτερικός ερεθισμός. Αξίζει να παρατηρήσουμε, ότι αυξανόμενου του λανθάνοντος χρόνου μειώνεται η συχνότητα των κυματομορφών και αυξάνεται το πλάτος τους. Προσεγγιστικά μπορούμε να πούμε, ότι στα πρώιμα δυναμικά έχουμε πλάτος της τάξης του 0,1 ως 0,5μV και συχνότητας 100 ως 1000Hz, ενώ στα ύστερα δυναμικά παρατηρούνται συχνότητες 0,1Hz (σχεδόν DC) ως 5Hz και πλάτος από 1 ως 20μV. Τα χαρακτηριστικά αυτά οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στον τόπο έκλυσης των αντίστοιχων δυναμικών. Τα πρώιμα σχετίζονται με τη διαβίβαση των νευρωνικών ώσεων κατά μήκος του ακουστικού ή οπτικού νεύρου για ακουστικά ή οπτικά προκλητά δυναμικά και κατά μήκος της σωματοαισθητικής οδού για τα σωματοαισθητικά. Αντίθετα, τα ύστερα δυναμικά αντανακλούν την εγκεφαλική δραστηριότητα περιοχών του φλοιού ως αντίδραση στην άφιξη της εξωτερικής πληροφορίας.

Επιπλέον, μπορούμε να χωρίσουμε τα ΠΔ σε ενδογενή και εξωγενή. Τα εξωγενή σχετίζονται άμεσα με τη φύση του εκλυτικού ερεθίσματος δηλ. την ένταση, τη συχνότητά

του κ.τ.λ. και την ακεραιότητα των αισθητικών οδών. Τα ενδογενή ΠΔ εξαρτώνται ουσιαστικά από την ψυχολογική κατάσταση του ατόμου και τα ψυχολογικά γνωρίσματα του απλού ή σύμπλοκου ερεθίσματος, π.χ. αν το ερέθισμα είναι γνωστό ή άγνωστο, αν προκαλεί δυσφορία ή ευχαρίστηση, αν είναι σημασιολογικά ορθό ή λάθος, ενδιαφέρον ή αδιάφορο. Ο λανθάνων χρόνος εμφάνισής τους σε σχέση με το εκλυτικό ερέθισμα βρίσκεται συνήθως ανάμεσα στα 100 και 500msec. Πρέπει να τονιστεί ότι πέραν της διάκρισης, ανάλογα με το είδος του ερεθίσματος, οι υπόλοιπες διακρίσεις των προκλητών δυναμικών δεν είναι απόλυτα σαφείς και μεταβάλλονται καθώς προχωρά η ιατρική έρευνα.

### **2.3.2. Έρευνα βιοματικών δυναμικών στην ψυχιατρική και τη νευρολογία**

Η μελέτη των κυματομορφών των ΒΔ διεξάγεται στηριζόμενη κυρίως στα λεγόμενα συστατικά (components) του βιοματικού κύματος δυναμικού. Τα συστατικά είναι μερικές κυματομορφές του συνολικού σήματος, τμήματά του, τα οποία καθορίζονται βάσει κορυφώσεων (αρνητικών ή θετικών) του πλάτους του δυναμικού, της χρονικής στιγμής στην οποία κατά προσέγγιση λαμβάνει χώρα η κορύφωση, καθώς και του χρονικού εύρους το οποίο καταλαμβάνει η μερική κυματομορφή που περιέχει τη συγκεκριμένη κορύφωση. Το πλάτος του συστατικού συνήθως μετράται με αναφορά την ισοηλεκτρική γραμμή (=0Volts) ή το επίπεδο δυναμικού στην έναρξη της διαδικασίας μέτρησης ή κάποια άλλη προγενέστερη κορύφωση. Οι χρόνοι ως συνήθως, εκφράζονται με απαρχή τη χρονική στιγμή που λαμβάνει χώρα το εκλυτικό γεγονός του συνολικού ΒΔ.

Στην περίπτωση των ακουστικών προκλητών δυναμικών έχουν χαρακτηριστεί οι μερικές κυματομορφές ως εξής:

- Για τα πρώιμα δυναμικά, 2-12msec από τη στιγμή που λαμβάνει χώρα το ακουστικό ερέθισμα, επτά διαδοχικές κορυφώσεις αριθμούμενες από το I ως το VII.
- Για τα μέσου χρόνου δυναμικά (12-50msec) υπάρχουν τα συστατικά  $N_o$ ,  $P_o$ ,  $N_a$ ,  $P_a$ ,  $N_b$ . Οι κορυφώσεις  $N_o$ ,  $P_o$  λαμβάνουν χώρα πριν τα 20 msec, οι δε  $N_a$ ,  $P_a$ ,  $N_b$  περίπου στα 20, 30 και 40 msec αντίστοιχα.
- Για τα ύστερα δυναμικά (50 msec και πέρα) αναφέρονται τα συστατικά  $P_{50}$ ,  $N_{100}$ ,  $P_{200}$ ,  $N_{200}$ ,  $P_{300}$ ,  $N_{400}$ , όπου  $N$  ή  $P$  σημαίνει αρνητική ή θετική κορύφωση και ο δείκτης αναφέρεται στον λανθάνοντα χρόνο εμφάνισης, κατά προσέγγιση του μεγίστου, σε msec. Τα συστατικά που εμφανίζονται πριν από τα 100 msec, συνήθως ανήκουν στα εξωγενή δυναμικά, για κάθε είδους ερεθισμό που εκλύει το ΠΔ. Όπως προαναφέρθηκε, σχετίζονται με την ακεραιότητα των αισθητικών οδών και γι' αυτό έχουν μεγάλο ενδιαφέρον και κλινικές εφαρμογές στη Νευρολογία. Χρησιμεύουν στη διάγνωση νευρολογικών νόσων, π.χ. απομυελινικές ασθένειες, εγκεφαλικοί όγκοι, ειδικότερα, τα ακουστικά δυναμικά σε ασθένειες σχετιζόμενες με τον οπίσθιο κρανιακό βόθρο και τα οπτικά ΠΔ μονίμου καταστάσεως στη σκλήρυνση κατά

πλάκας. Επίσης, τα ακουστικά ΠΔ επιτρέπουν τη μη επεμβατική διάγνωση ελαττωμάτων ακοής από μη συνεργάσιμα άτομα.

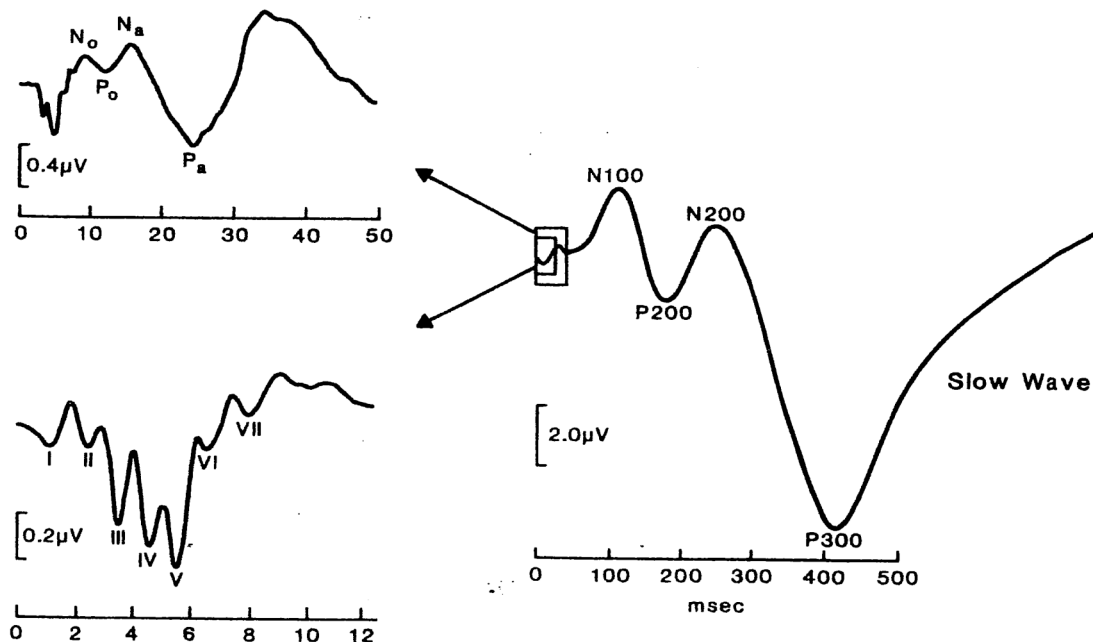
Τα ενδογενή ΠΔ συμπίπτουν εν πολλοίς με τα πέραν των 70 msec μετρούμενα δυναμικά. Αυτά τα δυναμικά έχουν άμεση σχέση με τα διάφορα στάδια νοητικής επεξεργασίας των εξωτερικών ερεθισμάτων στο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα (ΚΝΣ). Η εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών είναι μια μακρόχρονη και επίπονη διαδικασία. Κατ' αρχήν πρέπει να «ανακαλυφθεί» το συστατικό. Αυτό σημαίνει να παρατηρηθεί, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, μέσω μιας καλά ελεγχόμενης πειραματικής διαδικασίας χορήγησης του ερεθισμού, η κορύφωση στη συνολική κυματομορφή. Πρέπει να έχει κάποιο περιορισμένο εύρος χρονικό, και το κυριότερο να είναι επαναλήψιμη η παρατήρηση της υπό αμετάβλητες συνθήκες. Για τα περισσότερα ενδογενή συστατικά των ΠΔ αυτή η ανακάλυψη συνέβη στις δεκαετίες του 1960 και του 1970, αλλά συνεχίζεται ακόμη. Ήδη σ' αυτό το πρώτο στάδιο ανακύπτουν βασικά ζητήματα μεθοδολογίας:

- Πώς είμαστε βέβαιοι ότι δύο κορυφώσεις, που διαφέρουν χρονικά μεταξύ τους, ανήκουν στο ίδιο συστατικό, ακόμη και υπό διαφορετικές συνθήκες ερεθισμού; Σε αυτή την περίπτωση η εποπτεία που παρέχουν χάρτες κατανομής των δυναμικών στην επιφάνεια του κεφαλιού μπορεί να βοηθήσει στη διαδικασία της κατηγοριοποίησης.
- Πότε παύει η δράση ενός συστατικού, ή αλλιώς, πότε αλληλοκαλύπτονται μερικώς δύο διαδοχικά συστατικά; Επιπλέον, η χρήση προχωρημένων ψηφιακών τεχνικών μέτρησης επιτρέπει τη λεπτομερέστερη μελέτη τους, με αποτέλεσμα πολλές φορές συστατικά να χωρίζονται σε «υποσυστατικά» κ.ο.κ.

Εφόσον καθοριστεί η ύπαρξη ενός συστατικού, ακολουθεί η χρήση πειραματικών διαδικασιών για τον καθορισμό της λειτουργικής σημασίας του συστατικού. Συλλέγεται πλήθος πληροφοριών για παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το πλάτος, το χρόνο εμφάνισης, το συνολικό χρονικό εύρος του συστατικού κ.λπ. Αυτοί οι παράγοντες είναι συνήθως χαρακτηριστικά του ερεθίσματος που χορηγείται στον εξεταζόμενο και εφόσον ασχολούμαστε με ενδογενή συστατικά, αυτά αφορούν κατά κύριο λόγο ψυχολογικά γνωρίσματα του ερεθίσματος, όπως σπανιότητα, σημαντικότητα, νοηματική πολυπλοκότητα, σχέση με προκαθορισμένες εργασίες και στόχους κ.ά. Καθώς οι πληροφορίες αυτού του είδους αυξάνονται, μπορεί να προχωρήσει ο ερευνητής στη διαμόρφωση μιας θεωρίας για την εξήγηση των νοητικών λειτουργιών, τις οποίες το συστατικό του ΠΔ, ή μία ομάδα συστατικών αντικατοπτρίζει. Η διατυπωμένη θεώρηση ελέγχεται κατόπιν ως προς τη συνέπειά της σε σχέση με νέες πειραματικές διαδικασίες, που καλούνται να επιβεβαιώσουν ή να απορρίψουν προβλέψεις, οι οποίες στηρίζονται στη θεωρία για τα χαρακτηριστικά του συστατικού.



Σε αυτή την κατεύθυνση γίνεται προσπάθεια να μελετηθούν οι διαφορές που παρουσιάζουν άρρωστοι σε σχέση με υγιείς, όσον αφορά χαρακτηριστικά συστατικών των ΠΔ, όπως π.χ. πλάτος του  $N_{100}$  και του  $P_{300}$ , καθυστέρηση του  $P_{300}$ , μεταβολή των χρονικών διαστημάτων ανάμεσα στις κορυφώσεις των  $N_{100}$  και  $P_{200}$  κ.α. [4]. Παρακάτω παρουσιάζονται εκτιμήσεις για τα χαρακτηριστικά των κορυφώσεων της χρονοσειράς των προκλητών δυναμικών, όπως εκείνα έχουν καθιερωθεί στη βιβλιογραφία (Σχήμα 2-11).



Σχήμα 2-5. Καταγραφή Προκλητών Δυναμικών.

- **P50:** Περιγράφει τη θετική κορυφή του μετρούμενου δυναμικού που εντοπίζεται στο χρονικό παράθυρο από 20 ως 80 msec μετά το ερέθισμα. Θεωρείται δείκτης πρώιμων πτυχών προσοχής (σχήμα 2-11 (άνω αριστερά)).
- **N100:** Πρόκειται για την αρνητική κορυφή του μετρούμενου δυναμικού που εντοπίζεται στο χρονικό παράθυρο 70 ως 140 msec, μετά την παροχή του εκλυτικού ερεθίσματος. Έχει συνδεθεί με την λειτουργία της προσοχής και της επιλογής πληροφοριών. Παράγεται στο ειδικό θαλαμικό φλοιϊκό σύστημα και αντικατοπτρίζει την άμεση εγρήγορση του ειδικού αισθητικού συστήματος λόγω του ερεθίσματος (σχήμα 2-11(δεξιά)) [4].
- **N200:** Η κορυφή δείχνει να αντανakλά την ανίχνευση κάποιου τύπου αναντιστοιχίας στα χαρακτηριστικά του ερεθίσματος ή μεταξύ του ερεθίσματος και κάποιου προηγούμενου μοτίβου. Το μοτίβο αυτό του ερεθίσματος παράγεται εσωτερικά στην μνήμη και δεν σχετίζεται με προηγούμενη παρουσία του ερεθίσματος [2].
- **P300:** Περιγράφει την θετική κορυφή του μετρούμενου δυναμικού που εντοπίζεται στο χρονικό παράθυρο 240 ως 500msec μετά την παροχή του ερεθίσματος. Θεωρείται ότι αποτελείται από δυο υποστατικά: το P300a που εκφράζει την εκούσια αντίδραση

προσανατολισμού και το P300b, το οποίο εμφανίζεται στο χρονικό διάστημα 300 ως 500 msec και θεωρείται μέτρο των ελεγχόμενων, σκόπιμων, διαδικασιών επεξεργασίας ερεθισμάτων (σχήμα 2-11 (δεξιά)) [4].

- **N400:** Σχετίζεται με γνωστικές λειτουργίες (χρονικό παράθυρο 500-600 msec). Εκδηλώνει σημασιολογικές διαδικασίες, δηλαδή απόκριση σε παραβάσεις σημασιολογικές, οι λέξεις είναι σημασιολογικά λάθος αλλά συντακτικά σωστές ή άλλου τέτοιου τύπου αποκλίσεις ( π.χ δεν είναι δυνατή η αναγνώριση της μεταφοράς σε μια πρόταση).
- **P600: (ή θετική συντακτική μετατόπιση (SPS))** Εμφανίζεται όταν υπάρχουν συντακτικές ανωμαλίες (π.χ δεν αναγνωρίζεται η σύμβαση υποκειμένου-ρήματος) [2].

Τα προκλητά δυναμικά αντιπροσωπεύουν τη δραστηριότητα μεγάλων ομάδων των νευρώνων ή νευρωνικών συνόλων, που έχουν συγχρονιστεί αρκετά με τα ερεθίσματα. Έχουν συνήθως χαμηλό πλάτος σε σύγκριση με το ΗΕΓ που υπάρχει στο υπόβαθρο, και γι' αυτό αθροίζοντας κατά μέσο όρο τμήματα ΗΕΓ γραφήματος που είναι "κλειδωμένα" χρονικά στο ερέθισμα, μπορούμε να απεικονίσουμε την απόκριση στο προκλητό δυναμικό. Στην πραγματικότητα, ένα βασικό χαρακτηριστικό των προκλητών δυναμικών είναι ότι διαφέρουν μεταξύ των δοκιμών. Οι πληροφορίες αυτές των προκλητών δυναμικών χάνονται όταν υπολογίζεται η μέση τιμή τους [6].

### **2.3.3. Προκλητά δυναμικά μεμονωμένης δοκιμής**

Η έρευνα των προκλητών δυναμικών βασίζεται στην αναγνώριση των διαφορετικών κυμάτων, προσθέτοντας κατά μέσο όρο τα μοτίβα πολλών εμφανίσεων του ίδιου ερεθίσματος. Από το μέσο όρο των αποκρίσεων είναι δυνατόν να εντοπιστούν τα συστατικά των προκλητών δυναμικών, των οποίων το πλάτος, οι λανθάνοντες χρόνοι και τοποθέτηση στον χρόνο σχετίζονται με διαφορετικές αισθητηριακές και γνωσιακές λειτουργίες, τόσο στους υγιείς όσο και σε άτομα με εγκεφαλικές διαταραχές. Αθροίζοντας κατά μέσο όρο τις επιμέρους εγκεφαλικές αντιδράσεις βελτιώνεται ο σηματοθορυβικός λόγος. Ωστόσο έχουν γίνει δυο βασικές παραδοχές:

- 1) ότι τα προκλητά δυναμικά ακολουθούν ένα αναλλοίωτο μοτίβο που είναι απολύτως κλειδωμένο στο ερέθισμα
- 2) και ότι στο υπόβαθρο υπάρχει ένα ανεξάρτητο στατικό και στοχαστικά εργοδικό σήμα ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος.

Αυτές οι υποθέσεις υπό την στενή έννοια του όρου δεν είναι έγκυρες. Ειδικότερα, έχει αποδειχθεί ότι το φασματικό περιεχόμενο του ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος του υποβάθρου κατά τη στιγμή της διέγερσης, επηρεάζει ισχυρά την κυματομορφή του προκλητού δυναμικού. Επίσης, ο υπολογισμός κατά μέσο όρο συνεπάγεται απώλεια

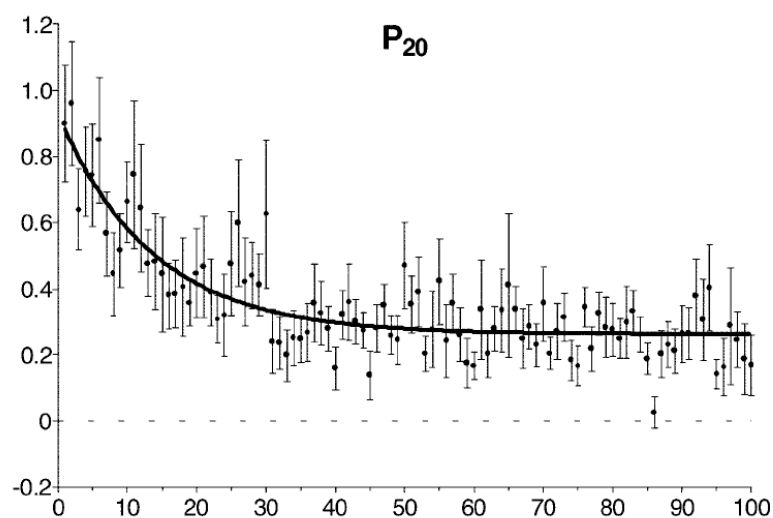
πληροφοριών που σχετίζονται με τις συστηματικές ή μη συστηματικές παραλλαγές μεταξύ των μεμονωμένων δοκιμών. Οι αποκλίσεις αυτές ενδέχεται να επηρεάσουν την αξιοπιστία του μέσου όρου του προκλητού δυναμικού, αν θεωρηθεί ότι αναπαριστά το προκλητό δυναμικό μεμονωμένης δοκιμής. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να είναι ζωτικής σημασίας για την μελέτη της χρονικής εξέλιξης των δυναμικών γνωσιακών διαδικασιών, τα απλά και σύνθετα μοντέλα συμπεριφοράς και των γνωσιακών δυσλειτουργιών σε παθολογικές καταστάσεις.

Από την μεριά της φυσιολογίας αναμένεται οι αποκρίσεις των νευρώνων μετά από αρκετές επαναλήψεις του ίδιου μοτίβου διέγερσης, να έχουν αλλάξει ή να αλλάξουν κατά τη διάρκεια εμφάνισης νέων εγκεφαλικών παραστάσεων, όπως συμβαίνει κατά τη διάρκεια των διαδικασιών μάθησης.

Οι τεχνικές ανάλυσης με μεμονωμένη δοκιμή είναι κατάλληλες για την εξέταση της χρονική εξέλιξης των αντιδράσεων των νευρώνων που συνδέονται με γνωσιακές πράξεις. Η παρακολούθηση των αποκρίσεων σε μεμονωμένες δοκιμές, επιτρέπει τη μελέτη των νευρωνικών φαινομένων που συνδέονται στενά με την εξοικείωση, τη μάθηση και τις διαδικασίες της μνήμης [11].

## 2.4. Χαρακτηριστικά Εξοικείωσης

Η εξοικείωση, με την ευρεία έννοια, ορίζεται ως μία απόκριση που ελαττώνεται ως συνάρτηση της επανάληψης του ερεθίσματος (σχήμα 2-6). Μπορεί να περιγραφεί καλύτερα από μια εκθετική μείωση, εάν ένα νέο ερέθισμα επαναλαμβάνεται τακτικά. Ο συντελεστής απόσβεσης της εκθετικής αυτής συνάρτησης θα εξαρτηθεί, από τις φυσικές ιδιότητες του ερεθίσματος, το μεσοδιάστημα μεταξύ δύο ερεθισμάτων, και την ψυχολογική επίδραση του ερεθίσματος.



Σχήμα 2-6 Οι μεταβολές του πλάτους του συστατικού  $P_{20}$  από 100 μεμονωμένες δοκιμές προκλητών ακουστικών δυναμικών σε αρουραίους. Η ελάττωση του πλάτους από δοκιμή σε δοκιμή σχετίζεται με μια μορφή εξοικείωσης [5].

Επίσης, οι αυξήσεις που παρατηρούνται στις αποκρίσεις κατά τη διάρκεια του πρώτου ερεθίσματος συνδέονται με μια διαδικασία ευαισθητοποίησης. Επιπλέον, η απόκριση σε επαναλαμβανόμενες διεγέρσεις προκύπτει από την αλληλεπίδραση της ευαισθητοποίησης και της εξοικείωσης [5].

Η εξοικείωση θεωρείται ότι αντανακλά μια στοιχειώδη διαδικασία μάθησης, αν δεν οφείλεται σε άλλους παράγοντες, όπως η κούραση, οι περίοδοι όπου δεν ανταποκρίνεται ο ασθενής ή βλάβη στο σύστημα των αισθήσεων. Μπορεί:

- 1) να είναι γρήγορη και μόνο προσωρινή (short term habituation STH ), η οποία παρατηρείται όταν το ερέθισμα εμφανίζεται με μικρές διακοπές μεταξύ των ερεθισμάτων.
- 2) να εξελιχθεί αργά (Long term Habituation LTH ) και συμβαίνει σε μεγαλύτερα μεσοδιαστήματα μεταξύ των ερεθισμάτων.

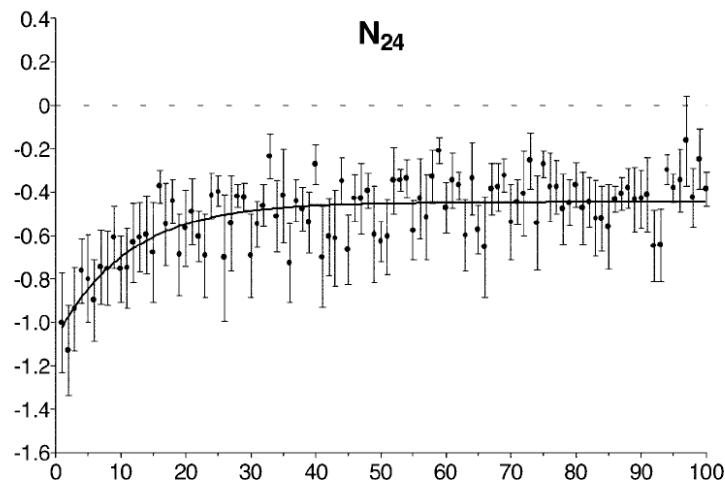
Απόδειξη ότι αυτή η ελαττωμένη απόκριση πραγματικά αντιπροσωπεύει στοιχειώδη διαδικασία μάθησης, προκύπτει από διαδικασίες απο-εξοικείωσης (dis-habituation). Σε αυτές τις διαδικασίες το ερέθισμα στο οποίο έχει εξοικειωθεί ο εξεταζόμενος, είτε είναι παρών όταν εφαρμόζεται νέο ερέθισμα ή έχει αλλάξει ελαφρώς ή το πλαίσιο (περιβάλλον) στο οποίο συμβαίνει το ερέθισμα έχει μεταβληθεί [6].

Η εφαρμογή ενός διαφορετικού ερεθίσματος (συνήθως μεγαλύτερης έντασης) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μειωμένης απόκρισης στο αρχικό ερέθισμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται απο-εξοικείωση (dishabituation). Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η εξοικείωση λειτουργεί στο να μειώσει την απόκριση σε αβλαβή ερεθίσματα, επιτρέποντας στον οργανισμό να αποκριθεί σε νέα ερεθίσματα (εξειδίκευση σε νέα ερεθίσματα) και από το γεγονός ότι η αυθόρμητη αποκατάσταση εξαρτάται από τη συχνότητα του ερεθίσματος (ταχύτερη αποκατάσταση μπορεί να επιτευχθεί μετά από διέγερση με ερέθισμα σε υψηλή συχνότητα από ό,τι από ερέθισμα σε χαμηλή συχνότητα)[14].

Η αυθόρμητη αποκατάσταση και η ενισχυμένη επανα-εξοικείωση (rehabilitation) είναι δύο επιπλέον φαινόμενα, που ενισχύουν την άποψη ότι η μακράς (LTH) και η σύντομης διάρκειας (STH) εξοικείωση, είναι όροι που επηρεάζουν την διαδικασία της μάθησης. Ειδικότερα αν εμφανίζονται πολλαπλές συνεδρίες (sessions) εξοικείωσης, η απόκριση αρχικά θα ανακτηθεί σε κάποιο βαθμό στην έναρξη της νέας συνεδρίας (αυθόρμητη αποκατάσταση) και ακολούθως θα υποστεί εξοικείωση σε μεγαλύτερο βαθμό και εντονότερα σε κάθε επόμενη συνεδρία ( ενισχυμένη επανα-εξοικείωση) [6].

Σε αντίθεση με την από-εξοικείωση, όπου εφαρμόζεται επανειλημμένα ένα ερέθισμα το οποίο αναγνωρίζεται ως αβλαβές, όταν το ερέθισμα αναγνωρίζεται ως επιβλαβές έχει παρατηρηθεί ότι η απόκριση είναι πιο δυναμική, όχι μόνο για το υπάρχον ερέθισμα, κάτι που

θεωρείται φυσιολογικό, αλλά και απέναντι σε ένα νέο ερέθισμα ακόμη και αν αυτό θεωρείται αβλαβές (σχήμα 2-7). Ένα επιβλαβές ερέθισμα ενισχύει την απελευθέρωση νευροδιαβιβαστών σε πολλές συνάψεις, συμπεριλαμβανομένων των συνάψεων που είναι σε ύφεση λόγω της εξοικείωσης. Αυτή η βελτίωση των αντανακλαστικών αποκρίσεων ονομάζεται ευαισθητοποίηση .



**Σχήμα 2-7** Οι μεταβολές του πλάτους του συστατικού N24 από 100 μεμονωμένες δοκιμές προκλητών ακουστικών δυναμικών σε αρουραίους. Η αύξηση του πλάτους από δοκιμή σε δοκιμή σχετίζεται με μια μορφή ευαισθητοποίησης [5].

Όπως η εξοικείωση έτσι και η ευαισθητοποίηση έχει και βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη μορφή [17]. Επίσης, όπως και στην εξοικείωση και εδώ ο όρος βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη ορίζεται βάσει των μεσοδιαστημάτων μεταξύ των ερεθισμάτων. Η βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση συνήθως εμφανίζεται σε μελέτες εξοικείωσης, ως μια αυξημένη απόκριση μετά από μερικά αρχικά ερεθίσματα και ακολουθεί μια μείωση της απόκρισης. Αν δεν παρατηρείται σε μελέτες εξοικείωσης τότε, είτε είναι αμελητέα η αύξηση σε σχέση με την μείωση, είτε δεν παρατηρείται σε κάθε μελέτη. Όπως και με την μακροπρόθεσμη εξοικείωση, η μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση θα μπορούσε να οριστεί με δύο τρόπους:

- είναι η μεταβολή της απόκρισης σε ένα ερέθισμα, η οποία εξακολουθεί να εμφανίζεται ακόμα και όταν το ερέθισμα είναι παρών για μεγαλύτερο διάστημα από το αρχικό διάστημα μεταξύ των ερεθισμάτων
- είναι η συντήρηση και αύξηση του χρόνου εμφάνισης της μεταβολής της απόκρισης, ως αποτέλεσμα μιας μακράς περιόδου προσαρμογής στο ερέθισμα [18].

## 2.5.Συμπέρασμα

Τα προκλητά δυναμικά μας δίνουν πληροφορίες για την δραστηριότητα του εγκεφάλου και σχετίζονται με γνωσιακές λειτουργίες και διαδικασίες επεξεργασίας των ερεθισμάτων. Είναι μη στατικά σήματα, τόσο όταν αθροίζονται κατά μέσο όρο, όσο και ως μεμονωμένες δοκιμές όπου εμφανίζουν συστηματικές ή μη συστηματικές παραλλαγές μεταξύ τους.

Τα κυματίδια είναι μαθηματικές συναρτήσεις που τεμαχίζουν τα δεδομένα του προκλητού δυναμικού σε διαφορετικά τμήματα, ανάλογα με την συχνότητα, και στη συνέχεια γίνεται η μελέτη κάθε συστατικού με ανάλυση που ταιριάζει στην κλίμακα του. Έχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους Fourier όταν αναλύουμε φυσικές καταστάσεις, όπου το σήμα περιέχει ασυνέχειες και απότομες αιχμές όπως στα προκλητά δυναμικά.

## 3. Κυματιδιακή ανάλυση

### 3.1. Εισαγωγή

Η φασματική ανάλυση των προκλητών δυναμικών αρχικά στηρίχτηκε στον μετασχηματισμό Fourier. Είναι γνωστό, ότι ο μετασχηματισμός Fourier αποσυνθέτει ένα σήμα με συναρτήσεις βάσης ημίτονο και συνημίτονο τα οποία έχουν άπειρη διάρκεια. Ωστόσο, δεν μπορεί να παρακολουθεί καλά τις παραλλαγές προκλητών δυναμικών που δεν είναι σταθερές, επειδή τα στοιχεία της συχνότητας του μετασχηματισμού Fourier ορίζονται για άπειρο χρόνο. Ο μετασχηματισμός Fourier μικρής διάρκειας (STFT) είναι ένα μέσο ανάλυσης εφαρμόζοντας παράθυρα που κινούνται πάνω στο σήμα και πραγματοποιώντας μετασχηματισμό Fourier σε κάθε ένα από αυτά. Το πρόβλημα με τον STFT είναι ότι τα σήματα με διαφορετικές φασματικές συνιστώσες, αντιμετωπίζονται με την ίδια διακριτική ικανότητα στη συχνότητα, δεδομένου ότι σταθερού μήκους παράθυρο (σταθερή ανάλυση χρόνου) επιλέγεται για ολόκληρη την ανάλυση. Πρέπει να επιλεγεί ένα κατάλληλο μήκος παραθύρου για δυο λόγους:

- Την εξισορρόπηση (ανταλλακτική ισορροπία (*trade off*)) μεταξύ της διακριτικής ικανότητας της συχνότητας και αυτής του χρόνου
- και ταυτόχρονα, να ικανοποιείται η υπόθεση ότι το σήμα είναι στατικό σε κάθε ένα από τα κινητά παράθυρα.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν μετασχηματισμό κυματιδίου, προσφέρουν νέες δυνατότητες και πλεονεκτήματα σε σχέση με τις τεχνικές που βασίζονται στο μετασχηματισμό Fourier. Ο μετασχηματισμός κυματιδίου είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την ανάλυση μη στατικών σημάτων, επειδή έχει καλύτερη διακριτική ικανότητα, τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Στην πραγματικότητα, ο μετασχηματισμός κυματιδίου έχει γίνει απαραίτητος και χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων των επικοινωνιών, επεξεργασία ομιλίας και ήχου, επεξεργασία εικόνας, στην γεωφυσική, την οικονομία, την ιατρική και τις νευροεπιστήμες. Ειδικότερα, τα νευροφυσιολογικά σήματα είναι μη-στατικά και ως εκ τούτου ο μετασχηματισμός κυματιδίου είναι πιο κατάλληλος από το μετασχηματισμό Fourier στην εξόρυξη πληροφοριών από τέτοια σήματα. Η μέθοδος εφαρμόζεται στον προσδιορισμό των προκλητών δυναμικών, με ένα ελεγχόμενο τρόπο που απαιτεί την γνώση εκ των προτέρων του διαστήματος του χρόνου και του εύρους της συχνότητας των προκλητών δυναμικών [8].

### 3.2. Ανάλυση Fourier

Η χρησιμότητα του μετασχηματισμού Fourier έγκειται στην ικανότητά του να αναλύει ένα σήμα στο πεδίο του χρόνου για το περιεχόμενο της συχνότητας. Ο μετασχηματισμός γίνεται μετασχηματίζοντας μία συνάρτηση που είναι στο πεδίο του χρόνου, σε μια συνάρτηση στο

πεδίο της συχνότητας. Το σήμα μπορεί στη συνέχεια να αναλυθεί για το περιεχόμενο της κάθε συχνότητας, επειδή οι συνιστώσες Fourier της συνάρτησης που έχει μετατραπεί αναπαριστούν τη συνεισφορά της κάθε συνάρτησης ημίτονου και συνημίτονου σε κάθε συχνότητα.

### 3.2.1. *Windowed μετασχηματισμός Fourier (WFT) ή μετασχηματισμός Fourier μικρής διάρκειας (STFT)*

Εάν η  $f(t)$  είναι ένα μη περιοδικό σήμα, το άθροισμα των περιοδικών συναρτήσεων, ημίτονου και συνημίτονου, δεν αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια το σήμα. Είναι δυνατόν να επεκταθεί τεχνητά το σήμα, για να καταστεί περιοδικό αλλά θα απαιτούσαν επιπρόσθετα να υπάρχει η συνέχεια και στα άκρα του σήματος. Ο μετασχηματισμός Fourier (WFT/STFT) σε ένα "παράθυρο" του σήματος είναι μία λύση στο πρόβλημα της καλύτερης αναπαράστασης μη περιοδικών σημάτων. Ο WFT (STFT) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει πληροφορίες σχετικά με σήματα ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας.

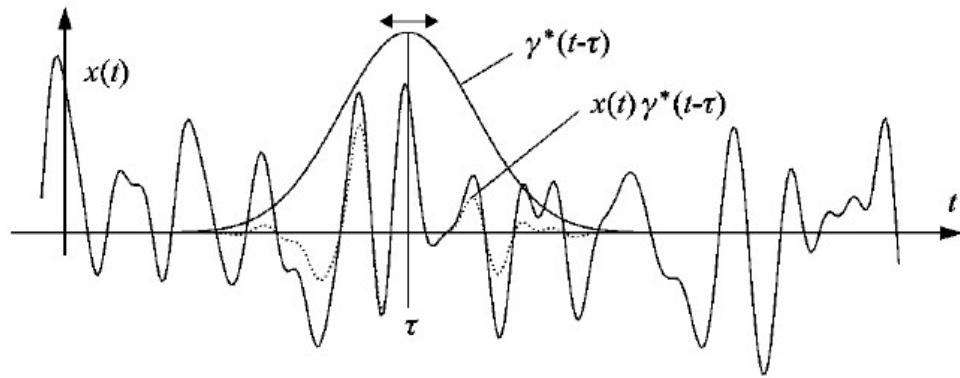
Με τον WFT(STFT), το σήμα εισόδου  $f(t)$  είναι τεμαχισμένο σε ενότητες και κάθε ενότητα αναλύεται για το περιεχόμενο της συχνότητας ξεχωριστά. Αν το σήμα έχει απότομες μεταβάσεις, εμείς χρησιμοποιούμε ένα παράθυρο εισαγωγής δεδομένων, ώστε τα τμήματα να συγκλίνουν στο μηδέν στα άκρα. Αυτή η παραθυροποίηση (windowing) επιτυγχάνεται μέσω μια συνάρτησής βάρους, που δίνει λιγότερη έμφαση κοντά στα τελικά χρονικά σημεία από ότι στη μέση. Το αποτέλεσμα της χρήσης παράθυρου είναι ο χρονικός εντοπισμός του σήματος [7].

Ο STF μετασχηματισμός είναι μια κλασσική μέθοδος ανάλυσης στο πεδίο χρόνου - συχνότητας. Πολλαπλασιάζουμε το  $x(t)$ , το οποίο είναι προς ανάλυση, με ένα παράθυρο ανάλυσης  $\gamma^*(t-T)$  και στη συνέχεια υπολογίζουμε τον μετασχηματισμό Fourier για αυτό το σήμα μετά την εφαρμογή του παραθύρου.

$$F_x^\gamma(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \gamma^*(t - \tau) e^{-j\omega\tau} dt \quad (3.1)$$

Το παράθυρο ανάλυσης  $\gamma^*(t-T)$  καταπιέζει το σήμα που βρίσκεται εκτός της κυρίως περιοχής του παραθύρου και έτσι ο μετασχηματισμός αποδίδει τοπικά το φάσμα. Το σχήμα 3-1 παρουσιάζει μια εφαρμογή αυτού του παραθύρου. Τυπικά, κάποιος μπορεί να επιλέξει ένα παράθυρο πραγματικής τιμής, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως η κρουστική απόκριση ενός βαθυπερατού φίλτρου.





Σχήμα 3-1. Μετασχηματισμός fourier μικρής διάρκειας

Αν επιλέξουμε τη συνάρτηση Gauss για παράθυρο αναφερόμαστε στο μετασχηματισμό Gabor, επειδή αυτός παρουσίασε τον STF με αυτό το παράθυρο.

### 3.2.2. Ανακατασκευή

Η ανακατασκευή του σήματος  $x(t)$  από το  $F_x^y(t, \omega)$  είναι δυνατόν με την βοήθεια της σχέσης 3.2.

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_x^y(\tau, \omega) g(t - \tau) e^{j\omega t} dt d\omega \quad (3.2)$$

Εδώ το παράθυρο σύνθεσης  $g(t)$  πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη 3.3.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \gamma^*(t) g(t) dt = 1 \quad (3.3)$$

Μπορούμε να το επιβεβαιώσουμε αυτό αντικαθιστώντας τη σχέση 3.1 στην 3.2 και ξαναγράφοντας την έκφραση 3.2 παίρνουμε την 3.4.

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{2\pi} \iiint x(t') \gamma^*(t' - \tau) e^{-j\omega t'} dt' g(t - \tau) e^{j\omega t} dt d\omega \\ &= \int x(t') \int \gamma^*(t' - \tau) g(t - \tau) \frac{1}{2\pi} \int e^{-j\omega(t-t')} d\omega d\tau dt' \\ &= \int x(t') \int \gamma^*(t' - \tau) g(t - \tau) \delta(t - t') d\tau dt' \end{aligned} \quad (3.4)$$

Για να ικανοποιείται η σχέση 3.4 πρέπει να ικανοποιείται η σχέση 3.5 η οποία είναι αληθής αν ικανοποιείται η 3.3.

$$\delta(t - t') = \int \gamma^*(t' - \tau) g(t - \tau) \delta(t - t') d\tau \quad (3.5)$$

Ένας απεριόριστος αριθμός παραθύρων ικανοποιεί τη σχέση 3.3, επειδή ο περιορισμός που θέτει η 3.3 δεν είναι τόσο αυστηρός. Το μειονέκτημα της 3.2 είναι ότι πρέπει να είναι γνωστό το πλήρες φάσμα του STF και πρέπει να εμπλεχθεί στην ανακατασκευή του σήματος [10].

### 3.3. Συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου

Για να εφαρμόσουμε το μετασχηματισμό χρειαζόμαστε ένα κυματίδιο το οποίο, όπως λέει το όνομα του, είναι μια τοποθετημένη κυματομορφή. Στην πραγματικότητα, το κυματίδιο είναι μια συνάρτηση  $\psi(t)$  η οποία πληρεί βασικά μαθηματικά κριτήρια. Αυτές οι συναρτήσεις, μέσω μιας διαδικασίας μετατόπισης και διεύρυνσης, χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν το σήμα σε μια άλλη μορφή, η οποία το αναπτύσσει και στο πεδίο του χρόνου και στη συχνότητα.

Ο μετασχηματισμός κυματιδίου ενός συνεχούς σήματος ικανοποιώντας τα κριτήρια των συναρτήσεων κυματιδίου ορίζεται ως

$$T(\alpha, b) = w(\alpha) \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{\alpha} \right) dt \quad (3.6)$$

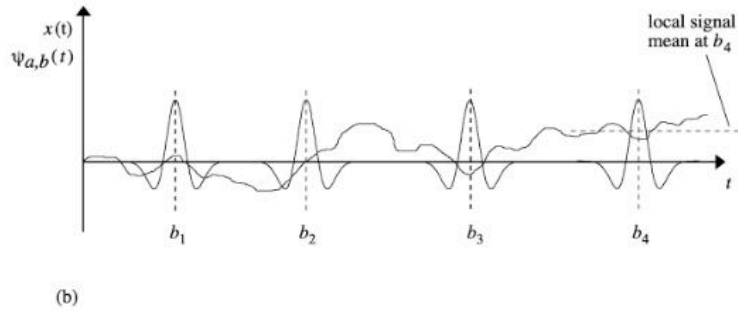
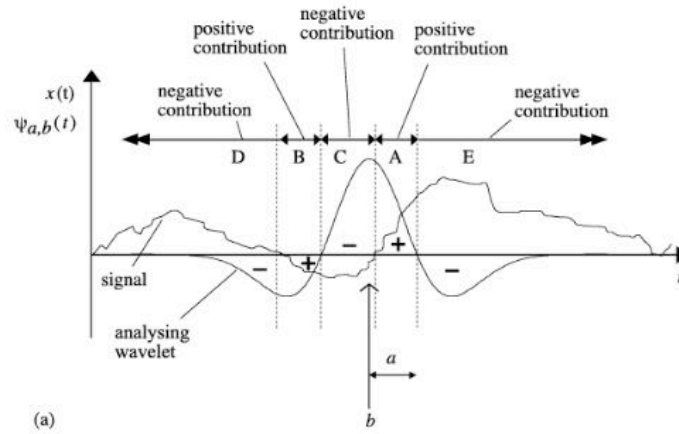
όπου η  $w(\alpha)$  είναι μια συνάρτηση βάρους. Ο αστερίσκος υποδεικνύει ότι στο μετασχηματισμό χρησιμοποιείται το μιγαδικό συμπλήρωμα της συνάρτησης κυματιδίου.

Στην ισότητα (3.6) το εσωτερικό γινόμενο του κυματιδίου με το σήμα ολοκληρώνεται στο πεδίο του σήματος. Σε μαθηματικούς όρους αυτό ονομάζεται συνέλιξη. Η κανονικοποιημένη συνάρτηση κυματιδίου συχνά γράφεται συνοπτικά ως

$$\psi_{\alpha, b}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \psi \left( \frac{t-b}{\alpha} \right) \quad (3.7)$$

όπου η κανονικοποίηση με αυτό τον τρόπο θεωρείται ότι έχει γίνει στην ενέργεια του κυματιδίου.

Ο μετασχηματισμός κυματιδίου λέγεται και μαθηματικό μικροσκόπιο, όπου το  $b$  είναι η εστίαση στις χρονοσειρές που πρέπει να ελεγχθούν και το  $\alpha$  σχετίζεται με την μεγέθυνση στη θέση  $b$ . Το σχήμα 3-2(α) επιχειρεί να παρουσιάσει την μηχανική του μετασχηματισμού του κυματιδίου που δίνεται με τη σχέση 3.6. Στο σχήμα το κυματίδιο κλίμακας  $\alpha$  έχει τοποθετηθεί στη θέση  $b$ , πάνω στον άξονα του χρόνου και έχει υπερτεθεί σε ένα τυχαίο σήμα. Στα τμήματα του χρόνου, όπου το κυματίδιο και το σήμα είναι και τα δύο θετικά, συνεισφέρουν θετικά στο ολοκλήρωμα της σχέσης 3.6 (περιοχή Α στο σχήμα). Επίσης, στα τμήματα του χρόνου, όπου το κυματίδιο και το σήμα είναι και τα δύο αρνητικά, έχουν θετική συνεισφορά στο ολοκλήρωμα (περιοχή Β). Οι περιοχές όπου το σήμα και το κυματίδιο έχουν αντίθετο πρόσημο, συνεισφέρουν αρνητικά στο ολοκλήρωμα (περιοχές C, D και E στο σχήμα 3-2).



Σχήμα 3-2. Η διερεύνηση του σήματος από το κυματίδιο. α) Το κυματίδιο συγκεκριμένης διεύθυνσης και μετατόπισης εφαρμοσμένο στο σήμα. Οι περιοχές που δίνουν θετικές και αρνητικές συνεισφορές στο ολοκλήρωμα είναι οριοθετημένες με διακεκομμένες γραμμές και σημειωμένες με + ή -. β) Το κυματίδιο σταθερής διεύθυνσης σε 4 διακριτές θέσεις στο σήμα. Στη θέση  $b_1$  λαμβάνεται μια μεγάλη θετική τιμή. Στην θέση  $b_2$  μια τιμή σχεδόν μηδενική και στην  $b_3$  μια μεγάλη αρνητική τιμή. Στην  $b_4$  ένα τοπικό ελάχιστο στο σήμα αντιστοιχεί με ένα θετικό κομμάτι του κυματιδίου και κάποια τμήματα του σήματος με σχετικά υψηλότερες τιμές αντιστοιχούν με αρνητικά τμήματα του κυματιδίου. Αυτοί οι συνδυασμοί δίνουν υψηλές αρνητικές τιμές του μετασχηματισμού.

Όπως και στον Fourier έτσι υπάρχει και ο αντίστροφος μετασχηματισμός κυματιδίου και ορίζεται ως

$$x(t) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} T(\alpha, b) \psi_{\alpha, b}(t) \frac{d\alpha db}{\alpha^2} \quad (3.8)$$

Με τον αντίστροφο μετασχηματισμό, το αρχικό σήμα ανακτάται από τον μετασχηματισμό κυματιδίου με ολοκλήρωση σε όλες τις κλίμακες  $\alpha$  και  $b$ . Σημειώνουμε ότι στον αντίστροφο μετασχηματισμό χρησιμοποιείται η αρχική συνάρτηση κυματιδίου και όχι το συμπλήρωμα το οποίο χρησιμοποιείται στο ευθύ. Αν περιορίσουμε την ολοκλήρωση σε ένα εύρος από κλίμακες  $\alpha$  αλλά όχι σε όλες τις κλίμακες μπορούμε να εφαρμόσουμε ένα βασικό φιλτράρισμα στο αρχικό σήμα.

### 3.4. Διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου

Η συνάρτηση κυματιδίου στο συνεχή μετασχηματισμό καθορίστηκε βάσει μια κλίμακας  $a$  και μιας θέσης  $b$  ως

$$\psi_{\alpha,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \psi\left(\frac{t-b}{\alpha}\right) \quad (3.9)$$

Εδώ θεωρούμε τον μετασχηματισμό κυματιδίου ενός συνεχούς χρόνου σήματος  $x(t)$  χρησιμοποιώντας διακριτές τιμές για την διεύρυνση (κλίμακα) και για την μετατόπιση ( $a$  και  $b$  αντίστοιχα).

Ένας φυσικός τρόπος για να πάρουμε δείγματα των παραμέτρων  $a$  και  $b$  είναι να διακριτοποιήσουμε λογαριθμικά τη κλίμακα  $a$  και στη συνέχεια να συνδέσουμε τα αποτελέσματα με τον αριθμό των βημάτων που λαμβάνονται σε κάθε θέση  $b$ . Για να συνδέσουμε το  $b$  με το  $a$  μετακινούμαστε κατά διακριτά βήματα σε κάθε θέση  $b$  τα οποία είναι ανάλογα της κλίμακας  $a$ :

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0\alpha_0^m}{\alpha_0^m}\right) \quad (3.10)$$

όπου οι ακέραιοι,  $m$  και  $n$ , ελέγχουν την διεύρυνση και την μετατόπιση του κυματιδίου. Αντίστοιχα  $\alpha_0$  είναι καθορισμένη σταθερή παράμετρος του βήματος της διεύρυνσης που έχει τεθεί να είναι μεγαλύτερη της μονάδας και  $b_0$  είναι η παράμετρος της θέσης που πρέπει να είναι μεγαλύτερη του μηδενός. Οι παράμετροι ελέγχου  $m$  και  $n$  περιέχονται στο σύνολο όλων των ακεραίων, θετικών και αρνητικών. Είναι προφανές, από την παραπάνω εξίσωση ότι το μέγεθος των βημάτων μετατόπισης  $\Delta b = b_0\alpha_0^m$  είναι απευθείας ανάλογο της κλίμακας του κυματιδίου  $\alpha_0^m$ .

Ο μετασχηματισμός κυματιδίου του συνεχούς σήματος,  $x(t)$ , χρησιμοποιώντας διακριτά κυματίδια της μορφής της εξίσωσης 3.10, είναι

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\alpha_0^{m/2}} \psi(\alpha_0^{-m}t - nb_0) dt \quad (3.11)$$

ο οποίος μπορεί να εκφραστεί και ως εσωτερικό γινόμενο:

$$T_{m,n} = \langle x, \psi_{m,n} \rangle \quad (3.12)$$

όπου  $T_{m,n}$  είναι οι τιμές του διακριτού μετασχηματισμού δοσμένες σε ένα πλέγμα κλίμακας-θέσης που έχουν αντίστοιχα δείκτες  $m,n$ . Για τον διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίου οι τιμές του  $T_{m,n}$  είναι γνωστές, ως συντελεστές κυματιδίου (wavelet Coefficients) ή συντελεστές λεπτομέρειας (detail coefficients). Στην παρούσα εργασία αναφερόμαστε στις τιμές του  $T_{m,n}$  ως συντελεστές λεπτομέρειας (detail coefficients).

### 3.4.1. Πλαισία κυματιδίου (wavelet frames)

Για να καθορίσουμε πόσο καλή είναι η αναπαράσταση του σήματος στο χώρο των κυματιδίων, μπορούμε να αναφερθούμε στην θεωρία των πλαισίων κυματιδίου (wavelet frames), τα οποία παρέχουν ένα γενικό πλαίσιο εργασίας για την μελέτη των ιδιοτήτων του διακριτών κυματιδίων.

Τα πλαίσια κυματιδίου κατασκευάζονται δειγματοληπτώντας τις παραμέτρους του χρόνου και της κλίμακας ενός συνεχούς μετασχηματισμού όπως κάναμε παραπάνω. Η οικογένεια των συναρτήσεων που αποτελεί το πλαίσιο είναι εκείνες στις οποίες η ενέργεια των συντελεστών που προκύπτουν από τον μετασχηματισμό κυματιδίου, βρίσκεται σε ένα εύρος που καθορίζεται από την ενέργεια του αρχικού σήματος.

$$AE \leq \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} |T_{m,n}|^2 \leq BE \quad (3.13)$$

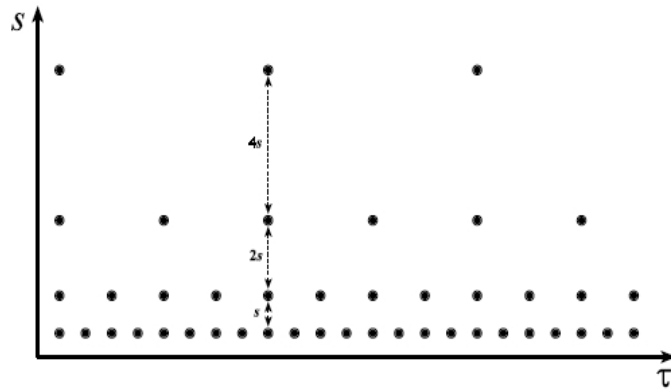
όπου  $T_{m,n}$  είναι συντελεστές λεπτομέρειας του μετασχηματισμού κυματιδίου,  $A$  και  $B$  τα όρια του πλαισίου και  $E$  η ενέργεια του αρχικού σήματος, όπου το σήμα μας έχει πεπερασμένη ενέργεια. Οι τιμές  $A$ ,  $B$  των ορίων του πλαισίου εξαρτώνται από τις παραμέτρους  $a_0$ ,  $b_0$  οι οποίες έχουν επιλεγθεί βάσει της συνάρτησης κυματιδίου και της ανάλυσης που θα γίνει. Αν το  $A=B$  τότε το πλαίσιο λέγεται "σφιχτό". Ο τύπος ανακατασκευής τέτοιων σφιχτών πλαισίων είναι απλός και δίνεται από άπειρες σειρές.

$$x(t) = \frac{1}{A} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (3.14)$$

Όταν  $A=B=1$  η οικογένεια κυματιδίου που ορίζεται από το πλαίσιο σχηματίζει μια ορθοκανονική βάση.

### 3.4.2. Δυαδικό πλέγμα και ορθοκανονικός μετασχηματισμός κυματιδίου

Συνηθισμένες επιλογές για τις παραμέτρους  $a_0$  και  $b_0$  είναι αντίστοιχα 2 και 1. Αυτή η λογαριθμική κλιμακοποίηση στη δύναμη του 2 στο βήμα της διεύρυνσης και της μετατόπισης είναι γνωστή ως σύμβαση δυαδικού πλέγματος. Το δυαδικό πλέγμα είναι η απλούστερη και πιο αποδοτική διακριτοποίηση για πρακτικούς σκοπούς, η οποία οδηγεί επίσης στην κατασκευή μια ορθοκανονικής βάσης κυματιδίου (σχήμα 3-3) [9].



Σχήμα 3-3. Αναπαράσταση του διακριτού κυματιδίου στο δυαδικό πλέγμα χρόνου –κλίμακας. Όπου  $S$  είναι η κλίμακα  $a_0^m$ . Οι πιο μεγάλες κλίμακες (π.χ  $4s=2^2s$ ) αντιστοιχούν σε χαμηλότερες συχνότητες. Η επιλογή του  $a_0=2$  εξυπηρετεί την δειγματοληψία της συχνότητας ώστε να αντιστοιχεί σε δυαδική δειγματοληψία [13].

Αντικαθιστώντας το  $a_0=2$  και το  $b_0=1$  στην σχέση 3.10 βλέπουμε ότι το κυματίδιο του δυαδικού πλέγματος μπορεί να γράφει ως εξής

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \psi\left(\frac{t - n2^m}{2^m}\right) \quad (3.15a)$$

ή πιο συνοπτικά

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n) \quad (3.15b)$$

Τα κυματίδια διακριτού δυαδικού πλέγματος συνήθως επιλέγονται να είναι ορθοκανονικά. Αυτά τα κυματίδια είναι ταυτόχρονα ορθογώνια μεταξύ τους και κανονικοποιημένα ώστε να έχουν ενέργεια ίση με μονάδα. Αυτό γράφεται ως

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_{m,n}(t) \psi_{m',n'}(t) dt = \begin{cases} 1 & \text{αν } m = m' \text{ και } n = n' \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.16)$$

Έτσι μπορεί να ειπωθεί, ότι το γινόμενο κάθε κυματιδίου με όλα τα υπόλοιπα στο ίδιο δυαδικό σύστημα είναι μηδέν. Αυτό σημαίνει, ότι η πληροφορία που είναι αποθηκευμένη σε ένα συντελεστή λεπτομέρειας  $T_{m,n}$  του κυματιδίου, δεν επαναλαμβάνεται αλλού και έτσι είναι επιτρεπτό να αναπαραχθεί το σήμα χωρίς πλεονασμό. Επιπλέον, στην ορθογωνιότητα, τα ορθοκανονικά κυματίδια έχουν κανονικοποιηθεί, ώστε να έχουν μοναδιαία ενέργεια. Αυτό φαίνεται από την ισότητα καθώς όταν  $m=m'$  και  $n=n'$  το ολοκλήρωμα δίνει ενέργεια για την

συνάρτηση κυματιδίου ίση με μονάδα. Τα ορθοκανονικά κυματίδια έχουν όρια  $A=B=1$  για τα πλαίσια και η αντίστοιχη οικογένεια κυματιδίων είναι ορθοκανονική βάση. Μια βάση είναι ένα σύνολο διανυσμάτων, ο συνδυασμός των οποίων μπορεί να καθορίσει το αρχικό σήμα. Μια ορθοκανονική βάση έχει επιπλέον τα διανύσματα της κάθετα μεταξύ τους.

Χρησιμοποιώντας το κυματίδιο δυαδικού πλέγματος της σχέσης 3.15 α ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου γράφεται ως εξής

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{m,n}(t)dt \quad (3.17)$$

Επιλέγοντας μια ορθοκανονική βάση κυματιδίου  $\psi_{m,n}(t)$  μπορούμε να ανακατασκευάσουμε το αρχικό σήμα με όρους των συντελεστών λεπτομέρειας  $T_{m,n}$  του κυματιδίου χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίου

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{m,n}\psi_{m,n}(t) \quad (3.18)$$

### 3.4.3. Διαφορές με το συνεχή μετασχηματισμό

Η διακριτοποίηση, η οποία απαιτείται για να έχει πρακτική εφαρμογή ο μετασχηματισμός, του συνεχούς μετασχηματισμού κυματιδίου, σχετίζεται με μια διακριτή προσέγγιση του ολοκληρώματος του μετασχηματισμού, ο οποίος υπολογίστηκε σε ένα διακριτό πλέγμα από  $a$  κλίμακες και  $b$  θέσεις. Ο αντίστροφος συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίου επίσης υπολογίζεται ως μια διακριτή προσέγγιση. Από την άλλη μεριά για το διακριτό μετασχηματισμό όπως καθορίστηκε στην ισότητα 3.17 το ολοκλήρωμα του μετασχηματισμού παραμένει συνεχές, αλλά ορίζεται μόνο στο διακριτοποιημένο πλέγμα από  $a$  κλίμακες και  $b$  θέσεις. Μπορούμε να αθροίσουμε τους συντελεστές του DWT διακριτού μετασχηματισμού και να πάρουμε ακριβώς το αρχικό σήμα .

### 3.4.4. Η συνάρτηση κλίμακας και η αναπαράσταση πολλαπλής ανάλυσης

Τα ορθοκανονικά δυαδικά διακριτά κυματίδια σχετίζονται με τις συναρτήσεις κλίμακας και με τις διευρυμένες εκδοχές αυτών. Η συνάρτηση κλίμακας σχετίζεται με την εξομάλυνση του σήματος και έχει την ίδια μορφή με τα κυματίδια και δίνεται από την σχέση

$$\varphi_{m,n}(t) = 2^{-m/2}\varphi(2^{-m}t - n) \quad (3.19)$$

Αυτές οι συναρτήσεις έχουν την ιδιότητα

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{0,0}(t)dt = 1 \quad (3.20)$$

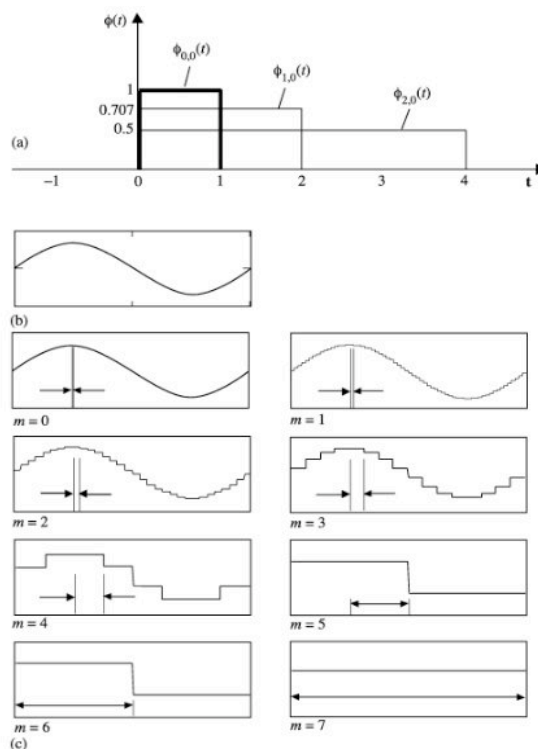
όπου η  $\varphi_{0,0}(t)=\varphi(t)$  αναφέρεται και ως πατρική συνάρτηση κλίμακας, σε αντιστοιχία με την μητρική συνάρτηση κυματιδίου (αντίστοιχα το ολοκλήρωμα της μητρικής συνάρτησης έδινε μηδέν). Η συνάρτηση κλίμακας είναι ορθογώνια ως προς τις μετατοπισμένες εκδοχές αλλά όχι και ως προς τις διευρυμένες. Η συνάρτηση κλίμακας μπορεί να συνελιχθεί με το σήμα και να δώσει τους συντελεστές προσέγγισης (approximation coefficients) ως εξής

$$S_{m,n} = \int x(t)\varphi_{m,n}(t)dt \quad (3.21)$$

Από τις τρεις τελευταίες εξισώσεις παρατηρούμε, ότι οι συντελεστές προσέγγισης είναι σταθμισμένοι μέσοι όροι του συνεχούς σήματος, κατά ένα παράγοντα  $2^{m/2}$ . Οι συντελεστές προσέγγισης (approximation coefficients) σε συγκεκριμένη κλίμακα  $m$  συνολικά αναφέρονται ως διακριτή προσέγγιση του σήματος σε αυτήν την κλίμακα. Μια συνεχής προσέγγιση του σήματος στην κλίμακα  $m$ , μπορεί να παραχθεί αθροίζοντας μια ακολουθία συναρτήσεων κλίμακας, σε αυτήν την κλίμακα, οι οποίες έχουν πολλαπλασιαστεί με τους αντίστοιχους συντελεστές προσέγγισης (approximation coefficients) ως εξής

$$x_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{m,n}\varphi_{m,n}(t) \quad (3.22)$$

όπου το  $x_m(t)$  είναι ομαλή εκδοχή του σήματος  $x(t)$ , εξαρτώμενη από την συνάρτηση κλίμακας, στην κλίμακα με δείκτη  $m$ . Αυτή η συνεχής προσέγγιση πλησιάζει το  $x(t)$  με μικρές κλίμακες δηλ. καθώς το  $m$  τείνει στο  $-\infty$ . Το σχήμα 3-4 (a) δείχνει μια απλή συνάρτηση κλίμακας, έναν τετραγωνικό παλμό, στην κλίμακα με δείκτη  $m=0$  και στην θέση με  $n=0$ :  $\varphi_{0,0}(t)=\varphi(t)$  (πατρική συνάρτηση) μαζί με δυο διευρυμένες εκδοχές της στην ίδια θέση. Είναι εύκολο να δειχθεί ότι η συνέλιξη του παλμού με το σήμα (σχέση 3.22), στο τμήμα όπου ο παλμός δεν είναι μηδέν, έχει ως αποτέλεσμα μια μέση τιμή του σήματος στην θέση αυτή ( $n=0$ ). Το σχήμα 3-4(b) δείχνει μια κυματομορφή ημίτονου  $x(t)$  μιας περιόδου που περιέχεται σε αυτό το παράθυρο. Το σχήμα 3-3(c) δείχνει διάφορες προσεγγίσεις του κύματος ημίτονου, όπως παρήχθησαν από τις σχέσεις 3.21 και 3.22 με την συνάρτηση κλίμακας να έχει ένα εύρος  $2^0$  έως  $2^7$ .



Σχήμα 3-4 Η συνάρτηση κλίμακας και διάφορες προσεγγίσεις του κύματος ημίτονου



Η σχέση 3.22 υπολογίζει τους συντελεστές προσέγγισης (approximation coefficients). Οι συντελεστές προσέγγισης στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στην σχέση 3.23 για να παραχθεί μια προσέγγιση του σήματος, το οποίο είναι απλά μια ακολουθία από συναρτήσεις κλίμακας τοποθετημένες δίπλα η μια στην άλλη, πολλαπλασιασμένη η κάθε μια με το αντίστοιχο συντελεστή προσέγγισης. Αυτό είναι φανερό από την τετραγωνισμένη μορφή των προσεγγίσεων του σήματος. Η προσέγγιση στην κλίμακα του παραθύρου ( $=2^7$ ) είναι απλά ο μέσος όρος πάνω από όλο το σήμα, ο οποίος δίνει για το ημίτονο μηδέν. Καθώς μικραίνει η κλίμακα η προσέγγιση πλησιάζει στην αρχική κυματομορφή.

Μπορούμε να αναπαραστήσουμε ένα σήμα  $x(t)$  χρησιμοποιώντας μια συνδυασμένη επέκταση σε σειρές χρησιμοποιώντας και τους συντελεστές προσέγγισης και τους συντελεστές λεπτομέρειας (σχήμα 3-5 (πάνω): συντελεστές D1 ως D10) του κυματιδίου ως εξής:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{m_0,n} \varphi_{m_0,n}(t) + \sum_{m=-\infty}^{m_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (3.23)$$

Μπορούμε να δούμε ότι το αρχικό συνεχές σήμα εκφράζεται ως ο συνδυασμός μια προσέγγισης του εαυτού του, σε μια τυχαία κλίμακα  $m_0$ , η οποία προστίθεται σε προηγούμενες λεπτομέρειες του σήματος σε κλίμακες από  $m_0$  έως αρνητικές άπειρες τιμές. Το λεπτομερές σήμα (detail signal) κλίμακας  $m$ , ορίζεται ως:

$$d_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (3.24)$$

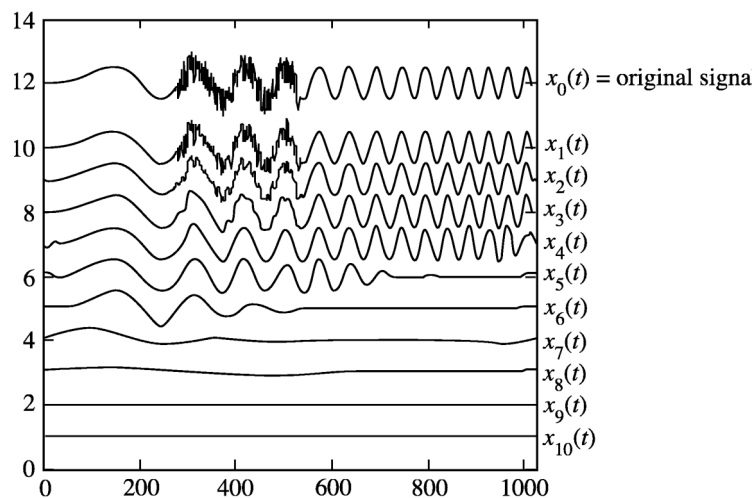
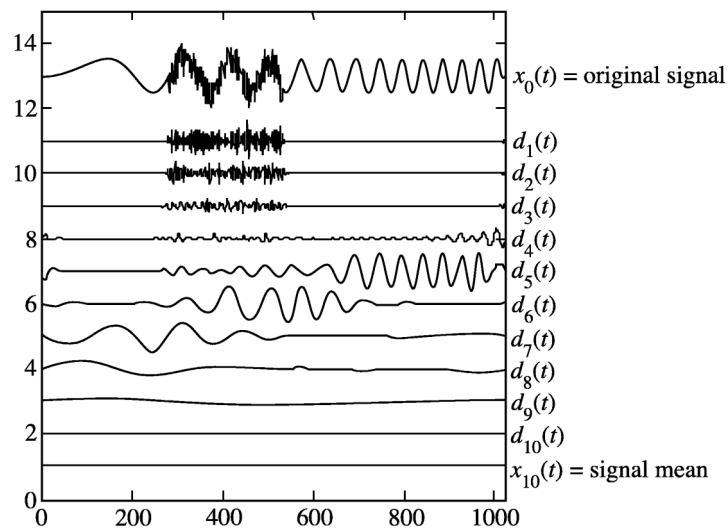
και έτσι μπορούμε να γράψουμε την 3.5 ως

$$x(t) = x_{m_0}(t) + \sum_{m=-\infty}^{m_0} d_m(t) \quad (3.25)$$

Από αυτή την εξίσωση φαίνεται εύκολα ότι :

$$x_{m-1}(t) = x_m(t) + d_m(t) \quad (3.26)$$

το οποίο μας λέει ότι αν προσθέσουμε το λεπτομερές σήμα σε μια τυχαία κλίμακα (με δείκτη  $m$ ), στη προσέγγιση του σήματος στην ίδια κλίμακα, λαμβάνουμε την προσέγγιση του σήματος σε μια αυξημένη ανάλυση, δηλαδή σε μικρότερη κλίμακα  $m-1$  (σχήμα 3-5 (κάτω)).



Σχήμα 3-5. Αποσύνθεση και ανακατασκευή με μετασχηματισμό κυματιδίου. Το σήμα  $x_0(t)$  (original signal) έχει αποσυντεθεί με την χρήση κυματιδίου daubechies D20 (κορυφή του πρώτου διαγράμματος). Τα σήματα (D1 ως D10) είναι τα λεπτομερή σήματα όπως προκύπτουν από την αποσύνθεση του σήματος (δεν είναι τα σήματα αποσύνθεσης). Στο κάτω μέρος του πρώτου διαγράμματος είναι η προσέγγιση του σήματος (approximation signal) και όχι οι συντελεστές προσέγγισης. Στο δεύτερο διάγραμμα οι προσεγγίσεις του σήματος  $x_1$  έως  $x_{10}$  προκύπτουν προσθέτοντας την προσέγγιση (approximation signal) και το λεπτομερές σήμα (detail signal) σε χαμηλότερη κλίμακα.

### 3.4.5. Η εξίσωση της συνάρτησης κλίμακας, οι συντελεστές κλίμακας και η σχετική συνάρτηση κυματιδίου.

Η εξίσωση κλίμακας περιγραφεί την συνάρτηση κλίμακας  $\varphi(t)$  σε όρους συσταλμένων και μετατοπισμένων εκδοχών του εαυτού της, ως εξής:

$$\varphi(t) = \sum_k c_k \varphi(2t - k) \quad (3.27)$$

όπου η  $\varphi(2t-k)$  είναι μια συσταλμένη εκδοχή της  $\varphi(t)$  μετατοπισμένη στο άξονα του χρόνου κατά τον ακέραιο  $k$  και παραγοντοποιημένη με το σχετικό συντελεστή κλίμακας  $c_k$ . Η εξίσωση 3.27 μας λέει, ότι μπορούμε να δημιουργήσουμε μια συνάρτηση κλίμακας σε μια κλίμακα, από έναν αριθμό από εξισώσεις κλίμακας, σε μια προηγούμενη κλίμακα. Η λύση σε

αυτή την εξίσωση διαφορών σε αυτές τις δυο κλίμακες δίνει την συνάρτηση κλίμακας  $\varphi(t)$ . Για χάρη απλότητας, θεωρούμε ότι έχουν κυματίδια τα οποία αποτελούνται από ακολουθίες με μη μηδενικούς συντελεστές κλίμακας και πεπερασμένου μήκους. Ολοκληρώνοντας και τις δυο πλευρές της παραπάνω ισότητας, μπορούμε να δείξουμε ότι οι συντελεστές κλίμακας πρέπει να ικανοποιούν τον ακόλουθο περιορισμό

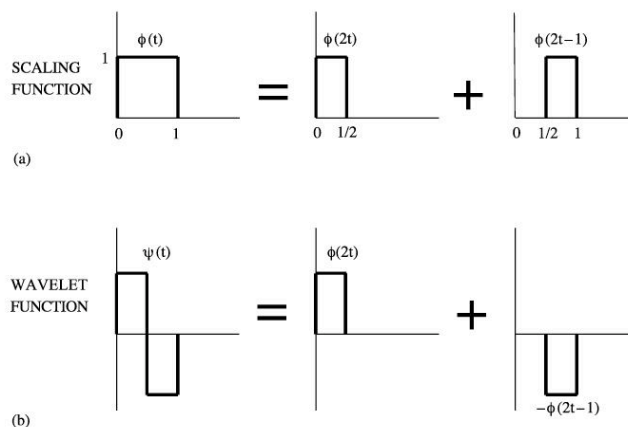
$$\sum_k c_k = 2 \quad (3.28)$$

Επιπλέον, για να δημιουργήσουμε ορθογώνιο σύστημα απαιτείται ότι

$$\sum_k c_k c_{k+2k'} = \begin{cases} 2 & k' = 2 \\ 0 & \text{αλλιως} \end{cases} \quad (3.29)$$

Αυτό επίσης μας λέει, ότι το άθροισμα των τετραγώνων των συντελεστών κλίμακας πρέπει να ισούται με 2. Οι ίδιοι συντελεστές, αλλά με αντίθετο πρόσημο και αντίστροφη σειρά, χρησιμοποιούνται για να παραχθεί η εξίσωση διαφορών του σχετικού κυματιδίου (σχήμα 3-6)

$$\psi(t) = \sum_k (-1)^k c_{1-k} \varphi(2t - k) \quad (3.30)$$



**Σχήμα 3-6.** Διακριτό ορθοκανονικό κυματίδιο και η συνάρτηση κλίμακας. **a)** Η συνάρτηση κλίμακας ως άθροισμα δυο εκδοχών της (μια συνεσταλμένη στο χρόνο κατά  $2t$  και η δεύτερη η οποία επιπλέον είναι μετατοπισμένη στο χρόνο κατά  $1$ ), οι οποίες έχουν πολλαπλασιαστεί με συντελεστές  $c_k=1$ . **b)** Η αντίστοιχη συνάρτηση κυματιδίου που προκύπτει ως άθροισμα των εκδοχών της συνάρτησης κλίμακας οι οποίες είναι πολλαπλασιασμένες με συντελεστές  $(-1)^k c_{1-k}$

Αυτή η κατασκευή εξασφαλίζει ότι τα κυματίδια και οι συναρτήσεις κλίμακας είναι ορθογώνια. Θεωρούμε ότι λαμβάνονται μόνο τα κυματίδια που έχουν συμπαγή υποστήριξη τα οποία έχουν πεπερασμένο αριθμό συντελεστών κλίμακας  $N_k$ . Για αυτή την περίπτωση μπορούμε να ορίσουμε την συνάρτηση κυματιδίου ως εξής:

$$\psi(t) = \sum_k (-1)^k c_{N_k-1-k} \varphi(2t - k) \quad (3.31)$$

Αυτή η διάταξη των συντελεστών κλίμακας, που χρησιμοποιούνται για την εξίσωση του κυματιδίου, επιτρέπει στις εξισώσεις κλίμακας και κυματιδίου να δρουν στο ίδιο διάστημα  $[0..N_k-1]$ .

Συχνά οι συντελεστές που αναδιατάχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην συνάρτηση κυματιδίου γράφονται συνοπτικά

$$b_k = (-1)^k c_{N_k-1-k} \quad (3.32)$$

όπου το άθροισμα όλων των συντελεστών είναι ίσο με μηδέν. Κάνοντας αναδιάταξη των συντελεστών, μπορούμε να γράψουμε την σχέση (3.31) ως εξής

$$\psi(t) = \sum_{k=0}^{N_k-1} b_k \varphi(2t-k) \quad (3.33)$$

Από τις εξισώσεις (3.19) και (3.27) και εξετάζοντας το κυματιδίο στην κλίμακα με δείκτη  $m+1$ , για διάφορες τιμές του  $m$  προκύπτει η σχέση

$$2^{-(m+1)/2} \varphi\left(\frac{t}{2^{m+1}} - n\right) = 2^{-m/2} 2^{-1/2} \sum_k c_k \varphi\left(\frac{2t}{2 \times 2^m} - 2n - k\right) \quad (3.34)$$

η οποία μπορεί να γράφει πιο συνοπτικά ως

$$\varphi_{m+1,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k c_k \varphi_{m,2n+k}(t) \quad (3.35)$$

Έτσι η συνάρτηση κλίμακας σε μια τυχαία κλίμακα, προκύπτει από την σύνθεση μια ακολουθίας από μετατοπισμένες συναρτήσεις κλίμακας σε επόμενη μικρότερη κλίμακα πολλαπλασιασμένες με τους αντίστοιχους συντελεστές κλίμακας.

$$\psi_{m+1,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k b_k \varphi_{m,2n+k}(t) \quad (3.36)$$

### 3.4.6. Αλγόριθμος πολλαπλής αποσύνθεσης- ανακατασκευής (multiresolution analysis)

Από την σχέση 3.21 μπορούμε να δούμε τους συντελεστές προσέγγισης σε μια κλίμακα με δείκτη  $m+1$

$$S_{m+1,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \varphi_{m+1,n}(t) dt \quad (3.37)$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση 3.13b η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως

$$S_{m+1,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k c_k \varphi_{m,2n+k}(t) \right] dt \quad (3.38)$$

Έτσι ξαναγράφουμε

$$S_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k c_k \left[ \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \varphi_{m,2n+k}(t) dt \right] \quad (3.39)$$

Το ολοκλήρωμα στις αγκύλες δίνει συντελεστές προσέγγισης  $S_{m,2n+k}$  για κάθε  $k$ . Και επομένως μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση ως

$$S_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k c_k S_{m,2n+k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k c_{k-2n} S_{m,k} \quad (3.40)$$

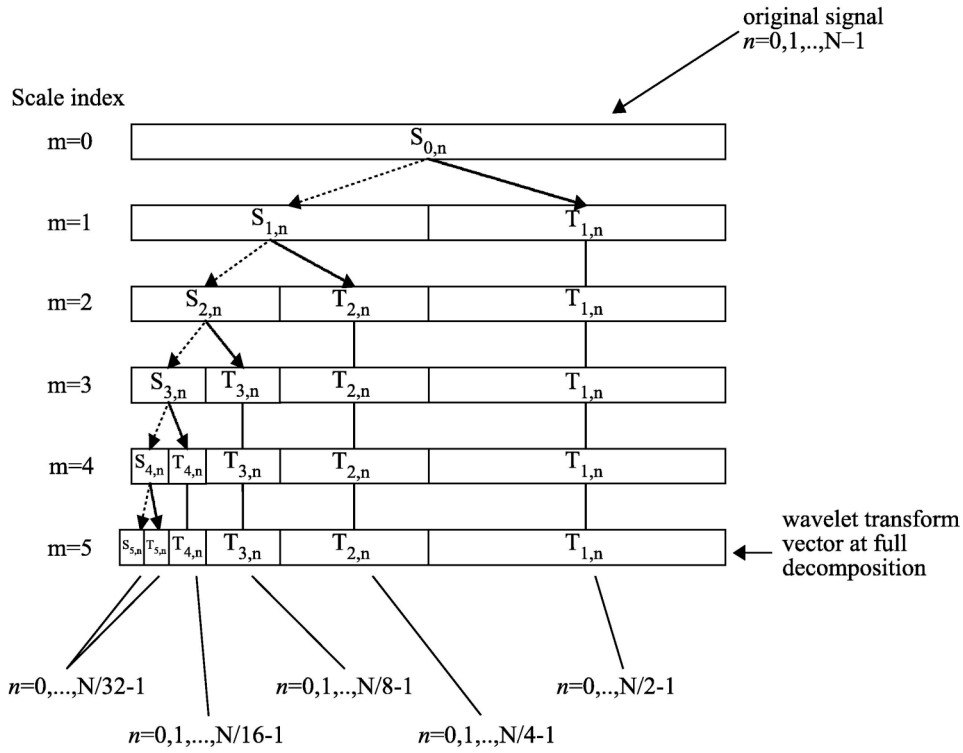
Έτσι, χρησιμοποιώντας αυτήν την εξίσωση, μπορούμε να δημιουργήσουμε τους συντελεστές προσέγγισης στην κλίμακα με δείκτη  $m+1$  χρησιμοποιώντας συντελεστές κλίμακας προηγούμενης κλίμακας.

Παρομοίως, οι συντελεστές λεπτομέρειας μπορούν να βρεθούν από τους συντελεστές προσέγγισης προηγούμενης κλίμακας, χρησιμοποιώντας τους αναδιαταγμένους συντελεστές κλίμακας  $b_k$  ως εξής

$$T_{m+1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k b_k S_{m,2n+k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k b_{k-2n} S_{m,k} \quad (3.41)$$

Μπορούμε να δούμε, ότι αν γνωρίζουμε τους συντελεστές προσέγγισης  $S_{m_0,n}$  σε συγκεκριμένη κλίμακα  $m_0$  και στην συνέχεια μέσω επαναλαμβανόμενης εφαρμογής των εξισώσεων 3.40 και 3.41, μπορούμε να δημιουργήσουμε τους συντελεστές προσέγγισης και λεπτομέρειας του κυματιδίου σε όλες τις κλίμακες που είναι μεγαλύτερες από  $m_0$ . Παρατηρούμε, ότι για να γίνει αυτό χρειάζονται μόνο οι συντελεστές  $S_{m_0,n}$  και όχι το περιεχόμενο του σήματος .

Οι εξισώσεις 3.40 και 3.41 αναπαριστούν τον αλγόριθμο πολλαπλής αποσύνθεσης. Ο αλγόριθμος αποσύνθεσης (σχήμα 3-7) επιτρέπει να υπολογίσουμε τους συντελεστές κυματιδίου με αυτό τον τρόπο καλύτερα από το να υπολογίσουμε αυτούς από την εξίσωση συνέλιξης 3.17.



Σχήμα 3-7. Αλγόριθμος αποσύνθεσης πολλαπλής ανάλυσης. Η ανάλυση έγινε μέχρι την πέμπτη κλίμακα για ένα σήμα  $N$  δειγμάτων

Μπορούμε να ακολουθήσουμε την αντίστροφη πορεία και να ανακατασκευάσουμε τους συντελεστές  $S_{m,n}$  από τους  $S_{m+1,n}$  και  $T_{m+1,n}$ . Ξέρουμε ήδη από την ισότητα 3.24 ότι ισχύει η σχέση  $x_{m-1}(t) = x_m(t) + d_m(t)$  και επεκτείνοντας αυτή

$$x_{m-1}(t) = \sum_n S_{m,n} \varphi_{m,n}(t) + \sum_n T_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (3.42)$$

Χρησιμοποιώντας τις ισότητες 3.25 και 3.26 μπορούμε να επεκτείνουμε την ισότητα σε όρους της συνάρτησης κλίμακας προηγούμενης κλίμακας ως ακολούθως

$$x_{m-1}(t) = \sum_n S_{m,n} \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k c_k \varphi_{m-1,2n+k}(t) + \sum_n T_{m,n} \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k b_k \varphi_{m-1,2n+k}(t) \quad (3.43)$$

Αναδιατάσσοντας τους δείκτες του αθροίσματος λαμβάνουμε

$$x_{m-1}(t) = \sum_n S_{m,n} \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k c_{k-2n} j_{m-1,k}(t) + \sum_n T_{m,n} \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k b_{k-2n} j_{m-1,k}(t) \quad (3.44)$$

Είναι γνωστό, ότι μπορούμε να επεκτείνουμε τη  $x_{m-1}(t)$  σε όρους των συντελεστών προσέγγισης στην κλίμακα  $m-1$  δηλαδή

$$x_{m-1}(t) = \sum_n S_{m-1,n} \varphi_{m-1,n}(t) \quad (3.45)$$

Εξισώνοντας τους συντελεστές της ισότητας 3.45 με της 3.44 παρατηρούμε ότι ο δείκτης  $k$  στην κλίμακα  $m$  σχετίζεται με τον δείκτη  $n$  στην κλίμακα  $m-1$ . Επιπλέον, η θέση με δείκτη  $n$  στη εξίσωση 3.44 δεν είναι ισοδύναμη με την θέση με δείκτη  $n$  στην εξίσωση 3.45, καθώς στην πρώτη περίπτωση η κλίμακα με δείκτη  $m$ , σχετίζεται με διακριτά διάστημα  $2^m$  και η

τελευταία με διακριτά διαστήματα  $2^{m-1}$ . Έτσι οι δείκτες  $n$  είναι δυο φορές πυκνότεροι στην τελευταία έκφραση. Ο απλούστερος τρόπος για να συνεχίσουμε, πριν εξισώσουμε τις δύο εκφράσεις, είναι να ανταλλάξουμε τον δείκτη  $k$  με το  $n$  στην σχέση 3.44 και έτσι μετά από πράξεις προκύπτει ο αλγόριθμος ανακατασκευής

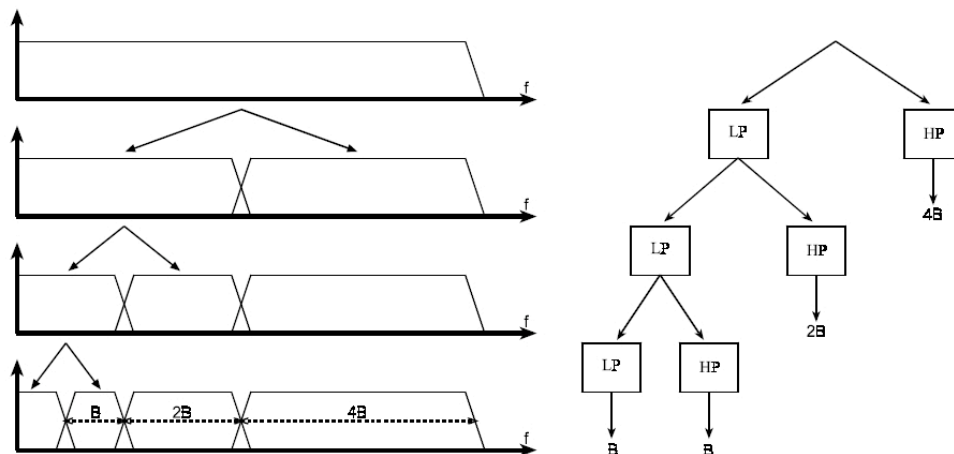
$$S_{m-1,n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k c_{n-2k} S_{m,k} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k b_{n-2k} T_{m,k} \quad (3.46)$$

όπου έχουμε ξαναχρησιμοποιήσει, το δείκτη  $k$  ως δείκτη θέσης στους συντελεστές του μετασχηματισμού στην κλίμακα  $m$ , για να τον διαφοροποιήσουμε από τον  $n$ , τον δείκτη θέσης στην κλίμακα  $m-1$  [9].

### 3.4.7. Κωδικοποίηση με ζώνες συχνοτήτων -Φιλτράρισμα

Αν θεωρήσουμε το μετασχηματισμό κυματιδίου, ως μια τράπεζα από φίλτρα, τότε οι έξοδοι σε διάφορα στάδια του φιλτραρίσματος είναι οι συντελεστές μετασχηματισμού της συνάρτησης κλίμακας  $c_k$  και της συνάρτησης κυματιδίου  $b_k$ . Η τράπεζα φίλτρων στην κωδικοποίηση με ζώνες συχνοτήτων, μπορεί να δημιουργηθεί με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος είναι να δημιουργηθούν πολλά ζωνοπερατά φίλτρα που θα διαιρούν το φάσμα στις ζώνες συχνοτήτων. Το πλεονέκτημα είναι, ότι μπορούμε να καλύψουμε την περιοχή του φάσματος που μας ενδιαφέρει με διαφορετικού μήκους φίλτρα, αλλά θα πρέπει να σχεδιάσουμε κάθε φίλτρο ξεχωριστά.

Άλλος τρόπος, είναι να χωρίσουμε το φάσμα του σήματος σε δυο ίσα τμήματα, ένα βαθυπερατό (LP) και ένα υψιπερατό (HP). Το υψιπερατό περιέχει τις πιο μικρές λεπτομέρειες (γρήγορες εναλλαγές του σήματος). Ωστόσο, το φάσμα που απομένει από το βαθυπερατό περιέχει κάποιες λεπτομέρειες και έτσι μπορεί να διαιρεθεί περαιτέρω. Αυτό μπορεί να γίνει επαναληπτικά έως ότου ληφθεί ικανοποιητικός αριθμός δεδομένων. Η διαδικασία της διαίρεσης, φαίνεται στο σχήμα 3-8. Έτσι ο σχεδιασμός μόνο δυο φίλτρων είναι αρκετός αλλά η κάλυψη του φάσματος είναι σταθερή.



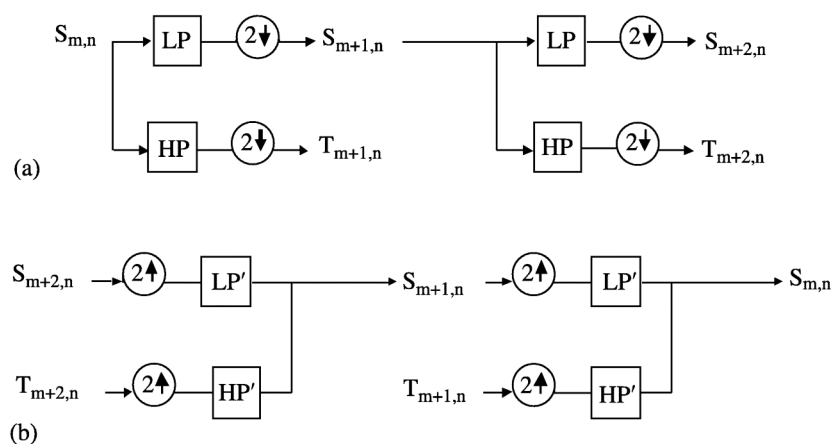
Σχήμα 3-8. Διαίρεση του φάσματος με χρήση επαναλαμβανόμενου φιλτραρίσματος

Από το σχήμα προκύπτει ότι η επαναλαμβανόμενη διαίρεση του φάσματος σε ένα εύρος από ζώνες συχνοτήτων, γίνεται με διπλασιασμό του εύρους και με την χρήση ενός βαθυπερατού φίλτρου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί και με την χρήση του μετασχηματισμού κυματιδίου. Τα κυματίδια παρέχουν τις ζωνοδιαβατές περιοχές του φάσματος και η συνάρτηση κλίμακας το βαθυπερατό φίλτρο [13].

Ξανακοιτώντας τις εξισώσεις 3.40 και 3.41 βλέπουμε ότι εφαρμόζει αντίστοιχα υπερπερατό και βαθυπερατό φιλτράρισμα της εισόδου (δηλαδή των συντελεστών  $S_{m,2n+k}$ ) για να ληφθούν οι έξοδοι ( $S_{m+1,n}$  και  $T_{m+1,n}$ ). Τα διανύσματα περιέχουν τις ακολουθίες  $(1/\sqrt{2}) c_k$  και  $(1/\sqrt{2}) b_k$  και αναπαριστούν τα φίλτρα. Οι  $(1/\sqrt{2}) c_k$  (συντελεστές συνάρτησης κλίμακας) είναι το βαθυπερατό, το οποίο επιτρέπει να περάσουν οι χαμηλές συχνότητες του σήματος και με αυτό τον τρόπο να σχηματιστεί η εξομαλυμένη εκδοχή του σήματος και οι  $(1/\sqrt{2}) b_k$  (συντελεστές συνάρτησης κυματιδίου), οι οποίοι είναι το υπερπερατό, το οποίο επιτρέπει να περάσουν οι υψηλές συχνότητες του σήματος που αντιστοιχούν στις λεπτομέρειες του σήματος.

Στην ανάλυση σημάτων, οι συντελεστές προσέγγισης στην κλίμακα  $m$ ,  $S_{m,n}$  συνελίσσονται με το βαθυπερατό φίλτρο. Αυτό επιτυγχάνεται με σάρωση του σήματος βηματικά. Οι συντελεστές προσέγγισης δειγματοληπτούνται με μείωση των δειγμάτων στο μισό (down sampled). Κάθε δεύτερη τιμή επιλέγεται για να δώσει τον συντελεστή προσέγγισης  $S_{m+1,n}$  της επόμενης κλίμακας. Το ίδιο συμβαίνει και στην επόμενη κλίμακα  $(m+1)$  για τον συντελεστή  $S_{m+1,n}$  για να ληφθεί ο συντελεστής  $S_{m+2,n}$ .

Οι συντελεστές προσέγγισης στην κλίμακα  $m$ ,  $S_{m,n}$  συνελίσσονται και με το υπερπερατό φίλτρο και δειγματοληπτούνται, όπως και πριν, αλλά προκύπτουν οι συντελεστές λεπτομέρειας  $T_{m+1,n}$  για την επόμενη κλίμακα. Αυτή η διαδικασία, επαναλαμβάνεται σε όλες τις κλίμακες και παρέχει την πλήρη αποσύνθεση του σήματος. Η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 3-9



**Σχήμα 3-9. Φιλτράρισμα σήματος με μετασχηματισμό κυματιδίου Διαδικασία α) αποσύνθεσης και β) ανακατασκευής**



### 3.4.8. Είσοδος διακριτών σημάτων πεπερασμένου μεγέθους

Για να εισάγουμε τα διακριτά σήματα που καθορίζονται από διαστήματα ακέραιων τιμών, στο πλαίσιο εργασίας της πολλαπλής ανάλυσης κυματιδίου (αλγόριθμος πολλαπλής ανάλυσης), πρέπει οι συντελεστές προσέγγισης στην κλίμακα  $m=0$  να ορίζονται ως εξής

$$S_{0,n} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\varphi(t-n)dt \quad (3.47)$$

με τη παραπάνω σχέση και με τις 3.40 και 3.41 μπορούμε να παράγουμε όλους τους συντελεστές  $S_{m,n}$  και  $T_{m,n}$  σε κλίμακες μεγαλύτερες του  $m=0$ .

Στην περίπτωση των διακριτών σημάτων, το  $S_{0,n}$  είναι πεπερασμένου μήκους  $N$ , το οποίο προκύπτει από δύναμη του 2:  $N=2^M$ . Έτσι το εύρος από κλίμακες που μπορούμε να εξετάσουμε είναι από  $0 < m < M$ . Αντικαθιστώντας το  $m=0$  (πρώτο μέρος της εξίσωσης) και το  $m=M$  (δεύτερο μέρος της εξίσωσης) στην σχέση 3.23 και επισημαίνοντας ότι έχουμε πεπερασμένο εύρος από  $n$  (δείγματα σήματος), το οποίο διαιρείται στο μισό σε κάθε μείωση της κλίμακας, μπορούμε να δούμε ότι η προσέγγιση του σήματος στην κλίμακα  $m=0$  (σήμα εισόδου), μπορεί να γραφεί ως το άθροισμα μια εξομάλυνσης του σήματος στην κλίμακα  $M$  με τον συνδυασμό σημάτων λεπτομέρειας όπως φαίνεται παρακάτω [9].

$$\sum_{n=0}^{2^{M-m}-1} S_{0,n}\varphi_{0,n}(t) = S_{M,n}\varphi_{M,n}(t) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{2^{M-m}-1} T_{m,n}\psi_{m,n}(t) \quad (3.48)$$

### 3.4.9. Αποθορυβοποίηση

Μετά την αποσύνθεση υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής των συντελεστών στο διάλυμα του μετασχηματισμού, πριν την εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού (ανακατασκευή).

Η κατωφλίωση του πλάτους, είναι ένας τρόπος αφαίρεσης του θορύβου και σχετίζεται με την μείωση ή την πλήρη αφαίρεση επιλεγμένων συντελεστών με σκοπό την ανάδειξη των συντελεστών ενδιαφέροντος. Δυο τρόποι κατωφλίωσης υπάρχουν, η *σκληρή* και η *ήπια κατωφλίωση*. Δυστυχώς, η εξομάλυνση του σήματος που εξαρτάται από την κλίμακα, αφαιρεί όλους τους συντελεστές κάτω της κλίμακας με δείκτη  $m^*$ , ανεξαρτήτως του πλάτους. Αντιθέτως, η κατωφλίωση (ήπια ή σκληρή) αφαιρεί ή μειώνει του συντελεστές με το μικρότερο πλάτος, ανεξαρτήτως κλίμακας.

Στην σκληρή κατωφλίωση, τίθεται ένα κατώφλι το οποίο σχετίζεται με κάποια μέση τιμή των συντελεστών κυματιδίου, σε κάθε κλίμακα π.χ την σταθερή απόκλιση ή την μέση τυπική απόκλιση. Οι συντελεστές κάτω του κατωφλιού, θεωρούνται θόρυβος και αφαιρούνται. Στην ήπια κατωφλίωση, αναγνωρίζεται ότι το σήμα περιέχει και θόρυβο και σήμα και επιχειρείται η απομόνωση μονό του θορύβου, όχι των συντελεστών που είναι κάτω του κατωφλιού.

### 3.5. Συμπέρασμα

Ο μετασχηματισμός Fourier μικρής διάρκειας, δίνει μια βολική αναπαράσταση χρόνου–συχνότητας, όμως δεν μπορεί να παρακολουθεί καλά τις παραλλαγές προκλητών δυναμικών, που δεν είναι σταθερές, όπως και αλλαγές του χρόνου και αντίστοιχα της συχνότητας αλληλοαποκλείονται και έχουν ένα όριο που ονομάζεται βέλτιστη διακριτική ανάλυση χρόνου-συχνότητας. Ο μετασχηματισμός κυματιδίου, είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την ανάλυση μη στατικών σημάτων, επειδή έχει καλύτερη διακριτική ικανότητα, τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας, το οποίο ταιριάζει καλά στην σχέση  $1/f$  της φασματικής ανάλυσης στα προκλητά δυναμικά.

## 4. Πειραματικό μέρος

### 4.1. Μεθοδολογία

#### 4.1.1. Αντικείμενα μελέτης και καταγραφής δεδομένων

Τα δεδομένα προήλθαν από το Τμήμα Ψυχιατρικής του Αιγινήτειου Νοσοκομείου του Πανεπιστημίου Αθηνών. Μελετήθηκαν πενήντα επτά (57) παιδιά ηλικίας 7 έως 16 ετών. Τριάντα οκτώ (26 αγόρια και 12 κορίτσια) από αυτά ήταν περιπτώσεις εξωτερικών ασθενών στους οποίους είχε διαγνωστεί συγκεκριμένη διαταραχή ανάγνωσης (δυσλεξία). Από τα 26 αγόρια και 12 κορίτσια τα 13 αγόρια και 8 κορίτσια ήταν κάτω των 12 ετών. Τα υπόλοιπα 19 (7 αγόρια και 12 κορίτσια) ήταν υγιή ετεροθαλή αδέρφια τους.

Πίνακας 4-1 Πειραματικά Δεδομένα

	ΈΛΕΓΧΟΙ	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΜΕΛΕΤΗΣ
Αριθμός	38	19
Μέση Ηλικία	12,21 ± 2,25	11,47 ± 2,12

Η εγκεφαλική δραστηριότητα καταγράφηκε από 15 ηλεκτρόδια στο τριχωτό της κεφαλής, με βάση το Διεθνές Σύστημα ΗΕΓ 10-20, σε σχέση με αυτά που ήταν τοποθετημένα στους λοβούς των αυτιών (ηλεκτρόδια αναφοράς). Ένα ηλεκτρόδιο είχε τοποθετηθεί στο μέτωπο και χρησίμευε ως γείωση. Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει την αντιστοιχία μεταξύ των αριθμημένων απαγωγών που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία σήματος και της ονομασίας που τους έχει δοθεί βάσει σύμβασης.

Πίνακας 4-2 Σχέση απαγωγών με τα αριθμημένα ηλεκτρόδια

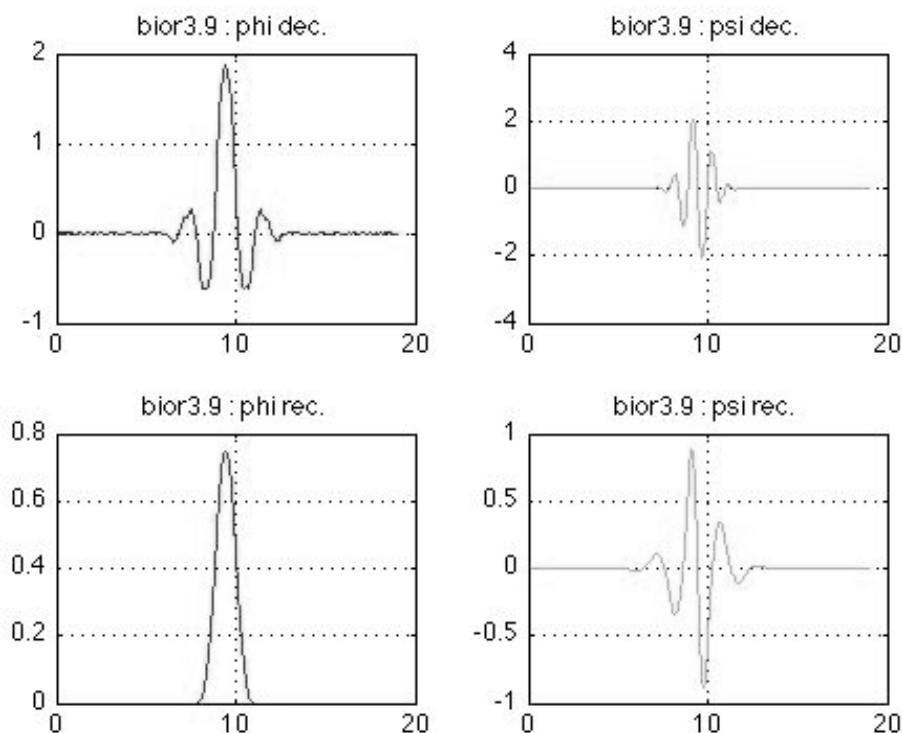
Αριθμός Απαγωγής	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Απαγωγή	Fp1	F3	C5	C3	Fp2	F4	C4	C6	O1	O2	P4	P3	Pz	Cz	Fz

Το εύρος ζώνης των ενισχυτών ορίστηκε από 0,05 Hz έως 35 Hz. Καταγράφηκαν κινήσεις των οφθαλμών με την βοήθεια ηλεκτροοφθαλμογραφήματος, ενώ απορρίφθηκαν καταγραφές ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος με πλάτος υψηλότερο από 75mV. Χρησιμοποιήθηκαν προειδοποιητικά ερεθίσματα υψηλής (3000Hz) και χαμηλής (500Hz) συχνότητας, διάρκειας 100ms, καθώς και αριθμοί υπενθύμισης μέσω των ακουστικών σε επίπεδο έντασης 65 dB ηχητικής πίεσης.

Κάθε προειδοποιητικό ερέθισμα, είχε χρονική καθυστέρηση 1s από την έναρξη των αριθμών προς απομνημόνευση. Μετά την ολοκλήρωση της ανωτέρω διαδικασίας, ακολούθησε χρόνος ανάπαυσης 5 λεπτών. Τα προκλητά δυναμικά καταγράφηκαν κατά το χρονικό διάστημα 1,1s, μεταξύ του προειδοποιητικού ερεθίσματος και της πρώτης εκφώνησης των αριθμών. Το διπλό σήμα προκλητού δυναμικού οδηγήθηκε σε ένα αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα, με ρυθμό δειγματοληψίας 1 kHz, όπου έγινε υπολογισμός κατά μέσο όρο από το μηχανογραφικό σύστημα. Κάθε καταγραφή αποτελούνταν από 52 επαναλήψεις μεμονωμένων δοκιμών, οι οποίες ομαδοποιούνται, λόγω του χρόνου ανάπαυσης, σε δύο σειρές δοκιμών των 26 μεμονωμένων δοκιμών.

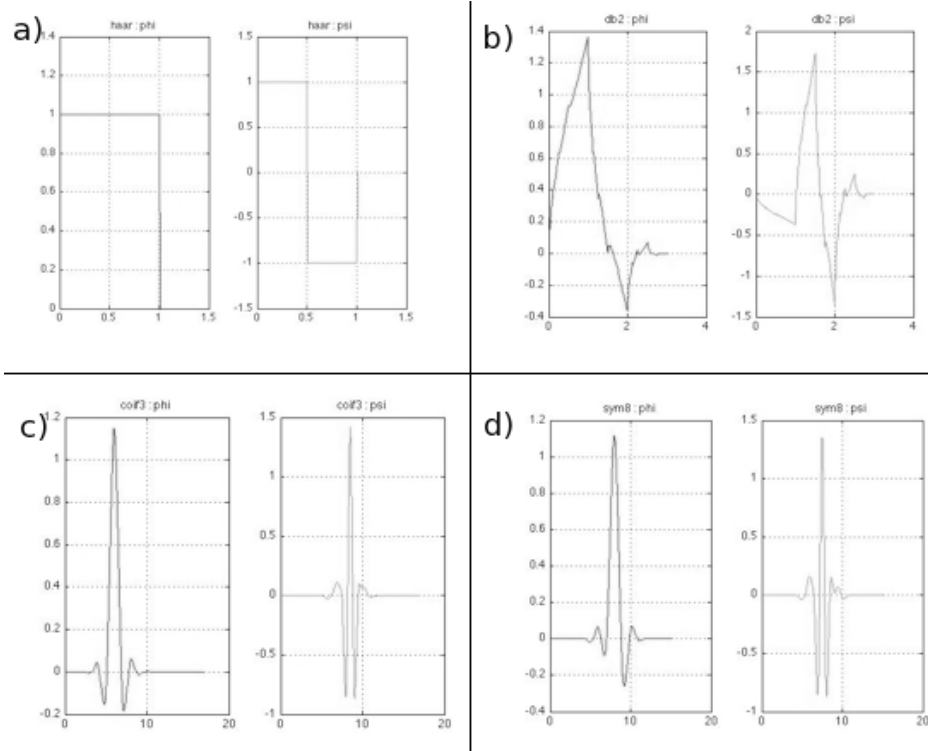
#### 4.1.2. Μετασχηματισμός κυματιδίου

Για την επεξεργασία των προκλητών δυναμικών, εφαρμόσαμε διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίου, Από τις συναρτήσεις κυματιδίων επιλέξαμε την διορθογώνια ‘bior3.9’ (σχήμα 4-1). Αυτή η οικογένεια κυματιδίων χρησιμοποιεί μια συνάρτηση για αποσύνθεση και μια για ανακατασκευή. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία παρέχει βέλτιστη ανάλυση στον χρόνο και την συχνότητα και η διαδικασία ανακατασκευής δεν δημιουργεί τεχνητές ακμές [9].



Σχήμα 4-1 Κυματίδιο bior 3.9. Οι δυο συναρτήσεις (κλίμακας (PHI) και μητρικής (PSI)) τόσο για την αποσύνθεση (dec) όσο και για την ανακατασκευή (rec).

Στο σχήμα 4-2 φαίνονται αντίστοιχες συναρτήσεις (κλίμακας (PHI) και μητρικής (PSI)) μερικών γνωστών κυματιδίων. Παρατηρούμε ότι οι συναρτήσεις αυτές δεν ταιριάζουν στο σήμα προκλητών δυναμικών και αποτελούνται από απότομες μεταβολές, σε αντίθεση με την ομαλή συνάρτηση bior3.9



Σχήμα 4-2. Συναρτήσεις κυματιδίων a) haar ή αλλιώς db1, b) db2, c) coif3, d) sym8

#### 4.1.3. Αποθορυβοποίηση των προκλητών δυναμικών

Ένας άμεσος τρόπος για την μερική αποφυγή των διακυμάνσεων, που σχετίζονται με το υπάρχον ΗΕΓ είναι να μηδενίζονται οι συντελεστές που δεν συσχετίζονται με τις κορυφές που μας ενδιαφέρουν.

Ωστόσο, η επιλογή των εν λόγω συντελεστών, δεν θα πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στον μέσο όρο του προκλητού δυναμικού, αλλά θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη το χρονικό εύρος κατά το οποίο αναμένεται να συμβεί το προκλητό δυναμικό της μεμονωμένης δοκιμής (γειτονικοί συντελεστές μπορούν να συμπεριληφθούν προκειμένου να ληφθεί υπόψη και η διακύμανση (jitter) του λανθάνοντος χρόνου). Από αυτή την άποψη, επιλέχθηκε το καλύτερο σύνολο των συντελεστών συγκρίνοντας τους συντελεστές του προκλητού δυναμικού κατά μέση τιμή, στο οποίο έχουν αναδειχθεί οι κορυφές (έχει γίνει μια στοιχειώδης αποθορυβοποίηση λόγω του ότι λήφθηκε η μέση τιμή), με τους συντελεστές της μεμονωμένης δοκιμής.

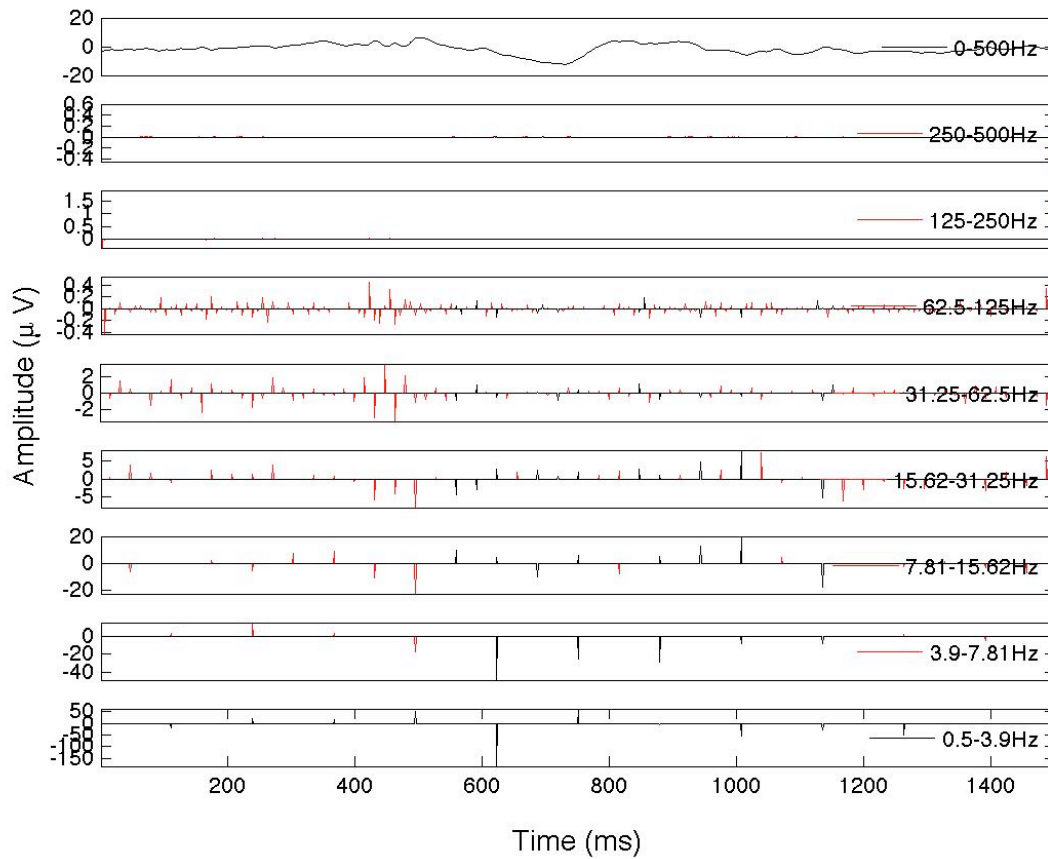
Η εφαρμογή αποθορυβοποίησης (denoising) που περιγράφεται παρακάτω, δεν ξεχωρίζει εντελώς το ΗΕΓ από τις δραστηριότητες που οφείλονται στο προκλητό δυναμικό, διότι ορισμένες συνεχείς ταλαντώσεις ΗΕΓ γραφήματος μπορεί να εμφανίζονται στο ίδιο χρονικό εύρος και με την ίδια σύνθεση συχνότητας, όπως και τα προκλητά δυναμικά.

Στο σχήμα 4-3 παρουσιάζεται η διαδικασία της αποθορυβοποίησης ενός προκλητού δυναμικού, το οποίο προέκυψε ύστερα από υπολογισμό της μέσης τιμής όλων των μεμονωμένων δοκιμών. Τα μαύρα ίχνη στο άνω τμήμα του σχήματος 4-3 (multiresolution decomposition), δείχνουν τους συντελεστές που διατηρήθηκαν για την ανασυγκρότηση του

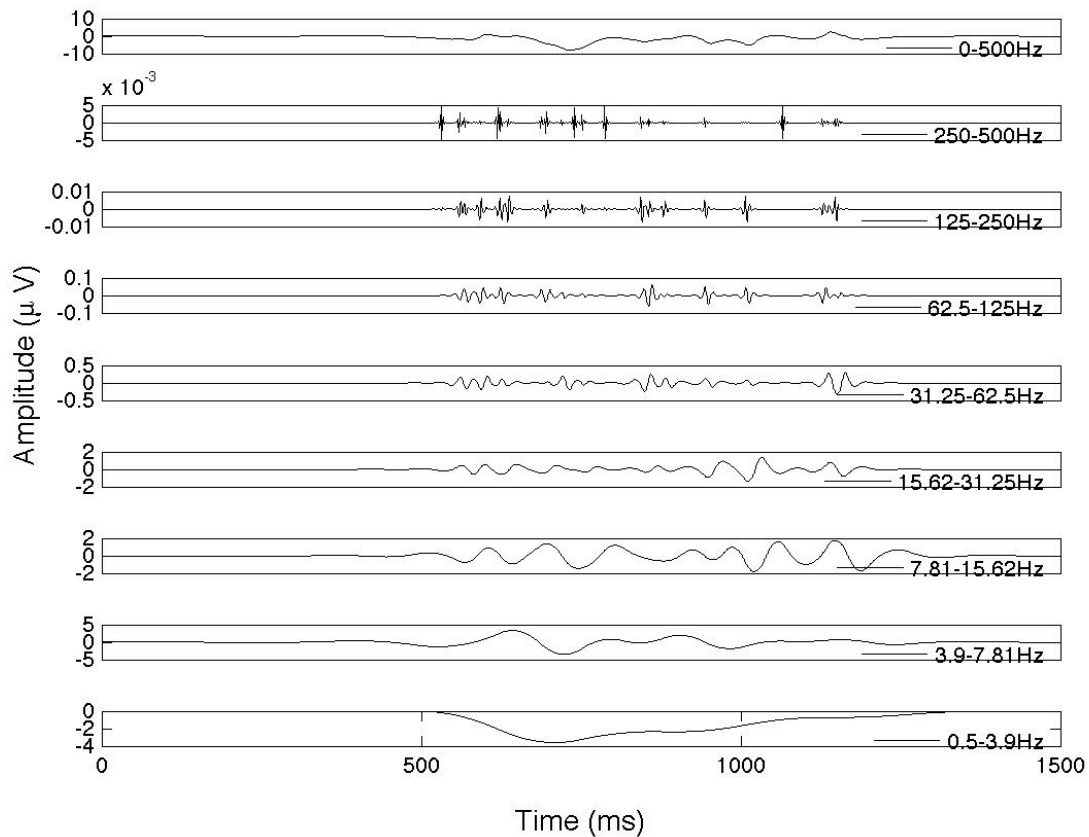
αποθορυβοποιημένου προκλητού δυναμικού, καθώς οι μαύρες καμπύλες στο κάτω τμήμα του σχήματος 4-3 (multiresolution reconstruction), δείχνουν τη συνεισφορά κάθε επίπεδου που λαμβάνεται με την εξάλειψη όλων των άλλων συντελεστών. Κάθε κλίμακα συντελεστών, έχει επιλεγθεί ώστε να καλύψει ένα εύλογο χρονικό εύρος, μέσα στο οποίο αναμένεται να συμβεί ένα προκλητό δυναμικό, καθιστώντας έτσι την μέθοδο ευαίσθητη στις διακυμάνσεις της λανθάνουσας καθυστέρησης μεταξύ των δοκίμων.

Στην τελική ανασυγκρότηση (διαδικασία ανακατασκευής της αποθορυβοποίησης) του σήματος κατά μέσο όρο, το αποθορυβοποιημένο σήμα δεν διαφέρει πολύ από το αρχικό μέσο όρο του προκλητού δυναμικού (σχήμα 4-3). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, μετά από ένα μέσο όρο 52 δοκιμών, οι ταλαντώσεις του ΗΕΓ του υπόβαθρου έχουν σχεδόν ακυρωθεί και έτσι το αρχικό σήμα δεν χρειάζεται αποθορυβοποίηση. Αυτό δεν συμβαίνει σε επίπεδο μεμονωμένης δοκιμής. Στο σχήμα 4-4 παρουσιάζεται η αποθορυβοποίηση ενός σήματος μεμονωμένης δοκιμής. Η διαδικασία εξηγείται αναλυτικά μετά τα σχήματα 4-3 και 4-4.

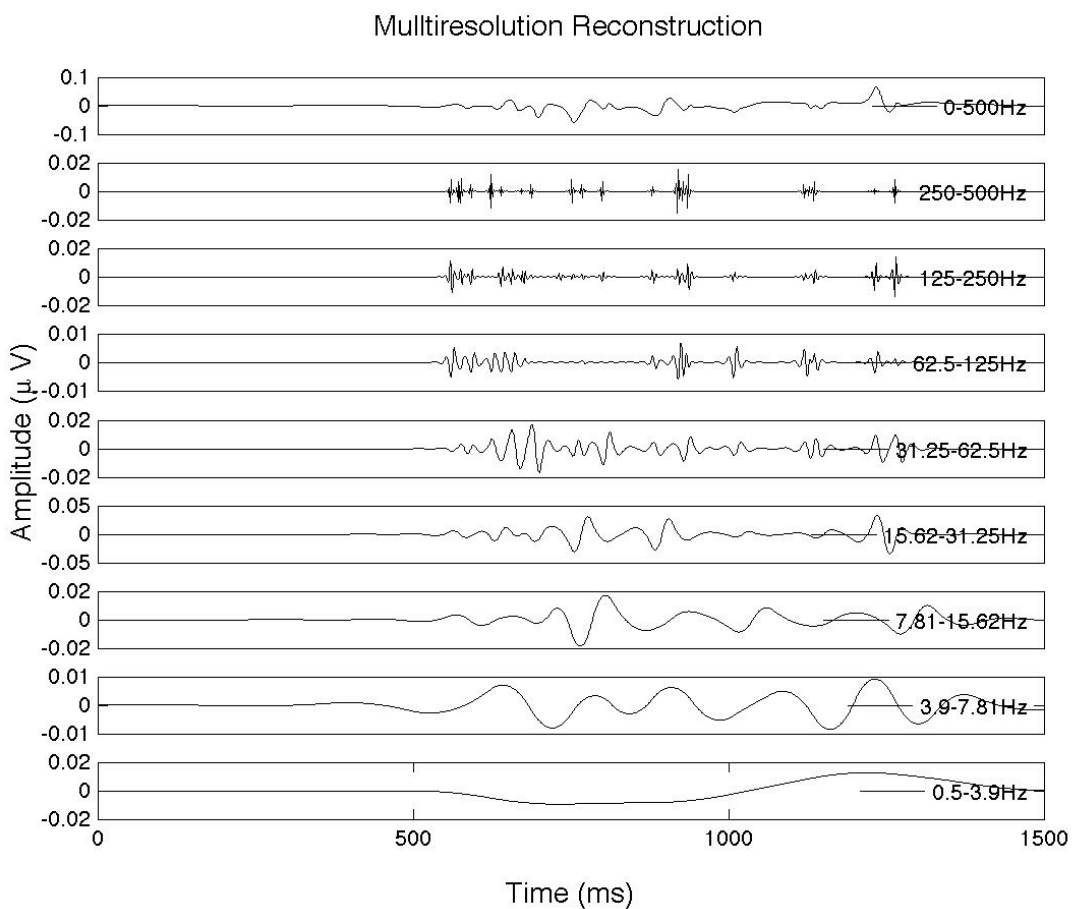
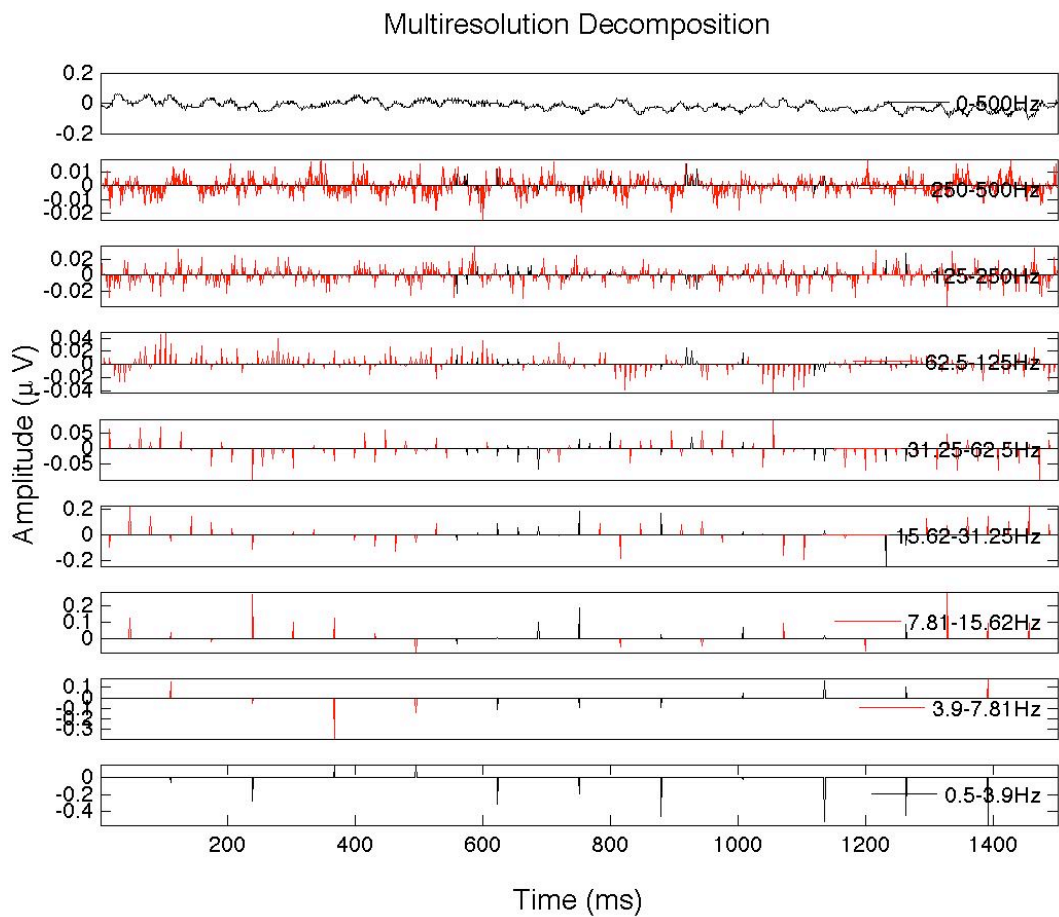
### Multiresolution Decomposition



### Multiresolution Reconstruction



Σχήμα 4-3 Διαδικασία αποθρομβολοποίησης Αρχικά το σήμα αποσυντίθεται (πάνω) στις διάφορες συχνοτικές συνιστώσες του (κόκκινο χρώμα) και στη συνέχεια ανακατασκευάζεται (κάτω) χρησιμοποιώντας μόνο τις συνιστώσες ενδιαφέροντος (μαύρο χρώμα). Απαγωγή Pz, 1<sup>η</sup> δοκιμή.



Σχήμα 4-4. Διαδικασία αποθορυβοποίησης Αρχικά το σήμα αποσυντίθεται (πάνω) στις διάφορες συχνοτικές συνιστώσες του (κόκκινο χρώμα) και στη συνέχεια ανακατασκευάζεται (κάτω) χρησιμοποιώντας μόνο τις συνιστώσες ενδιαφέροντος (μαύρο χρώμα). Απαγωγή Pz, 2<sup>η</sup> δοκιμή.

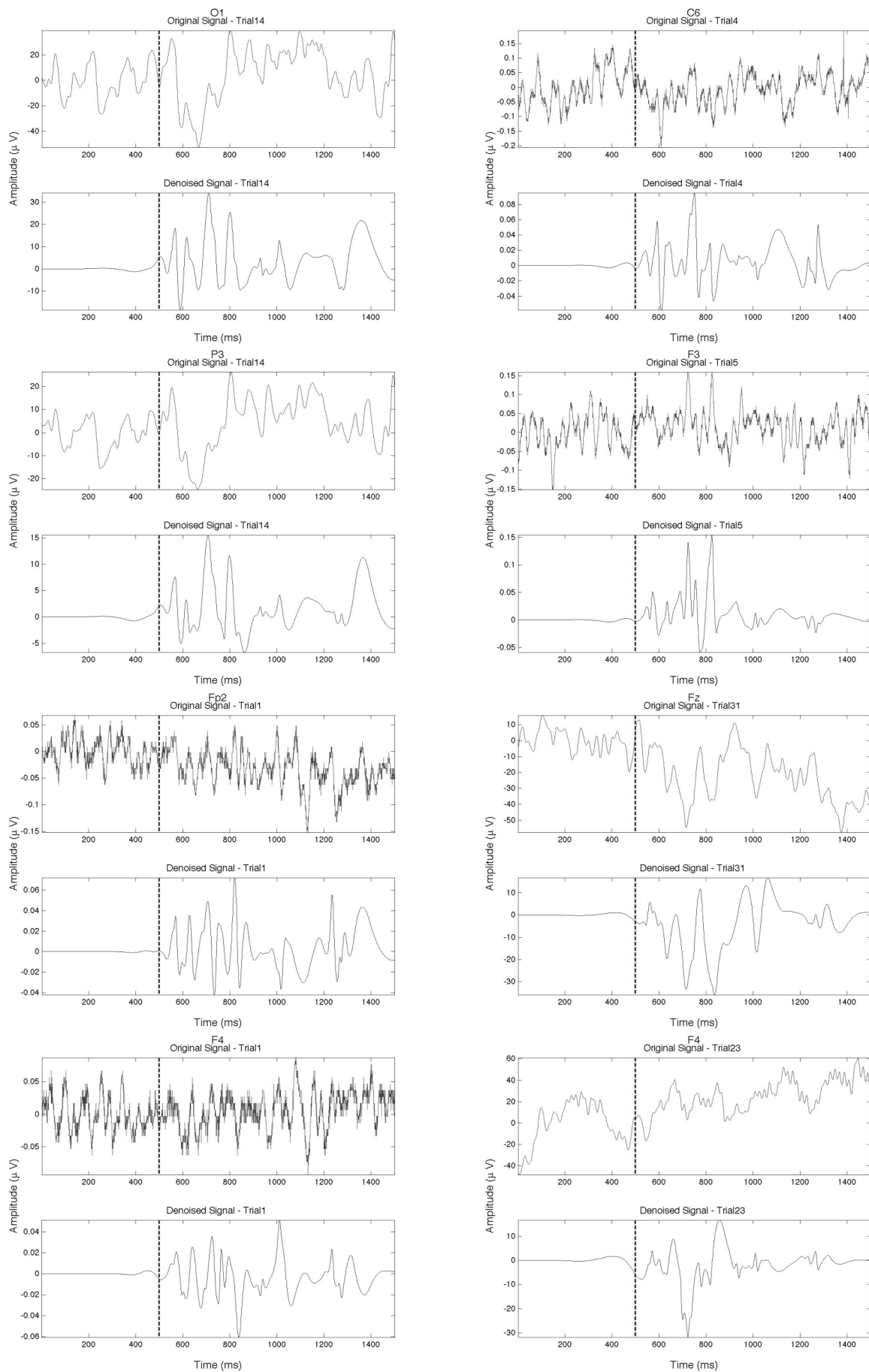


Αφού καθοριστούν οι συντελεστές που μας ενδιαφέρουν από το μέσο όρο του προκλητού δυναμικού, μπορεί να εφαρμοστεί η ίδια διαδικασία για κάθε μία μεμονωμένη δοκιμή, αποδυναμώνοντας έτσι την συνεισφορά της δραστηριότητας του υποβάθρου που δεν σχετίζεται με τα προκλητά δυναμικά. Δηλαδή ακυρώνεται η δραστηριότητα που δεν περιλαμβάνεται στον ίδιο χρονικό διάστημα, η οποία στο σχήμα 4-4 (άνω τμήμα) παρουσιάζεται με τους συντελεστές ανοιχτού χρώματος. Όπως επίσης ακυρώνεται και η δραστηριότητα που δεν έχει την ίδια σύνθεση συχνότητας με το προκλητό δυναμικό, δηλαδή δραστηριότητα σε εύρος συχνοτήτων 62,5-500Hz (οι συντελεστές λεπτομέρειας D1 έως D4 των επίπεδων αποσύνθεσης μηδενίζονται (κεφ 3.4.4)). Συνοπτικά, η μέθοδος αποτελείται από τα εξής βήματα:

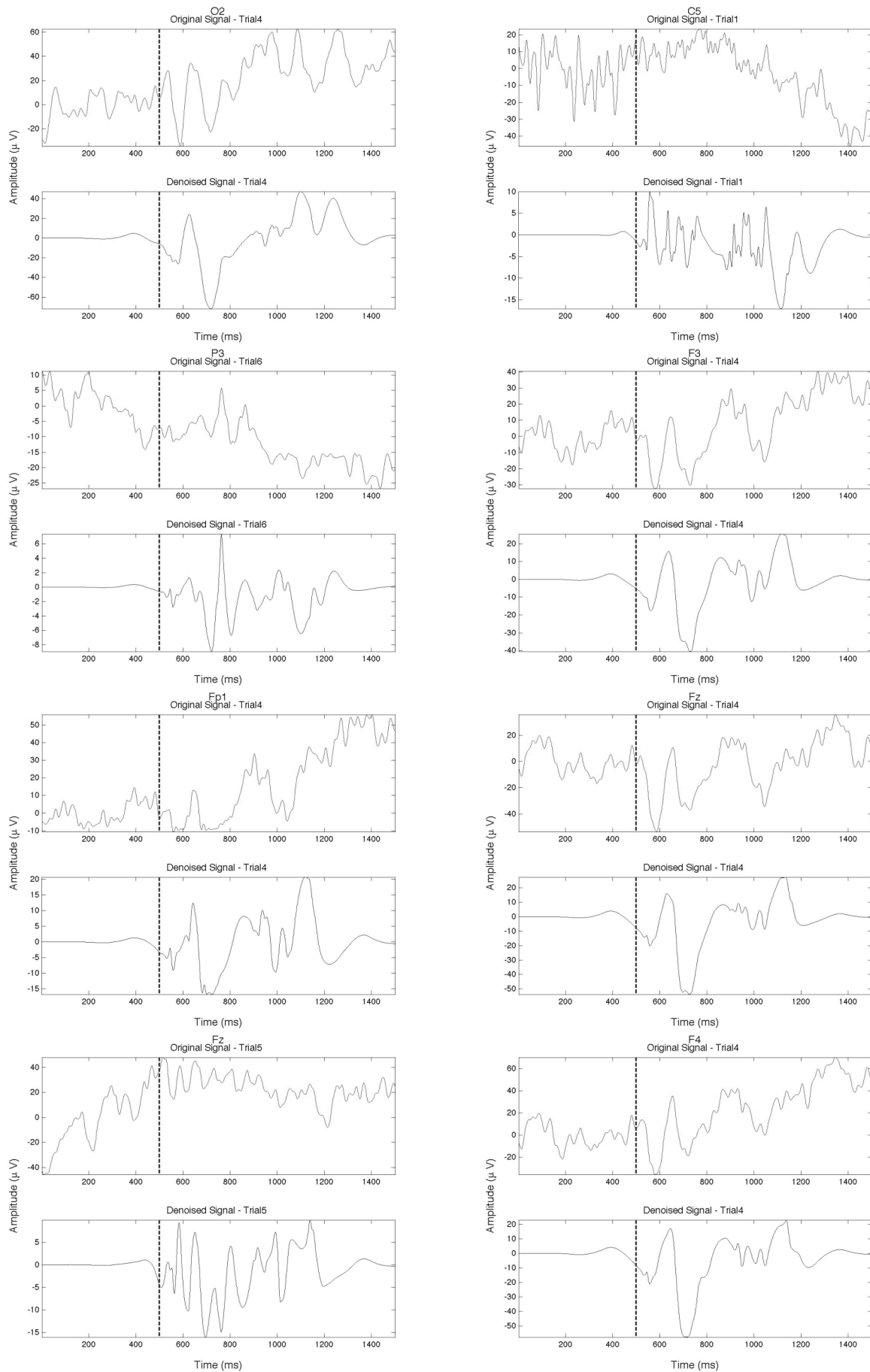
- 1) Ο μέσος όρος του προκλητού δυναμικού αποσυντίθεται χρησιμοποιώντας αποσύνθεση κυματιδίου.
- 2) Οι συντελεστές του κυματιδίου που δεν συσχετίζονται με το προκλητό δυναμικό εντοπίζονται και μηδενίζονται.
- 3) Ο αντίστροφος μετασχηματισμός εφαρμόζεται, ώστε να ληφθεί ένα αποθορυβοποιημένο σήμα.
- 4) Η προηγούμενη διαδικασία εφαρμόζεται στη συνέχεια στις μεμονωμένες δοκιμές.

Παρακάτω παρουσιάζονται ΗΕΓ καταγραφές πριν και μετά την αποθορυβοποίηση.. Παρατηρούμε ότι η εγκεφαλική δραστηριότητα που δεν σχετίζεται με τα προκλητά δυναμικά, τόσο συχνοτικά (θόρυβος λόγω παρασίτων, συχνότητες 500-60Hz), όσο και χρονικά (δραστηριότητα πριν τα 550ms) έχει απορριφθεί.

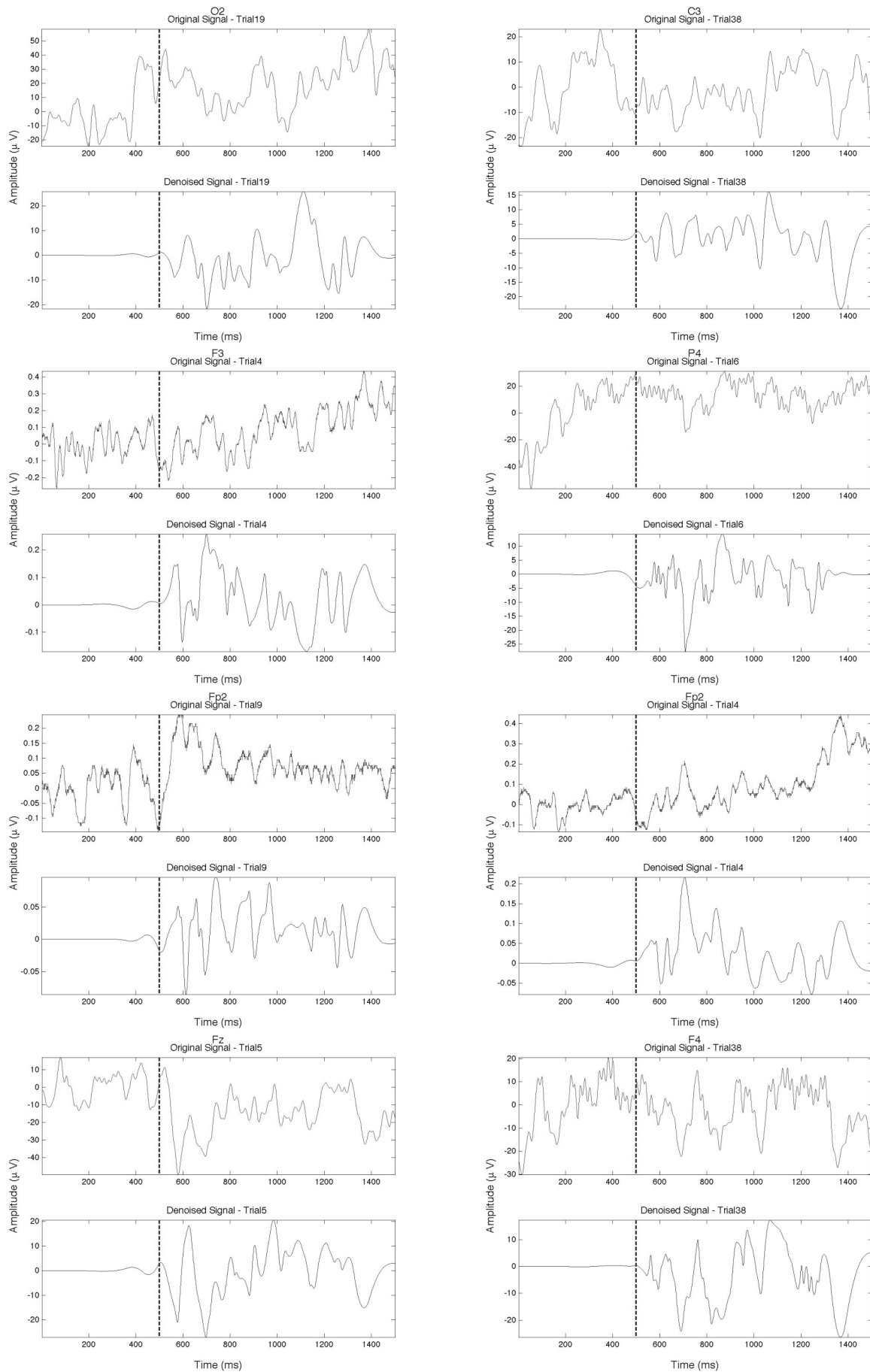
Επίσης, τα σήματα απαγωγών, όπως οι απαγωγές O1, O2 του ινιακού λοβού που βρίσκονται κοντά τον κροταφικό λοβό (πεδία 41, 42 κατα Brodmann), έχουν πιο ευκρινείς κορυφές προκλητών δυναμικών (λιγότερος επιπρόσθετος θόρυβος λόγω εγκεφαλικής δραστηριότητας του υποβάθρου), επειδή βρίσκονται πιο κοντά στην περιοχή που γίνεται η λήψη των ακουστικών ερεθισμάτων. Το ίδιο, αλλά σε μικρότερο βαθμό, συμβαίνει και σε απαγωγές πάνω από τον βρεγματικό λοβό (Cz, C3, P3 και P4) επειδή βρίσκονται πιο κοντά στην περιοχή που γίνεται η επεξεργασία των ακουστικών ερεθισμάτων και επειδή σχετίζονται έμμεσα με το ερέθισμα. Ωστόσο η αποθορυβοποίηση ανέδειξε τις κορυφές των προκλητών δυναμικών, λόγω του γεγονότος ότι αρκετές κορυφές των προκλητών δυναμικών δεν ήταν εμφανείς, εξαιτίας της αλλοίωσης που προκάλεσε η εγκεφαλική δραστηριότητα του υποβάθρου.



**Σχήμα 4-5** Μεμονωμένες ΗΕΓ καταγραφές πριν και μετά την αποθρομβοποίηση για τις απαγωγές O1, C5 P3 Fz, F4, F3 και Fp2.



**Σχήμα 4-6** Μεμονωμένες ΗΕΓ καταγραφές πριν και μετά την αποθρομβοποίηση για τις απαγωγές O2, C5, P3, Fz, F4, F3 και Fp1.



**Σχήμα 4-7** Μεμονωμένες ΗΕΓ καταγραφές πριν και μετά την αποθρομβοποίηση για τις απαγωγές O2, C3, P4, Fz, F4, F3 και Fp2.

## 4.2. Αποτελέσματα

Μετά την διαδικασία της αποθρομβοποίησης, έγινε εκτίμηση του πλάτους των κορυφώσεων (P50, N100, N200, P200, P300, P600) ώστε να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της ομάδας (υγιών ή δυσλεκτικών παιδιών) των σειρών δοκιμών και των τεστ δοκιμών (όπως ορίζονται παρακάτω) στην διαδικασία της εξοικείωσης.

Η επιτυχία ενός στατιστικού τεστ, συνίσταται στην κατάλληλη επιλογή του επιπέδου εμπιστοσύνης και της στατιστικής υπόθεσης. Στατιστική υπόθεση, είναι μια παραδοχή ή μια δήλωση, σχετικά με ένα ή περισσότερα πιθανοσύνολα, η οποία μπορεί πράγματι, είτε να είναι αληθής, είτε όχι. Ο στόχος ενός στατιστικού τεστ, είναι να διαπιστώσει, είτε ότι η υπόθεση είναι αληθής, οπότε γίνεται αποδεκτή, είτε ότι είναι ψευδής, οπότε απορρίπτεται και όλα αυτά βέβαια με κάποια πιθανότητα, δηλαδή σε κάποιο επίπεδο εμπιστοσύνης ή σημαντικότητας (significance-sig ), που προεπιλέγεται. Η υπόθεση που ελέγχεται ονομάζεται μηδενική υπόθεση ( $H_0$ ) ενώ κάθε άλλη υπόθεση που θα μπορούσε να γίνει σχετικά με το υπόψη πιθανοσύνολο ονομάζεται εναλλακτική υπόθεση ( $H_a$ ) [15].

Για τον έλεγχο της βραχυπρόθεσμης/μακροπρόθεσμης ευαισθητοποίησης και της επανα-ευαισθητοποίησης των μαρτύρων διατυπώθηκαν οι παρακάτω μηδενικές υποθέσεις για κάθε συστατικό των προκλητών δυναμικών:

- Μηδενική Υπόθεση 1 ( $H_{01}$ ): Η βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση για τις κορυφές P50, N100, N200, P200, P300 και P600 είναι ίδια τόσο για τους υγιείς όσο και για τους δυσλεκτικούς μάρτυρες.
- Εναλλακτική Υπόθεση 1 ( $H_{a1}$ ): Η βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση για τις κορυφές P50, N100, N200, P200, P300 και P600 δεν είναι ίδια για τους υγιείς και τους δυσλεκτικούς μάρτυρες.
- Μηδενική Υπόθεση 2 ( $H_{02}$ ): Η μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση για τις κορυφές P50, N100, N200, P200, P300 και P600 είναι ίδια τόσο για τους υγιείς όσο και για τους δυσλεκτικούς μάρτυρες.
- Εναλλακτική Υπόθεση 2 ( $H_{a2}$ ): Η μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση για τις κορυφές P50, N100, N200, P200, P300 και P600 δεν είναι ίδια για τους υγιείς και τους δυσλεκτικούς μάρτυρες.

- Μηδενική Υπόθεση 3 ( $H_03$ ): Η επανα-ευαισθητοποίηση για τις κορυφές P50, N100, N200, P200, P300 και P600 είναι ίδια τόσο για τους υγιείς όσο και για τους δυσλεκτικούς μάρτυρες.
- Εναλλακτική Υπόθεση 3 ( $H_{a3}$ ): Η επανα-ευαισθητοποίησης για τις κορυφές P50, N100, N200, P200, P300 και P600 δεν είναι ίδια για τους υγιείς και τους δυσλεκτικούς μάρτυρες.

Οι παραπάνω έλεγχοι υποθέσεων, έγιναν με χρήση του στατιστικού τεστ: ανάλυση διασποράς κατά παράγοντες (two-way ANOVA). Η ανάλυση διακύμανσης, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της στατιστικής σημαντικότητας των διαφορών των μέσων όρων περισσότερων από δύο ομάδων δειγμάτων. Βασική αρχή της ανάλυσης διακύμανσης, είναι ότι η συνολική διασπορά που παρατηρείται σε μία μέτρηση, προέρχεται από δύο πηγές:

- Η διακύμανση μεταξύ των ομάδων (*M.O.*). Για κάθε ομάδα-δείγμα της έρευνας προκύπτει διαφορετικός μέσος όρος. Όσο περισσότερο διαφέρουν, μεταβάλλονται οι μετρήσεις μεταξύ των διαφορετικών ομάδων, τόσο πιθανότερο είναι να απορρίψουμε τη μηδενική υπόθεση.
- Η διακύμανση εντός των ομάδων (*E.O.*). Από όλα τα υποκείμενα της ίδιας ομάδας δεν λαμβάνουμε την ίδια τιμή. Υπάρχουν ατομικές διαφορές. Αυτή η πηγή διαφοροποίησης των μετρήσεων αναφέρεται και ως σφάλμα. Όσο μικρότερο είναι το σφάλμα της μέτρησης, τόσο πιθανότερο είναι να απορρίψουμε τη μηδενική υπόθεση.

Η πολυμεταβλητή ανάλυση διακύμανσης (MANOVA) αποτελεί προέκταση της απλής, μονομεταβλητής ανάλυσης διακύμανσης αφού στο μοντέλο περιλαμβάνονται περισσότερες από μία εξαρτημένες μεταβλητές. Η πολυμεταβλητή ανάλυση διακύμανσης, δημιουργεί μία νέα εξαρτημένη μεταβλητή, με βάση το γραμμικό συνδυασμό όλων των εξαρτημένων μεταβλητών του μοντέλου, η οποία μεγιστοποιεί κατα το δυνατόν τις διαφορές των μέσων όρων, μεταξύ των ομάδων-επιπέδων της ανεξάρτητης μεταβλητή [16].

Ο 1<sup>ος</sup> έλεγχος αντανακλάται στην αλληλεπίδραση της ομάδας και των τεστ δοκιμών, ο 2<sup>ος</sup> στην αλληλεπίδραση της ομάδας και της σειράς δοκιμών και ο 3<sup>ος</sup> στην αλληλεπίδραση της ομάδας των τεστ δοκιμών και της σειράς δοκιμών. Στην περίπτωση που η σημαντικότητα (significance-sig.) βρεθεί μικρότερη του 0.05 τότε απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση.

Ο αριθμός των δοκιμών σε κάθε σειρά δοκιμών μειώθηκε σε τρεις για την απλοποίηση των στατιστικών τεστ. Έτσι, τα νέα τεστ δοκιμών έχουν ως εξής:

- 1) Τεστ Δοκιμών 1: μέσος όρος δοκιμών 1 έως 6
- 2) Τεστ Δοκιμών 2: μέσος όρος δοκιμών 7 έως 15
- 3) Τεστ Δοκιμών 3: μέσος όρος δοκιμών 16 έως 26

Στον έλεγχο υποθέσεων για κάθε ομάδα ξεχωριστά τόσο οι υγιείς όσο και οι

δυσλεκτικοί παρουσίασαν βραχυπρόθεσμη, μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση και επανα-ευαισθητοποίηση. Παρόλα αυτά, ο βαθμός ευαισθητοποίησης φαίνεται να διαφέρει στατιστικά για τις 6 κορυφές ενδιαφέροντος και τις κάποιες από τις απαγωγές (βλ. Πίνακες 4-3 έως 4-20). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με την σειρά που εξάγονται οι κορυφές (P50, N100, P200, P300 και P600) καθώς και με την σειρά που παρουσιάζεται η ευαισθητοποίηση.

**Πίνακας 4-3 P50 - Βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα (Sig.)
Ομάδα και Τεστ Δοκιμών	Fp1	.087	.917
	<b>F3</b>	6.555	.001
	C5	.314	.730
	C3	.708	.493
	<b>Fp2</b>	11.839	.000
	F4	2.419	.089
	C6	.927	.396
	C4	.097	.907
	O1	1.076	.341
	O2	.286	.751
	P4	1.304	.272
	P3	1.846	.158
	Pz	2.937	.053
	Cz	2.017	.133
	Fz	2.851	.058

**Πίνακας 4-4: P50 - Μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα (Sig.)
Ομάδα και Σειρά Δοκιμών	Fp1	.000	.987
	F3	8.575	.003
	C5	.220	.639
	C3	5.592	.018
	Fp2	14.733	.000
	F4	3.888	.049
	C6	.193	.660
	C4	.434	.510
	O1	10.666	.001
	O2	1.647	.199
	P4	.314	.575
	P3	.320	.572
	Pz	4.173	.041
	Cz	.856	.355
	Fz	.601	.438

**Πίνακας 4-5: P50 – Επανα- ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα (Sig.)
Ομάδα, τεστ δοκιμών και σειρά δοκιμών	Fp1	.010	.990
	F3	2.125	.120
	C5	.394	.674
	C3	.563	.569
	Fp2	6.749	.001
	F4	.979	.376
	C6	.016	.984
	C4	.184	.832
	O1	.807	.446
	O2	.984	.374
	P4	.230	.795
	P3	.374	.688
	Pz	.617	.540
	Cz	.049	.952
	Fz	.545	.580



**Πίνακας 4-6: N100 - Βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα (Sig.)
Ομάδα και Τεστ Δοκιμών	Fp1	.255	.775
	<b>F3</b>	5.309	.005
	C5	.234	.791
	C3	.858	.424
	<b>Fp2</b>	7.675	.000
	F4	2.759	.064
	C6	2.178	.113
	C4	.839	.432
	O1	.348	.706
	O2	.063	.939
	P4	1.916	.147
	<b>P3</b>	3.082	.046
	Pz	2.939	.053
	Cz	2.781	.062
	<b>Fz</b>	4.500	.011

**Πίνακας 4-7: N100 - Μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα
Ομάδα και Σειρά Δοκιμών	Fp1	.784	.376
	<b>F3</b>	13.193	.000
	C5	.000	.992
	<b>C3</b>	4.370	.037
	<b>Fp2</b>	15.366	.000
	<b>F4</b>	7.642	.006
	C6	.005	.945
	C4	.190	.663
	<b>O1</b>	6.894	.009
	O2	1.427	.232
	P4	.201	.654
	P3	.001	.970
	<b>Pz</b>	12.128	.001
	Cz	1.083	.298
	Fz	.296	.586

**Πίνακας 4-8: N100 – Επανα-ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα (Sig.)
Ομάδα, τεστ δοκιμών και σειρά δοκιμών	Fp1	.461	.631
	<b>F3</b>	6.365	.002
	C5	.230	.794
	C3	1.010	.364
	<b>Fp2</b>	5.071	.006
	F4	.898	.407
	C6	.094	.911
	C4	.499	.607
	O1	.398	.672
	O2	.385	.680
	P4	.756	.470
	P3	.126	.882
	Pz	.954	.385
	Cz	.427	.653
	Fz	.576	.562

**Πίνακας 4-9: P200 - Βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα (Sig.)
Ομάδα και Τεστ Δοκιμών	Fp1	.139	.871
	<b>F3</b>	5.215	.005
	C5	.494	.610
	C3	1.759	.172
	<b>Fp2</b>	5.156	.006
	F4	2.347	.096
	C6	1.658	.191
	C4	.727	.483
	O1	.988	.372
	O2	.008	.992
	P4	2.681	.069
	<b>P3</b>	5.700	.003
	<b>Pz</b>	5.678	.003
	<b>Cz</b>	4.083	.017
	<b>Fz</b>	3.809	.022

**Πίνακας 4-10: P200 - Μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα
Ομάδα και Σειρά Δοκιμών	Fp1	.116	.733
	<b>F3</b>	6.601	.010
	C5	1.743	.187
	C3	.228	.633
	<b>Fp2</b>	15.536	.000
	<b>F4</b>	6.658	.010
	C6	.097	.756
	C4	.436	.509
	<b>O1</b>	10.077	.002
	O2	.002	.960
	P4	.039	.844
	P3	3.352	.067
	Pz	1.551	.213
	Cz	3.704	.054
	Fz	1.655	.198

**Πίνακας 4-11: P200 – Επανα-ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα (Sig.)
Ομάδα, τεστ δοκιμών και σειρά δοκιμών	Fp1	.410	.664
	<b>F3</b>	4.763	.009
	C5	.648	.523
	C3	1.258	.284
	<b>Fp2</b>	9.874	.000
	F4	2.966	.052
	C6	1.038	.354
	C4	.745	.475
	O1	1.288	.276
	O2	1.957	.141
	P4	2.643	.071
	P3	.345	.708
	Pz	1.343	.261
	Cz	1.774	.170
	Fz	.664	.515

**Πίνακας 4-12: N200 - Βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα (Sig.)
Ομάδα και Τεστ Δοκιμών	Fp1	2.054	.128
	<b>F3</b>	5.756	.003
	C5	.368	.692
	C3	2.148	.117
	Fp2	2.954	.052
	F4	2.260	.104
	C6	2.301	.100
	C4	.695	.499
	O1	2.597	.075
	O2	.192	.825
	P4	2.377	.093
	<b>P3</b>	4.828	.008
	<b>Pz</b>	7.220	.001
	<b>Cz</b>	5.314	.005
	<b>Fz</b>	5.281	.005

**Πίνακας 4-13: N200 - Μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα
Ομάδα και Σειρά Δοκιμών	Fp1	2.393	.122
	<b>F3</b>	12.821	.000
	C5	.222	.638
	C3	1.766	.184
	<b>Fp2</b>	15.725	.000
	<b>F4</b>	7.245	.007
	C6	.589	.443
	C4	.172	.679
	<b>O1</b>	6.316	.012
	O2	.384	.535
	P4	.289	.591
	P3	.106	.745
	<b>Pz</b>	10.115	.001
	<b>Cz</b>	4.335	.037
	Fz	1.685	.194

**Πίνακας 4-14: N200 – Επανα-ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα (Sig.)
Ομάδα, τεστ δοκιμών και σειρά δοκιμών	Fp1	.271	.762
	<b>F3</b>	5.618	.004
	C5	.918	.400
	C3	1.706	.182
	<b>Fp2</b>	10.250	.000
	F4	2.276	.103
	C6	1.370	.254
	C4	1.211	.298
	O1	1.800	.165
	O2	1.155	.315
	<b>P4</b>	4.048	.018
	P3	.015	.985
	Pz	1.777	.169
	Cz	2.969	.052
	Fz	1.857	.156

**Πίνακας 4-15: P300 - Βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα
Ομάδα και Δοκιμές	Fp1	.454	.635
	<b>F3</b>	8.213	.000
	C5	.674	.510
	<b>C3</b>	4.988	.007
	<b>Fp2</b>	5.614	.004
	<b>F4</b>	8.420	.000
	<b>C6</b>	5.614	.004
	C4	1.834	.160
	<b>O1</b>	3.592	.028
	O2	1.295	.274
	<b>P4</b>	5.318	.005
	<b>P3</b>	7.611	.001
	<b>Pz</b>	9.028	.000
	<b>Cz</b>	10.910	.000
	<b>Fz</b>	8.564	.000

**Πίνακας 4-16: P300 - Μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα
Ομάδα και Σειρά Δοκιμών	Fp1	.668	.414
	<b>F3</b>	12.296	.000
	C5	.195	.659
	C3	2.929	.087
	<b>Fp2</b>	21.153	.000
	<b>F4</b>	8.026	.005
	C6	.316	.574
	C4	2.377	.123
	<b>O1</b>	11.425	.001
	O2	.433	.511
	P4	.613	.434
	P3	.053	.818
	<b>Pz</b>	11.444	.001
	<b>Cz</b>	5.868	.015
	<b>Fz</b>	5.316	.021

**Πίνακας 4-17: P300 – Επανα-ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα (Sig.)
Ομάδα, τεστ δοκιμών και σειρά δοκιμών	Fp1	.143	.867
	<b>F3</b>	6.182	.002
	C5	2.139	.118
	C3	2.649	.071
	<b>Fp2</b>	10.246	.000
	F4	1.765	.171
	C6	1.798	.166
	C4	.203	.816
	O1	1.345	.261
	O2	2.169	.114
	<b>P4</b>	3.445	.032
	P3	.191	.826
	<b>Pz</b>	4.411	.012
	Cz	2.441	.087
	Fz	1.129	.323

**Πίνακας 4-18: P600 - Βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα
Ομάδα και Δοκιμές	Fp1	1.813	.163
	F3	5.000	.007
	C5	.688	.502
	C3	6.077	.002
	Fp2	6.256	.002
	F4	4.005	.018
	C6	2.942	.053
	C4	3.273	.038
	O1	2.112	.121
	O2	.061	.941
	P4	5.689	.003
	P3	6.231	.002
	Pz	3.269	.038
	Cz	7.589	.001
	Fz	5.928	.003

**Πίνακας 4-19: P600 - Μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα
Ομάδα και Σειρά Δοκιμών	Fp1	.800	.371
	F3	5.923	.015
	C5	2.123	.145
	C3	.209	.648
	Fp2	11.811	.001
	F4	.586	.444
	C6	.024	.877
	C4	.023	.881
	O1	19.715	.000
	O2	3.518	.061
	P4	.833	.362
	P3	.082	.775
	Pz	6.863	.009
	Cz	.343	.558
	Fz	.116	.733

**Πίνακας 4-20: P600 – Επανα-ευαισθητοποίηση**

Αλληλοεπιδράσεις	Απαγωγή	Στατιστικοί Δείκτες	
		Λόγος F	Σημαντικότητα (Sig.)
Ομάδα, τεστ δοκιμών και σειρά δοκιμών	Fp1	.312	.732
	<b>F3</b>	6.280	.002
	C5	1.603	.201
	C3	1.857	.156
	<b>Fp2</b>	9.785	.000
	F4	1.476	.229
	C6	.937	.392
	C4	.430	.650
	O1	.293	.746
	O2	.287	.751
	P4	.941	.390
	P3	.067	.935
	<b>Pz</b>	3.368	.035
	Cz	.540	.583
	Fz	.274	.760

Οι διαφορές ανάμεσα στις δυο ομάδες για την βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση στις περιοχές ενδιαφέροντος P50 (Πίνακας 4-3), N100 (Πίνακας 4-6), P200 (Πίνακας 4-9), N200 (Πίνακας 4-12), P300 (Πίνακας 4-14) και P600 (Πίνακας 4-18) σημειώθηκαν στις απαγωγές F3, Fp2, στις απαγωγές F3, Fp2, P3, Fz, στις απαγωγές F3, Fp2, P3, Pz, Cz, Fz, στις απαγωγές F3, P3, Pz, Cz, Fz, στις απαγωγές F3, C3, Fp2, F4, C6, P4, P3, Pz, Cz, Fz και στις απαγωγές F3, C3, Fp2, F4, C4, P4, P3, Pz, Cz, Fz αντίστοιχα.

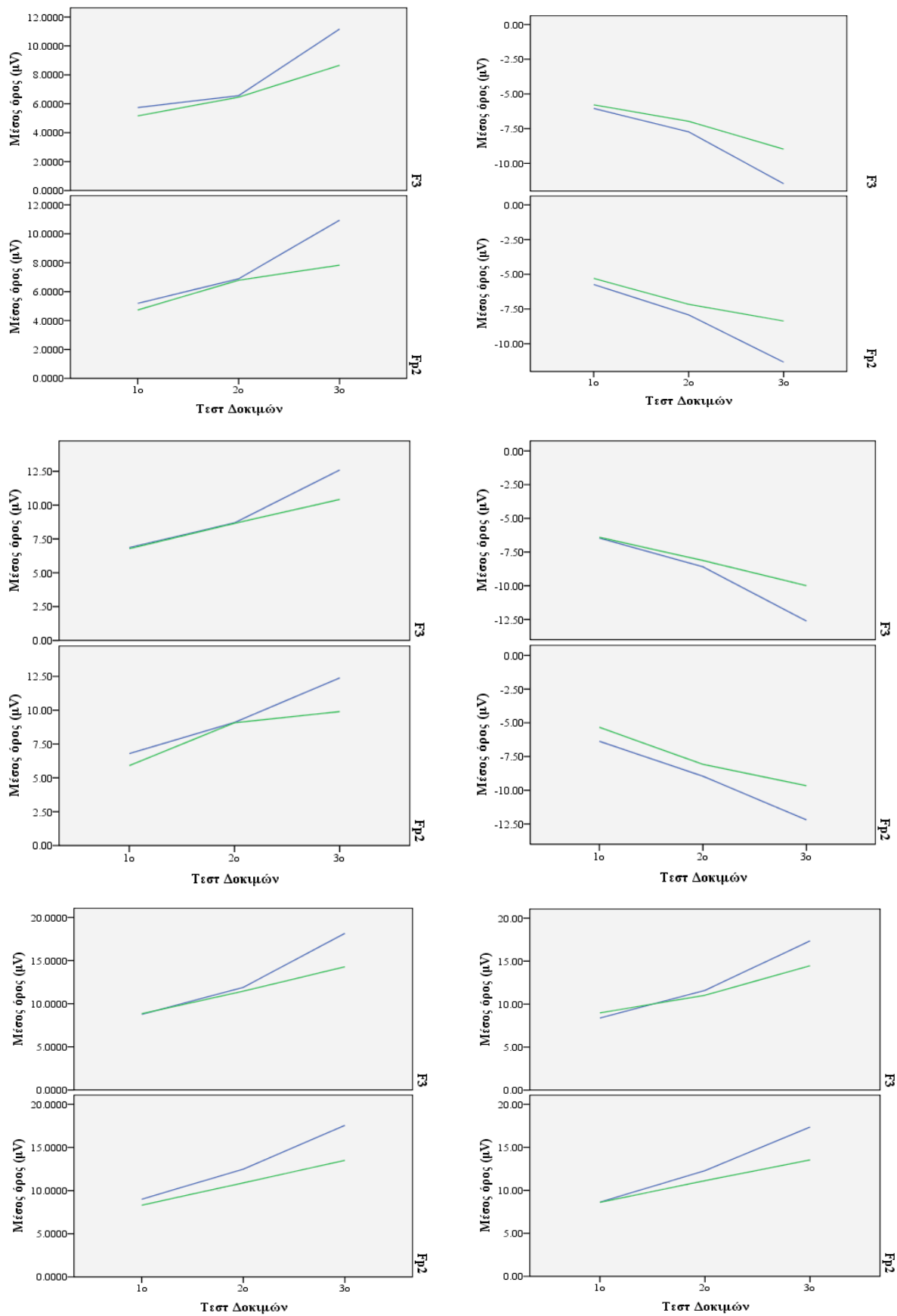
Επίσης, παρατηρείται ότι στις περιοχές P50 και N100 οι περισσότερες διαφορές σημειώθηκαν σε απαγωγές που αντιστοιχούν στο κροταφιαίο λοβό του εγκεφάλου (F3 και Fp2). Διαφορές που αντιστοιχούν στον κεντρικό λοβό σημειώθηκαν για τις περιοχές ενδιαφέροντος P200, N200, P300 και P600 (C4 ή C6 ή Cz). Ειδικότερα, με χρήση της τεχνικής πολλαπλών συγκρίσεων εξετάστηκε η διαφορά στον βαθμό της ευαισθητοποίησης μεταξύ των ομάδων σε σχέση με τα τεστ δοκιμών. Η ομάδα των υγιών μαρτύρων σημείωσε μεγαλύτερο πλάτος στο 3<sup>ο</sup> τεστ δοκιμών σε σχέση με την ομάδα των δυσλεκτικών μαρτύρων. Στο σχήμα 4-8 παρουσιάζονται μόνο οι απαγωγές F3 και Fp2 σε κάθε περιοχή ενδιαφέροντος.

Οι διαφορές ανάμεσα στις δυο ομάδες για την μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση στις περιοχές ενδιαφέροντος P50 (Πίνακας 4-4), N100 (Πίνακας 4-7), P200 (Πίνακας 4-9), N200 (Πίνακας 4-13), P300 (Πίνακας 4-16) και P600 (Πίνακας 4-19) σημειώθηκαν στις απαγωγές F3, C3, Fp2, F4, O1, Pz, στις απαγωγές F3, C3, Fp2, F4, O1, Pz, στις απαγωγές F3, Fp2, F4, O1, στις απαγωγές F3, Fp2, F4, O1, Pz, Cz, στις απαγωγές F3, Fp2, F4, O1, Pz, Cz, Fz και στις απαγωγές F3, Fp2, O1, O2, Pz αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι οι απαγωγές F3, Fp2 και Pz

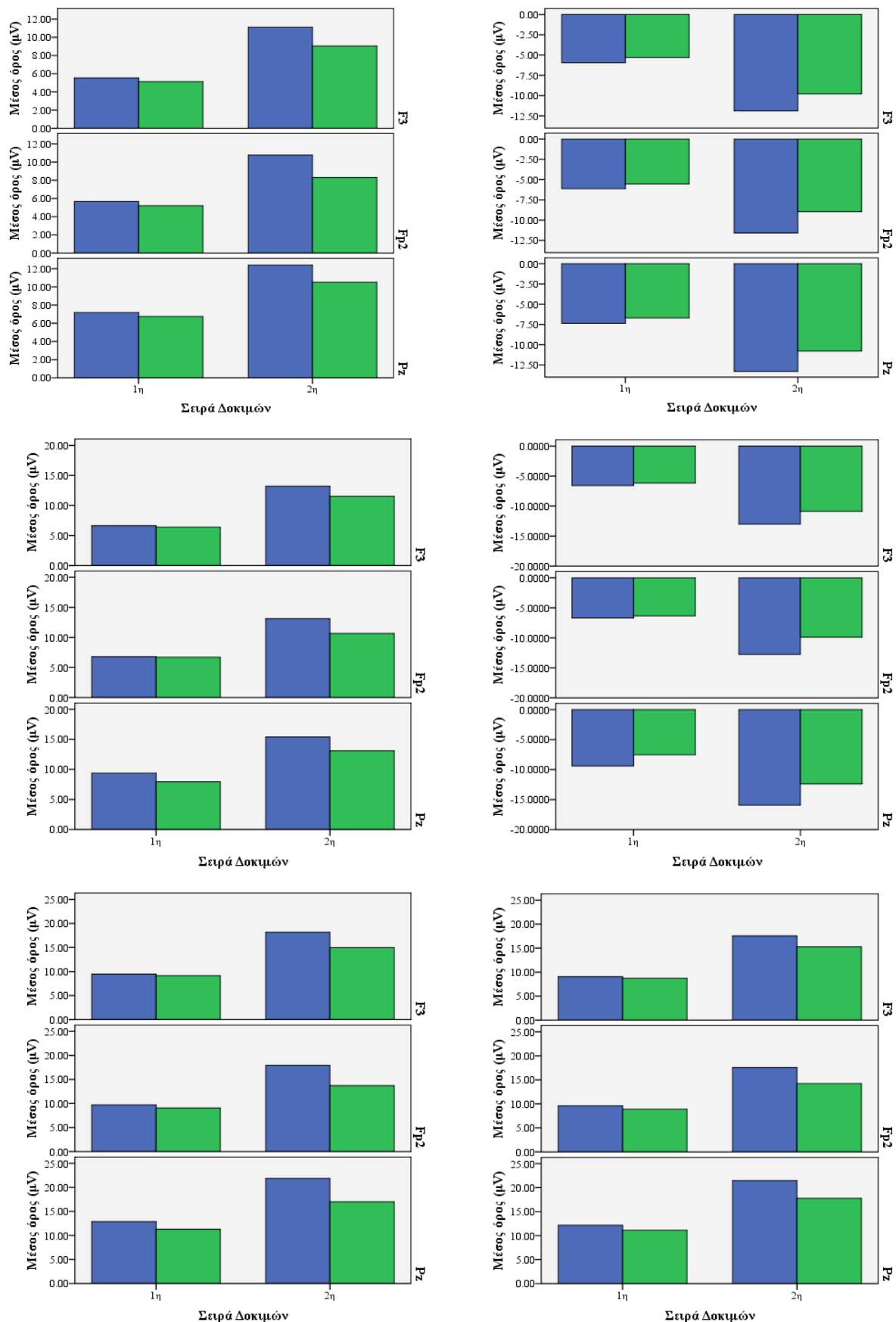


σημείωσαν διαφορές σε όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος. Στο σχήμα 4-9 παρουσιάζονται μόνο οι απαγωγές F3, Fr2 και Pz σε κάθε περιοχή ενδιαφέροντος.

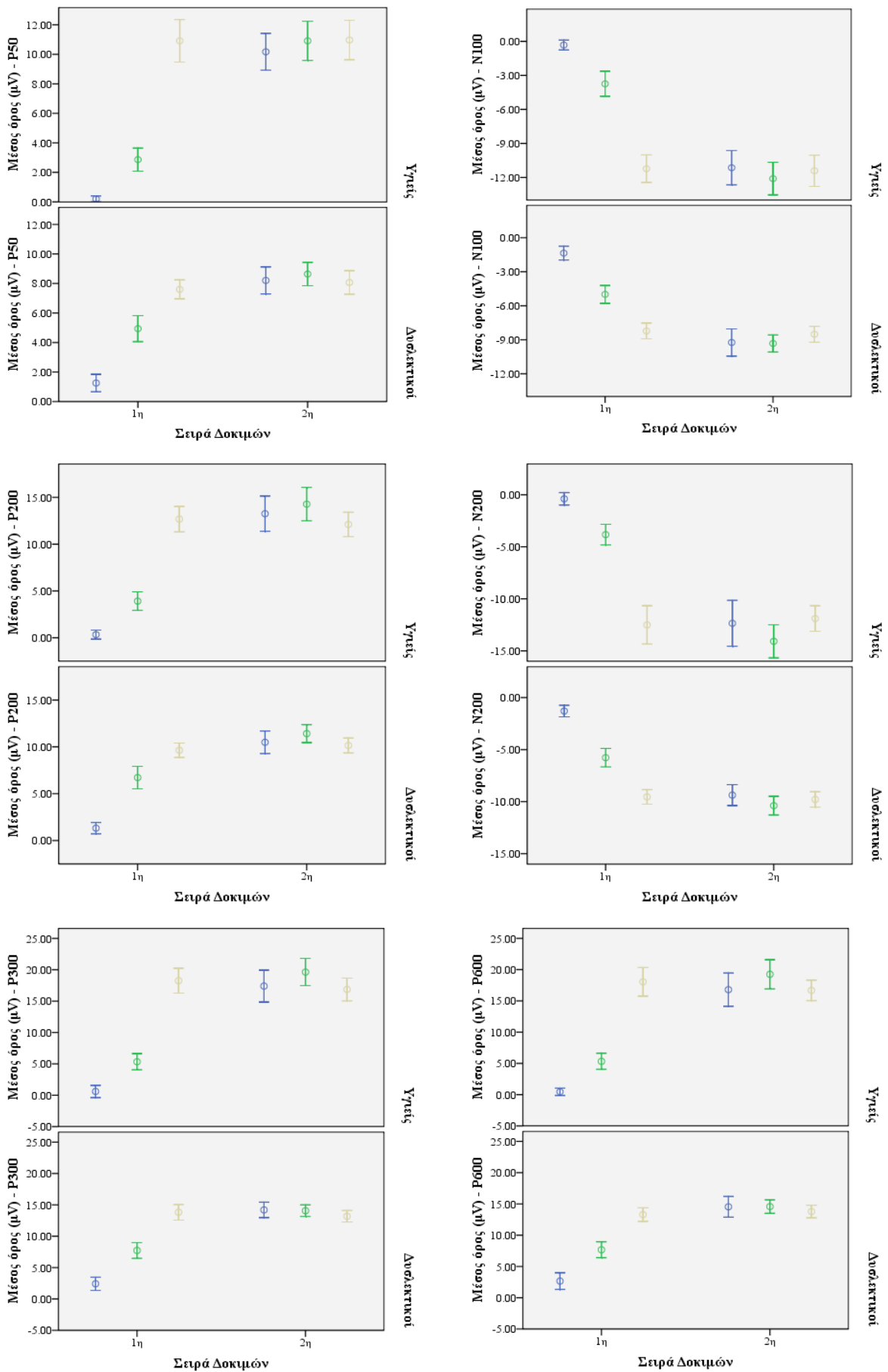
Τέλος, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η αλληλεπίδραση της ομάδας για κάθε τεστ και σειρά δοκιμών απεικονίζει την επανα-ευαισθητοποίηση των μαρτύρων. Οι διαφορές ανάμεσα στις δυο ομάδες για την επανα-ευαισθητοποίηση στις περιοχές ενδιαφέροντος P50 (Πίνακας 4-5), N100 (Πίνακας 4-8), P200 (Πίνακας 4-11), N200 (Πίνακας 4-14), P300 (Πίνακας 4-17) και P600 (Πίνακας 4-20) σημειώθηκαν στις απαγωγές Fr2, στις απαγωγές F3, Fr2, στις απαγωγές F3, Fr2, στις απαγωγές F3, Fr2, P4, στις απαγωγές F3, Fr2, P4, Pz και στις απαγωγές F3, Fr2, Pz αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι από την περιοχή ενδιαφέροντος N200 και μετά οι απαγωγές ανήκουν όχι μόνο στον μετωπιαίο αλλά και στον βρεγματικό λοβό του εγκεφάλου. Επίσης, παρατηρείται ότι η απαγωγή Fr2 σημείωσε διαφορές σε όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος. Στο σχήμα 4-10 παρουσιάζεται μόνο η απαγωγή Fr2 σε κάθε περιοχή ενδιαφέροντος. Παρατηρείται ότι και στις δυο ομάδες το πλάτος στο 3<sup>ο</sup> τεστ δοκιμών παραμένει σχεδόν αμετάβλητο από δοκιμή σε δοκιμή (δεν σημειώθηκε στατιστική διαφορά), ενώ οι μέσες τιμές του πλάτους στο 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> τεστ δοκιμών διαφέρουν σημαντικά (μικρότερες στο 1<sup>ο</sup>). Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζει την επανα-ευαισθητοποίηση ο βαθμός της οποίας μεταξύ των δυο ομάδων διαφέρει (μεγαλύτερος στην περίπτωση των υγιών μαρτύρων).



**Σχήμα 4-8:** Μέσος όρος πλάτους κορυφής για κάθε τεστ δοκιμών και περιοχή ενδιαφέροντος (από πάνω αριστερά και δεξιόστροφα: P50, N100, P200, N200, P300, P600). Η μπλε και πράσινη γραμμή αντιστοιχεί στους υγιείς και δυσλεκτικούς μάρτυρες. Απαγωγές: F3 και Fp2.



Σχήμα 4-9: Μέσος όρος πλάτους κορυφής για κάθε σειρά δοκιμών και περιοχή ενδιαφέροντος (από πάνω αριστερά και δεξιόστροφα: P50, N100, P200, N200, P300, P600). Η μπλε και πράσινη μπάρα αντιστοιχεί στους υγιείς και δυσλεκτικούς μάρτυρες. Απαγωγές: F3, Fr2 και Pz.



Σχήμα 4-10: Μέσος όρος πλάτους απαγωγής Fr2 για κάθε ομάδα, τεστ και σειρά δοκιμών. Η μπλε, πράσινη και κίτρινη μπάρα αντιστοιχεί στο 1<sup>ο</sup>, 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> τεστ δοκιμών. Οι μπάρες λάθους αντιστοιχούν στο τυπικό σφάλμα των μέσων όρων.

## Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκαν οι αλλαγές των ακουστικών προκλητών δυναμικών σε παιδιά με μαθησιακές δυσκολίες και η σύγκρισή τους με τα υγιή αδέρφια τους. Συγκεκριμένα, ο σκοπός της εργασίας ήταν να μελετηθεί η ευαισθητοποίηση (χαρακτηριστικό της εξοικείωσης), δηλαδή ο τρόπος που αυξάνεται η απόκριση του εγκεφάλου σε ένα εξωτερικό ερέθισμα, από δόκιμη σε δοκιμή. Η εξοικείωση ορίζεται ως μία μείωση εκθετική της απόκρισης συναρτήσει της επανάληψης του ερεθίσματος. Όταν το ερέθισμα εμφανίζεται με μικρές διακοπές μεταξύ των ερεθισμάτων, η εξοικείωση είναι γρήγορη και μόνο προσωρινή (short term habituation STH), σε μεγαλύτερα μεσοδιαστήματα μεταξύ των ερεθισμάτων εξελίσσεται αργά (Long term Habituation LTH). Η εφαρμογή ενός διαφορετικού ερεθίσματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μειωμένης απόκρισης στο αρχικό ερέθισμα, δηλαδή ευαισθητοποίηση. Η βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση συνήθως εμφανίζεται σε μελέτες εξοικείωσης, ως μια αυξημένη απόκριση μετά από μερικά αρχικά ερεθίσματα και ακολουθεί μια μείωση της απόκρισης. Η μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση παρατηρείται ως αύξηση του χρόνου στο οποίο εμφανίζεται η μεταβολής της απόκρισης, ή ως αποτέλεσμα μιας μακράς περιόδου προσαρμογής στο ερέθισμα. Αντίθετα με την επανα-εξοικείωση, όπου η απόκριση αρχικά ανακτάται σε κάποιο βαθμό στην άρχη ενός νέου συνόλου δοκιμών και ακολουθεί σε κάθε επόμενο σύνολο δοκιμών μεγαλύτερου βαθμού εξοικείωση (ενισχυμένη επανα-εξοικείωση), στη επανα-ευαισθητοποίηση η απόκριση δεν μειώνεται αλλά αυξάνεται σε κάθε επόμενο σύνολο δοκιμών ως αποτέλεσμα του διαφορετικού ερεθίσματος που δεν έχει καθοριστεί αν είναι αβλαβές ή επιβλαβές.

Μέχρι σήμερα, η ποσοτική μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο για την ανάλυση του εγκεφαλογραφήματος και των προκλητών δυναμικών ήταν ο μετασχηματισμός Fourier. Ο οποίος δίνει μια χρήσιμη απεικόνιση της περιοδικότητας του σήματος στο πεδίο της συχνότητας αλλά δεν δίνει καμία χρονική πληροφορία για τις συχνότητες και απαιτεί τα σήματα να είναι στάσιμα. Έτσι ο μετασχηματισμός Fourier δεν είναι ο βέλτιστος για την ανάλυση σημάτων που περιλαμβάνουν διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων, δηλαδή μη στασιμα κύματα όπως τα προκλητά δυναμικά, λόγω του σταθερού μεγέθους του παραθύρου του (μια συνάρτηση ημιτόνου ή συνημιτόνου για όλες τις κυματομορφές). Ο μετασχηματισμός κυματιδίου ξεπερνά αυτόν τον περιορισμό χρησιμοποιώντας μεταβλητό μέγεθος παραθύρου (είναι στενά για υψηλές συχνότητες και ευρεία για τις χαμηλές). Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην ανάλυση των προκλητών δυναμικών, όπου επιπλέον ο σηματοθορυβικός λόγος είναι χαμηλός.

Στη μελέτη της ευαισθητοποίησης ακουστικών προκλητών δυναμικών σε παιδιά με μαθησιακές δυσκολίες και σε υγιή παιδιά χρησιμοποιήθηκαν προειδοποιητικά ερεθίσματα υψηλής (3000Hz) και χαμηλής (500Hz) συχνότητας, διάρκειας 100ms, καθώς και αριθμοί υπενθύμισης μέσω των ακουστικών. Κάθε προειδοποιητικό ερέθισμα, είχε χρονική καθυστέρηση 1s από την έναρξη των αριθμών προς απομνημόνευση. Μετά την ολοκλήρωση της ανωτέρω διαδικασίας, ακολούθησε χρόνος ανάπαυσης 5 λεπτών. Τα προκλητά δυναμικά καταγράφηκαν κατά το χρονικό διάστημα 1,1s, μεταξύ του προειδοποιητικού ερεθίσματος και της πρώτης εκφώνησης των αριθμών. Κάθε καταγραφή αποτελούνταν από 52 επαναλήψεις μεμονωμένων δοκιμών, οι οποίες ομαδοποιούνται, λόγω του χρόνου ανάπαυσης, σε δύο σειρές δοκιμών των 26 μεμονωμένων δοκιμών.

Τα μετρούμενα ηλεκτρικά σήματα είναι ασθενή, από περίπου 1 $\mu$ V ως 100 $\mu$ V και κάθε δοκιμή περιέχει και προσθετικό στατικό θόρυβο (HEG) που αλλοιώνει το χρονικά εντοπισμένο προκλητό δυναμικό. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η αποθορυβοποίηση των καταγραφών. Η κυματιδιακή ανάλυση επιτρέπει την ανάλυση μη στάσιμων σημάτων και την αποσύνθεση τους στις διάφορες συχνοτικές τους συνιστώσες. Στην παρούσα εργασία το ζητούμενο ήταν η μελέτη των μεμονωμένων δοκιμών, οι οποίες ήταν πιο εύκολο να αναγνωριστούν μετά την αποθορυβοποίηση.

Η αποθορυβοποίηση έγινε τόσο στο πεδίο του χρόνου, χρησιμοποιώντας τους συντελεστές των περιοχών ενδιαφέροντος (P50, N100, P200, N200, P300 και P600), όσο και στο πεδίο της συχνότητας, χρησιμοποιώντας μόνο το εύρος συχνοτήτων που αντιστοιχεί στους φυσιολογικούς ρυθμούς του εγκεφάλου ( $\delta$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$  και  $\beta$ ). Η στατιστική ανάλυση ανέδειξε ότι οι δύο ομάδες διέφεραν όμως ως προς τον βαθμό ευαισθητοποίησης. Οι διαφορές ανάμεσα στις δυο ομάδες για την βραχυπρόθεσμη ευαισθητοποίηση παρατηρήθηκαν στις περιοχές P50 και N100, με τις περισσότερες να σημειώνονται σε απαγωγές του μετωπιαίου λοβού (απαγωγές F3 και Fr2). Διαφορές που αντιστοιχούν στον βρεγματικό λοβό σημειώθηκαν για τις περιοχές ενδιαφέροντος P200, N200, P300 και P600 (C4 ή C6 ή Cz). Στην μακροπρόθεσμη ευαισθητοποίηση οι απαγωγές F3, Fr2 και Pz σημείωσαν διαφορές σε όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος. Τέλος, οι δυο ομάδες διαφέρουν στον βαθμό επανευαισθητοποίησης των μαρτύρων. Παρατηρείται ότι από την περιοχή ενδιαφέροντος N200 και μετά οι απαγωγές ανήκουν όχι μόνο στον μετωπιαίο, αλλά και στον βρεγματικό λοβό του εγκεφάλου. Επίσης, παρατηρείται ότι η απαγωγή Fr2 σημείωσε διαφορές σε όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος.

### ***Μελλοντικές επεκτάσεις***

Στην ανάλυση των προκλητών δυναμικών μεμονωμένης δοκιμής, χρησιμοποιήσαμε από μια οικογένεια κυματιδίου, όπως η διορθογώνια, μόνο μια μητρική συνάρτηση κυματιδίου (την 'bio3.9'). Η συνάρτηση αυτή, μέσω μιας διαδικασίας μετατόπισης και

διεύρυνσης, χρησιμοποιήθηκε στα σήματα διαφορετικών φασματικών συνιστωσών, με διαφορετική διακριτική ικανότητα στη συχνότητα, καλύπτοντας έτσι το σήμα και στις χαμηλές και στις υψηλές συχνότητες.

Καθεμία από τις συναρτήσεις, από τις οικογένειες κυματιδίων, παρόλο που καλύπτουν συχνотικά πλήρως το σήμα, αναπαριστούν αποτελεσματικότερα κάποιες δομές από κάποιες άλλες. Αποτελεσματικότερη και πλήρους πληροφορίας αποσύνθεση, επιτυγχάνεται μόνο όταν οι συναρτήσεις κυματιδίων που περιέχονται στην οικογένεια αντανakλούν την δομή του σήματος. Αυτή είναι μια προσαρμοστική τεχνική στην προσέγγιση του σήματος (adaptive approximation) που λέγεται matching pursuit (MP)

Η κλασσική προσέγγιση με κυματίδια ,είναι ο υπολογισμός του εσωτερικού γινομένου όλων των συναρτήσεων με το σήμα. Επειδή οι συναρτήσεις από την ίδια οικογένεια, μοιάζουν μεταξύ τους, θα δίνουν εξίσου μεγάλο εσωτερικό γινόμενο για δοσμένο σήμα. Στην περίπτωση του διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίου, οι συναρτήσεις έχουν την ελάχιστη επικάλυψη, διότι οι οικογένειες αποτελούνται από μικρότερο σύνολο συναρτήσεων και είναι ορθογώνιες μεταξύ τους. Για αυτό το λόγο, ο αλγόριθμος matching pursuit (MP), είναι εξαιρετικά αποδοτικός (μεγάλος σηματοθορυβικός λόγος), όταν χρησιμοποιούμε διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίου και προτείνεται η μελέτη ιδιοτήτων των συναρτήσεων των οικογενειών κυματιδίου, που θα δώσει το καλύτερο αποτέλεσμα στην ανάλυση μη στατικών σημάτων, όπως το εγκεφαλογράφημα.

# Βιβλιογραφία

- [1] Eric R. Kandel , James H. Schwartz και Thomas M. Jessell , “*Η Νευροβιολογία της συμπεριφοράς*”, Βασικές αρχές νευροεπιστημών, 2η έκδοση, Αθήνα: Πασχαλίδης 2003
- [2] Monica Fabiani, Gabriele Gratton, και Kara D. Federmeier , “*Event-related Potentials: methods, theory, and applications*” in *Handbook of Psychophysiology / ed. by John T. Cacioppo, Louis G. Tassinary, and Gary G. Berntson*. NY:Cambridge University Press, 2000
- [3] MJTurlough FitzGerald, Gregory Gruener και Estomih Mtui, “Λειτουργική διαφοροποίηση των ημισφαιρίων ” στο *Κλινική νευροανατομία και νευροεπιστήμες* ,Αθήνα: Πασχαλίδης 2009, κεφ.32, σελ. 376-377
- [4] Δ. Κουτσούρης, Σ. Παυλόπουλος και Πρέντζα Α, “Φυσιολογία εγκεφάλου και ηλεκτροεγκεφαλογραφημα” στο *Εισαγωγή στη βιοϊατρική τεχνολογία και ανάλυση ιατρικών σημάτων* , Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις Τζιόλα, 2003, κεφ.5, σελ.182-203
- [5] R. Q. Quiroga, E. L. J. M. van Luijelaar, “Habituation and sensitization in rat auditory evoked potentials: a single-trial analysis with wavelet denoising,” *International Journal of Psychophysiology*, vol. 33, no. 2, pp. 131-153, February 2002.
- [6] A. Sambeth , J.H.R. Maes, R. Quian Quiroga, C.M. Van Rijn, A.M.L. Coenen, “Enhanced re-habituation of the orienting response of the human eventrelated potential” *Neuroscience Letters* , vol. 356, pp. 103–106 , year 2003.
- [7] Amara Graps , “An Introduction to Wavelets” *Computational Science and Engineering, Proc.IEEE* , vol. 2, no. 2, pp. 50-61, June 1995
- [8] ZhisongWang, Alexander Maier, David A. Leopold, Nikos K. Logothetis, και Hualou Liang, “Single-trial evoked potential estimation using wavelets”, *Computers in Biology and Medicine*, vol.37, issue 3, pp. 363-373, April 2007
- [9] *The Illustrated Wavelet Transform Handbook: introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance* ,Institute of physics ,london,UK ,2002
- [10] Alferd Mertins, “Short-Time Fourier Analysis” *Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications*,England: John Wiley & Sons: 1999, pp. 196-207



- [11] Quiroga R. Quian, Cantero L, J.L. Cantero kai M.L.A. Jongsma, “What can we learn from single trial event-related potential” *Chaos and Complexity Letters* ,vol. 2, no. 2/3, pp. 345-363
- [12] J A Chambers, Saeid Sanei , “Introduction to EEG”,in *EEG Signal Processing* ,UK:John Wiley & Sons,2007, ch1, sec. 1.5, pp.10-12
- [13] C. Valens, “Discrete wavelets” in *A Really Friendly Guide to Wavelets* Boston: Birkhäuser, 1994
- [14] Catharine H. Rankin, Thomas Abrams, Robert J. Barry, Seema Bhatnagar, David F. Clayton, John Colombo, Gianluca Coppola, Mark A. Geyer, David L. Glanzman, Stephen Marsland, Frances K. McSweeney, Donald A. Wilson, Chun-Fang Wu, Richard F. Thompson, “ Habituation revisited: An updated and revised description of the behavioral characteristics of habituation characteristics of habituation ”,*Neurobiology of Learning and Memory*, vol 92 , pages 135–138, year 2009.
- [15] Σ. Ε. Σιμόπουλου, “ Στατιστικά τεστ ” στο *Μετρήσεις τεχνικών μεγεθών* ,2η έκδοση, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο 1989, κεφ.3, σελ. 84-85.
- [16] Β. Γ. Παυλόπουλος, , “Η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA)” στο *Μοντέλα Ανάλυσης Διακύμανσης*, Αθήνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών 2008, κεφ 1, σελ.4, σελ.27
- [17] Eric R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell,” Cellular Mechanisms of Learning and the Biological Basis of Individuality” in *Principles of Neural Science*, 4th Edition, NY: Mcgraw-Hill ,2000, ch. 63, p.1251
- [18] E. M. Eisenstein, D. G. Brunder, H. J. Blair, “ Habituation and sensitization in an aneural cell: Some comparative and theoretical considerations”, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 6, issue: 2, Pages 183-194, year 1982.