



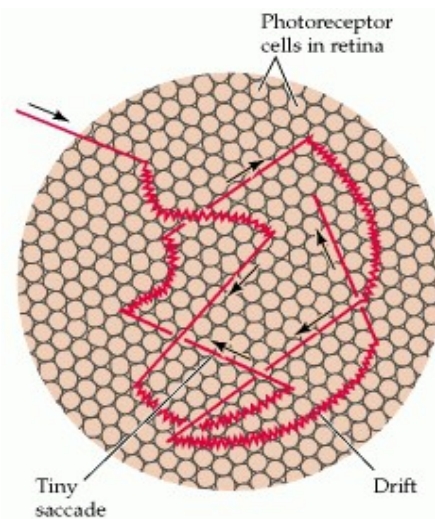
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΚΠΟΝΗΣΗ ΜΕ ΘΕΜΑ:

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΟΦΘΑΛΜΙΚΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ

ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΗΛΙΑΝΑ ΚΑΛΑΠΟΘΑΡΑΚΟΥ



επιβλέπων: κος Γεώργιος Ματσόπουλος
 Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2013



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΚΠΟΝΗΣΗ ΜΕ ΘΕΜΑ:

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΟΦΘΑΛΜΙΚΩΝ ΚΙΝΗΣΕΩΝ

ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΗΛΙΑΝΑ ΚΑΛΑΠΟΘΑΡΑΚΟΥ

επιβλέπων: κος Γεώργιος Ματσόπουλος
 Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 15^η Ιουλίου 2013

.....
Γ. Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Κουτσούρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ουζούνογλου Επ.
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2013

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κο. Γεώργιο Ματσόπουλο, Επ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. για τη βοήθειά του στη διαξαγωγή της έρευνας και όλης της ερευνητικής μελέτης, καθώς και την υποψήφια διδάκτωρ στη Βιοιατρική τεχνολογία της ΣΗΜΜΥ, Αλεξάνδρα Κορδά, για τη βοήθεια και στήριξή της σε όλη τη διαδικασία. Ευχαριστώ όλους τους αναγνώστες για την υπομονή τους.

Copyright © Ηλιάνα Καλαποθαράκου, 2013.

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.

στην οικογένειά μου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Σελ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή.....	8
1.1 Η Ψυχοφυσική της Όρασης και οι σακκαδικές κινήσεις.....	9
1.2 Οι οφθαλμικές κινήσεις και ο ύπνος REM.....	11
1.3 Ο σκοπός της εργασίας.....	12
1.4 Παρουσίαση Κεφαλαίων.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Σύστημα Όρασης και Σακκαδικές Κινήσεις	
2.1 Σύστημα όρασης	16
2.1.1 Ο αμφιβληστροειδής.....	18
2.1.2 Οι οφθαλμικοί μύες.....	21
2.1.3 Φοβική και Περιφερική όραση.....	23
2.2 Το σύστημα παρατήρησης (Gaze system).....	24
2.2.1 Το οφθαλμοκινητικό σύστημα (Oculomotor system).....	25
2.2.1 (α) Σακκαδικές κινήσεις (saccades).....	26
2.2.1 (β) Ομαλές κινήσεις παρακολούθησης (smooth pursuit movements).....	26
2.2.1 (γ) Κινήσεις σύγκλισης - απόκλισης (vergence movements).....	27
2.2.2 Το σύστημα σταθεροποίησης / προσήλωσης (Fixation system).....	27
2.2.2 (α) Τρέμουλο-κινήσεις ή φυσιολογικός νυσταγμός (Tremor).....	28

2.2.2 (β) Κινήσεις διολίσθησης (Drifts).....	29
2.2.2 (γ) Μικροσακκαδικές κινήσεις (Microsaccades).....	29
2.2.3 Το σύστημα κίνησης του κεφαλιού (head movement system).....	32
2.2.3 (α) Το οπτοκινητικό αντανακλαστικό (OKR).....	33
2.2.3 (β) Το οφθαλμο-αιθουσαίο αντανακλαστικό (VOR).....	33
2.3 Ο ρόλος των οφθαλμικών κινήσεων προσήλωσης.....	34
2.4 Βλεφαρισμοί των οφθαλμών (blinks).....	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Το προτεινόμενο Σύστημα

3.1 Απόκτηση Δεδομένων.....	36
3.2 Μεθοδολογία και Αλγόριθμος Ανίχνευσης.....	39
3.2.1 Το στάδιο της προεπεξεργασίας.....	39
3.2.2 Η διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών.....	44
3.2.3 Η διαδικασία επιλογής χαρακτηριστικών.....	46
3.2.4 Διαδικασία Ταξινόμησης με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.....	47
3.3 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΝΔ).....	48
3.3.1 Εισαγωγή : η ευρεία χρήση και εφαρμογή των ΝΔ.....	48
3.3.2 Τι είναι τα νευρωνικά δίκτυα (ΝΔ).....	50
3.3.3 Βιολογικά νευρωνικά δίκτυα.....	52
3.3.4 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	54
3.3.4 (α) Ο στοιχειώδης νευρώνας (perceptron).....	54

3.3.4 (β) Πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα (Multilayer Perceptrons).....	57
3.3.4 (γ) Ευθέως τροφοδοτούμενα (feedforward) και επανατροφοδοτούμενα (feedbackward) νευρωνικά δίκτυα.....	59
3.4 Η Διαδικασία Ταξινόμησης – Το προτεινόμενο σύστημα.....	60
3.4.1 Πειραματικά αποτελέσματα – Δομή συστήματος Α.....	62
3.4.2 Πειραματικά αποτελέσματα – Δομή συστήματος Β.....	69
3.4.3 Πειραματικά αποτελέσματα – σύγκριση.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Επίλογος	
4.1 Συμπεράσματα	79
4.2 Μελλοντική έρευνα.....	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

Εισαγωγή

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να προσεγγίσει κανείς τη θαυμαστή λειτουργία της όρασης, που εκτός από το ότι είναι ζωτικής σημασίας για την ίδια μας την ύπαρξη σε αυτό τον κόσμο, αποτελεί και σημαντικό αντικείμενο επιστημονικής μελέτης. Ένας τρόπος προσέγγισης είναι αυτός της πειραματικής ψυχολογίας, η οποία μελετά τα χαρακτηριστικά που έχει η λειτουργία αυτή, τις δυνατότητες και τα όρια της, τη σχέση ανάμεσα σε ψυχολογικά μεγέθη, όπως είναι τα ποιοτικά χαρακτηριστικά μιας αντιληπτικής εμπειρίας, και σε φυσικά μεγέθη, όπως είναι η ένταση, η διάρκεια ή η συχνότητα ενός οπτικού ερεθίσματος. Ένας άλλος τρόπος προσέγγισης είναι της νευροεπιστήμης, η οποία μελετάει το υπεύθυνο βιολογικό όργανο για τη λειτουργία αυτή, τον εγκέφαλο. Τα χαρακτηριστικά ενός οπτικού αντιλήματος δεν εξαρτώνται μόνο από τα οπτικά ερεθίσματα του φυσικού αντικειμένου που το προκαλεί, καθότι εξίσου σημαντική είναι και η εξάρτησή του από τα χαρακτηριστικά του αντιληπτικού συστήματος που λαμβάνει το οπτικό ερέθισμα. Το ίδιο φυσικό αντικείμενο μπορεί να γίνει διαφορετικά αντιληπτό από έναν άνθρωπο και από έναν σκύλο, από τον ίδιο άνθρωπο όταν το κοιτάει ή όταν το μυρίζει, και από δύο διαφορετικούς ανθρώπους που το κοιτούν. Αυτό το οποίο αντιλαμβανόμαστε είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στο φυσικό αντικείμενο και στο νευρικό μας σύστημα. Χωρίς την ύπαρξη του νευρικού μας συστήματος, τα αντικείμενα του φυσικού μας κόσμου δεν θα είχαν αντιληπτική διάσταση, θα ήταν αντιληπτικά ανύπαρκτα. Η μελέτη του βιολογικού οργάνου που είναι υπεύθυνο για την αντίληψη, δηλαδή του εγκεφάλου, αποτελεί επομένως ένα πολύ σημαντικό ερευνητικό πεδίο γύρω από τη φύση της αντιληπτικής μας εμπειρίας. Η εξάρτηση αυτή της αντίληψης, όχι μόνο από τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά του φυσικού κόσμου, αλλά και από

τα χαρακτηριστικά του υποκειμένου το οποίο αντιλαμβάνεται, οδηγεί αναπόφευκτα σε ποικίλα ερωτήματα σε σχέση με τη φαινομενολογία, την επιστημολογία, την οντολογία και γενικότερα τη φύση της αντιληπτικής διαδικασίας, καθώς και των εμπλεκόμενων σε αυτή υποκειμένων και αντικειμένων.

1.1 Η Ψυχοφυσική της Όρασης και οι σακκαδικές κινήσεις

Υπάρχουν τρεις “οπτικές γωνίες” για την αξιολόγηση της οπτικής συμπεριφοράς: η ανατομική προσέγγιση, αυτή της νευροφυσιολογίας, καθώς και η ψυχοφυσική της όρασης. Η μελέτη της ανατομίας των νευρώνων και άλλων δομών του οπτικού συστήματος είναι απαραίτητη για την επαρκή γνώση των χαρακτηριστικών της οπτικής οδού, της ροής της οπτικής πληροφορίας. Η νευροφυσιολογία μελετά την επεξεργασία της οπτικής πληροφορίας στα διαφορετικά νευρωνικά στάδια της οπτικής οδού, ενώ η ψυχοφυσική της όρασης διερευνά με μη επεμβατικές μεθόδους τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του οπτικού συστήματος, μέσω σύγκρισης των φυσικών παραμέτρων των ερεθισμάτων (όπως το χρώμα, η φωτεινότητα, η αντίθεση) με αυτό που ο εξεταζόμενος αντιλαμβάνεται. Οι μη επεμβατικές ψυχοφυσικές δοκιμασίες βοηθούν στην άρτια και ακριβή αξιολόγηση των χαρακτηριστικών της όρασης, που βοηθά στην καλύτερη παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας των διαφόρων θεραπευτικών μεθόδων, ή ακόμα στην αποτελεσματικότερη διάγνωση ασθενειών. Τα ψυχοφυσικά δεδομένα που προκύπτουν από τέτοιες ψυχοφυσικές δοκιμασίες χρησιμοποιούνται από αρμόδιους φορείς με σκοπό την καλύτερη διάγνωση, στον ιατρικό τομέα, αλλά και τη βελτίωση διάφορων χαρακτηριστικών που συνδέονται με την οπτική αντίληψη, όπως είναι η βελτίωση των χαρακτηριστικών ενός αυτοκινητόδρομου, σε σχέση με την οπτική συμπεριφορά των οδηγών.

Η παράλληλη μελέτη των δεδομένων που προκύπτουν από πειράματα στους τομείς της

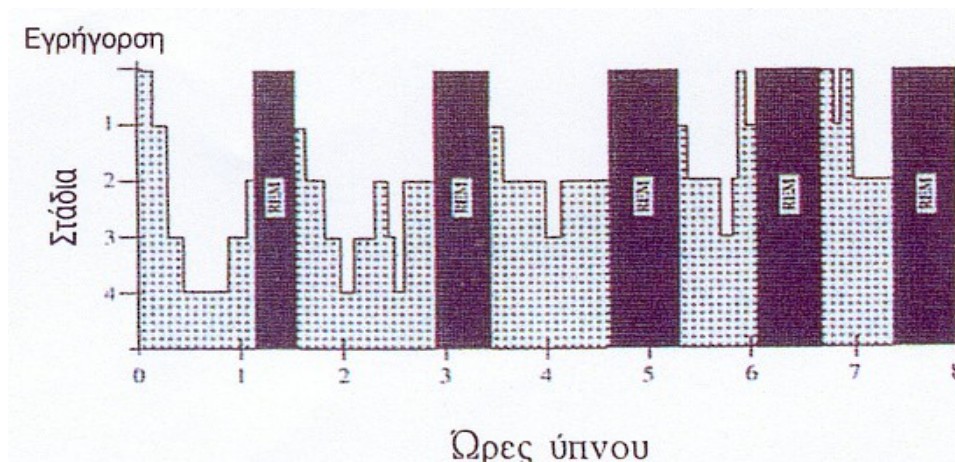
ανατομίας, της νευροφυσιολογίας και της ψυχοφυσικής της όρασης μπορεί να καταστήσει δυνατό τον επιθυμητό συσχετισμό της δραστηριότητας και απόκρισης των νευρώνων με την οπτική μας αντίληψη. Επιπλέον, επειδή η μελέτη των σακκαδικών κινήσεων των οφθαλμών μπορεί να γίνει με τρόπο μη επεμβατικό, υποστηρίζεται η έρευνα σχετικών ψυχοκινητικών λειτουργιών, νοητικών διεργασιών υψηλότερου επιπέδου, αλλά και των σχετικών μηχανισμών του νευρικού συστήματος. Συνεπώς η μελέτη των σακκαδικών κινήσεων κρίνεται σκόπιμη σε περιπτώσεις ψυχιατρικής ασθένειας, καθώς δύναται να αυξήσει την αποτελεσματικότητα στην ιατρική διάγνωση, αλλά και να αποτελέσει σύστημα υποστήριξης απόφασης για τους αρμόδιους ιατρούς. Στην περίπτωση της σχιζοφρένειας, για παράδειγμα, έχει παρατηρηθεί πως τα άτομα που πάσχουν εμφανίζουν χαρακτηριστικές δυσλειτουργίες που σχετίζονται με τις κινήσεις των βολβών των ματιών (σακκαδικές κινήσεις).

Οι σακκαδικές είναι εκούσιες κινήσεις των οφθαλμών, με τις οποίες «σαρώνουμε» μία εικόνα, για να διατηρηθεί το είδωλο ενός αντικειμένου στο κεντρικό βοθρίο του αμφιβληστροειδή, και συνεπώς υποστηρίζουν τη λειτουργία της όρασης. Χωρίζονται στις μεγάλες σακκαδικές κινήσεις, που μπορούμε να τις παρατηρήσουμε και με γυμνό οφθαλμό, και τις μικρές σακκαδικές κινήσεις, που μπορούν να ειδωθούν μόνο με ειδικό εξοπλισμό. Οι μικρότερες από τις σακκαδικές κινήσεις ονομάζονται μικροσακκαδικές και αποτελούν τις γρηγορότερες και μεγαλύτερες από τις οφθαλμικές κινήσεις προσήλωσης. Επειδή οι τελευταίες είναι ακούσιες κινήσεις, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες σακκαδικές κινήσεις, αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία οφθαλμικών κινήσεων και ανήκουν στην κατηγορία των κινήσεων προσήλωσης, όπως θα δούμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.

1.2 Οι οφθαλμικές κινήσεις και ο ύπνος REM

Άξια αναφοράς στο σημείο αυτό είναι η παρουσία των σακκαδικών κινήσεων των οφθαλμών κατά τη διάρκεια του REM ύπνου. Υπάρχουν δύο καταστάσεις ύπνου: ο REM (Rapid Eye Movement) ύπνος, στον οποίο παρουσιάζονται ταχείες οφθαλμικές κινήσεις (σακκαδικές), και ο NREM (Non-Rapid Eye Movement) ύπνος, στον οποίο αυτές απουσιάζουν. Στο σχήμα 1 απεικονίζεται η διαδοχή των καταστάσεων του ύπνου REM, του ύπνου NREM και των τεσσάρων επιμέρους σταδίων του NREM ύπνου, κατά τη διάρκεια ύπνου οκτώ (8) ωρών για έναν άνθρωπο. Ο χρόνος του NREM ύπνου σημαίνεται με τις κουκίδες και ο χρόνος του REM ύπνου με το συμπαγές χρώμα.

Ο ύπνος REM (Rapid Eye Movement), γνωστός και ως ύπνος γρήγορων κινήσεων των ματιών, είναι το πέμπτο στάδιο του ύπνου και χαρακτηρίζεται από γρήγορες κινήσεις των ματιών (σακκαδικές), αυξημένη εγρήγορση, αλλά και από βαθιά χαλάρωση των μυών, παρόμοια με αυτή στο βαθύ ύπνο. Ο ύπνος REM στους ενήλικες συνήθως καταλαμβάνει το 20% - 25% του συνολικού ύπνου και διαρκεί για 90 - 120 λεπτά. Κατά τη διάρκεια ενός φυσιολογικού ύπνου, συνήθως βιώνουμε 4 με 5 περιόδους ύπνου REM, ενώ κατά τις πρωινές ώρες, το περισσότερο μέρος του



Σχήμα 1: Η αλληλοδιαδοχή των σταδίων για ύπνο διάρκειας 8 ωρών.

ύπνου αποτελείται από τον ελαφρύ ύπνο και από περιόδους REM. Ουσιαστικά υπάρχει παράλυση των περισσότερων βασικών μυϊκών ομάδων που ελέγχονται εκούσια, μέσω μιας διεργασίας μετασυναπτικής αναστολής του κινητικού νευρώνα στον εγκέφαλο και στο νωτιαίο μυελό. Το ηλεκτροοφθαλμογράφημα (ΗΟΓ) στο στάδιο REM δείχνει ριπές ταχείων οφθαλμικών κινήσεων, από τις οποίες πήρε το όνομά του αυτό το στάδιο ύπνου. Οι οφθαλμικές κινήσεις του REM ύπνου συμβαίνουν κατά διαστήματα, διακεκομμένα, και ύστερα ακολουθούν περίοδοι ακινησίας των οφθαλμών. Τέλος, συζευγμένες με τις ριπές των οφθαλμικών κινήσεων θεωρούνται και οι μυϊκές συσπάσεις που λαμβάνουν χώρα στη διάρκεια του ύπνου.

1.3 Σκοπός της εργασίας

Η καταγραφή και μελέτη των οφθαλμικών κινήσεων βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς της επιστήμης και της έρευνας όπως την οφθαλμολογία, τη νευρολογία, τη νευροφυσιολογία, την ψυχοφυσική, την ψυχιατρική, την ψυχολογία, τη φαρμακολογία, καθώς και σε άλλου είδους τομείς, όπως η αεροπλοΐα, η έρευνα αγοράς (διαφημίσεις, βελτιστοποίηση ιστοσελίδων διαδικτύου) και η βιοτεχνολογία. Στα πεδία της παρούσας μελέτης περιλαμβάνονται η οπτική του οφθαλμού, καθώς και η ανάπτυξη κατάλληλων μεθοδολογιών για την αξιολόγηση και μοντελοποίηση της οπτικής συμπεριφοράς.

Πρωταρχικός σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του οφθαλμοκινητικού συστήματος του ανθρώπου, σε συνδυασμό με τη μελέτη της επίδρασής του στην ψυχοφυσική της όρασης (visual psychophysics), το συσχετισμό δηλαδή των φυσικών παραμέτρων των ερεθισμάτων με την αντίληψή τους και με τη φυσιολογική δραστηριότητα των νευρώνων (αποκρίσεις). Υλοποιήθηκε ο σχεδιασμός ενός συστήματος υποστήριξης απόφασης (decision support system – DSS) με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΝΔ). Τα ΝΔ υλοποιούν

επίπεδα ταξινόμησης και παρέχουν τη δυνατότητα αυτόματης διάκρισης των διάφορων ειδών οφθαλμικών κινήσεων ατόμων χωρίς ιατρικές διαταραχές.

Χρησιμοποιήθηκαν 2,335 οφθαλμοκινητικά σήματα από 1,392 άτομα και επεξεργάστηκαν, ώστε να αναγνωρίζονται και να ταξινομούνται αυτόματα τα διάφορα είδη κινήσεων των οφθαλμών. Συγκεκριμένα, το προτεινόμενο σύστημα DSS απαρτίζεται από μια ακολουθία από δύο (2) τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, που το καθένα υλοποιεί έναν “ταξινομητή”, δηλαδή ένα επίπεδο ταξινόμησης. Σε καθένα από τα επίπεδα αυτά εφαρμόστηκε επιπλέον ένας αλγόριθμος επιλογής χαρακτηριστικών, ο SFFS (Sequential Forward Floating Selection algorithm), για τη βέλτιστη επιλογή κάποιων χαρακτηριστικών των σημάτων καταγραφής, που θα μεγιστοποιούσαν την απόδοση του συστήματος.

Δεν είναι γνωστό να έχει επαναληφθεί στο παρελθόν παρόμοια έρευνα, σχετική με την αυτόματη αναγνώριση και ταξινόμηση διαφόρων τύπων οφθαλμοκινήσεων, συμπεριλαμβανομένων των σακκαδικών και μικροσακκαδικών κινήσεων, από ένα σύνολο δεδομένων μεγέθους 2,335 οφθαλμοκινητικών σημάτων καταγραφής. Η απόδοση του κάθε ΝΔ (ως ταξινομητή) μετρήθηκε πειραματικά να είναι από 97.0% έως και 99.2% για τη δομή Α και από 96.0% έως και 98.0% για τη δομή Β, ποσοστό αρκετά ικανοποιητικό. Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί το πλεονέκτημα του προτεινόμενου συστήματος που σχεδιάστηκε να διακρίνει τις πολύ μικρές μικροσακκαδικές κινήσεις από τις σακκαδικές, παρόλο που οι πρώτες αντιστοιχούν σε γωνίες απόκλισης 0.1° - 2.0° και οι δεύτερες σε γωνίες 1.0° - 20.0° .

1.4 Παρουσίαση Κεφαλαίων

Η παρούσα μελέτη απαρτίζεται από τρία κεφάλαια, ξεκινώντας από την Εισαγωγή

(κεφάλαιο 1), που προηγήθηκε και εισάγει τον αναγνώστη στη σημαντικότητα και χρησιμότητα της ύπαρξης ερευνητικών μελετών στον τομέα της ψυχοφυσικής της όρασης και επεξηγεί το σκοπό της εργασίας, τους τρόπους και τα μέσα υλοποίησής της. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του οπτικού συστήματος του ανθρώπου. Ξεκινώντας στην παράγραφο 2.1 από τη φυσιολογία του ανθρώπινου οφθαλμού, τη δομική σύσταση του αμφιβληστροειδή και της οπτικής οδού προς τον εγκέφαλο μέσω των νευρώνων, παρουσιάζεται έπειτα στην παράγραφο 2.2 το σύστημα παρατήρησης (Gaze system), και επεξηγούνται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των ειδών των οφθαλμικών κινήσεων και ο ρόλος τους στη λειτουργία της όρασης. Ειδικά για το ρόλο των οφθαλμικών κινήσεων προσήλωσης αφιερώνεται η παράγραφος 2.3, ενώ στη 2.4 παρουσιάζονται οι βλεφαρισμοί και τα χαρακτηριστικά τους, ως βασικό αντικείμενο της παρούσας μελέτης.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά το προτεινόμενο σύστημα DSS, η μεθοδολογία της έρευνας και της επεξεργασίας των δεδομένων, οι τρόποι ανίχνευσης και διαχωρισμού των οφθαλμικών κινήσεων, αλλά και τα πειραματικά αποτελέσματα, με τα συμπεράσματα από τη σύγκρισή τους, ενώ παρουσιάζεται και μία ενότητα αφιερωμένη στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά τους. Συγκεκριμένα, στην παράγραφο 3.1 αναφέρεται η πηγή άντλησης των δεδομένων που επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν, ενώ οι τρόποι ανάλυσης και χρησιμοποίησής τους αναλύεται διεξοδικά στην παράγραφο 3.2, όπου παρουσιάζονται καθένα από τα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων. Για το τελικό στάδιο του διαχωρισμού των οφθαλμικών κινήσεων γίνεται χρήση νευρωνικών δικτύων, των οποίων η λειτουργία επεξηγείται στην παράγραφο 3.3. Στην παράγραφο 3.4 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της έρευνας για καθεμία από τις δύο δοκιμές που έγιναν ως προς τη δομή του προτεινόμενου συστήματος και αναλύονται τα αποτελέσματα της σύγκρισής τους.

Στο κεφάλαιο 4, τέλος, συνοψίζονται τα γενικά και ειδικά συμπεράσματα της παρούσας

μελέτης, παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά που προέκυψαν για το προτεινόμενο σύστημα και παρουσιάζεται μία συνολική εικόνα της πιθανής μελλοντικής χρήσης του συστήματος σε κλινικές εφαρμογές, αλλά και της μελλοντικής του ανάπτυξης και περαιτέρω βελτίωσης.

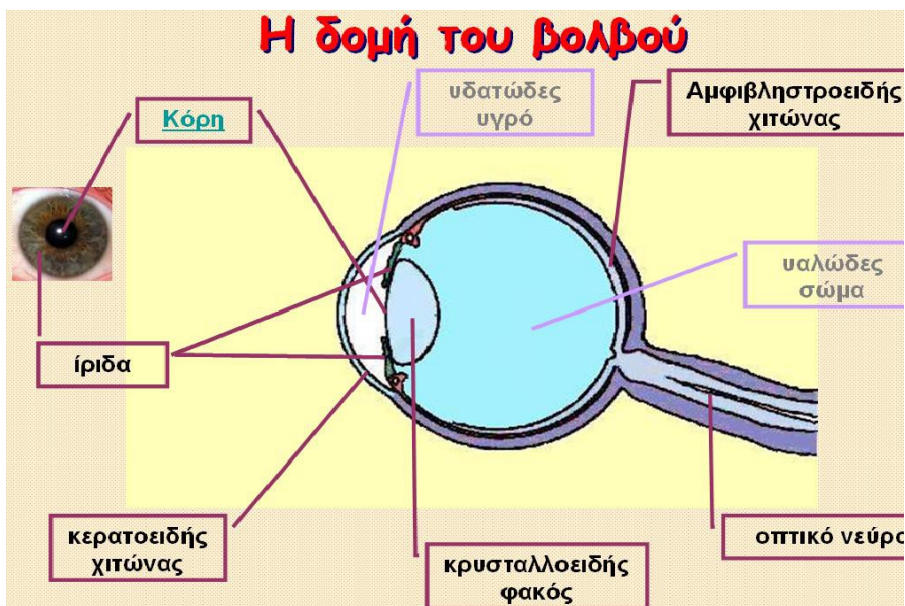
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Σύστημα Όρασης και Σακκαδικές Κινήσεις

2.1 Σύστημα όρασης

Η αίσθηση της όρασης επιτυγχάνεται μέσω ποικίλων δομών μέσα και έξω από το βολβό του οφθαλμού, οι οποίες δρουν αυτόνομα και έχουν ως αποτέλεσμα την ενιαία οπτική αντίληψη του χώρου. Το πόσο ικανοποιητικά μπορούμε να κινούμαστε στο χώρο και να αντιλαμβανόμαστε το περιβάλλον γύρω μας εξαρτάται από το πόσο αποτελεσματικά ο εγκέφαλος επεξεργάζεται τις οπτικές πληροφορίες που δέχεται μέσω των οφθαλμών.

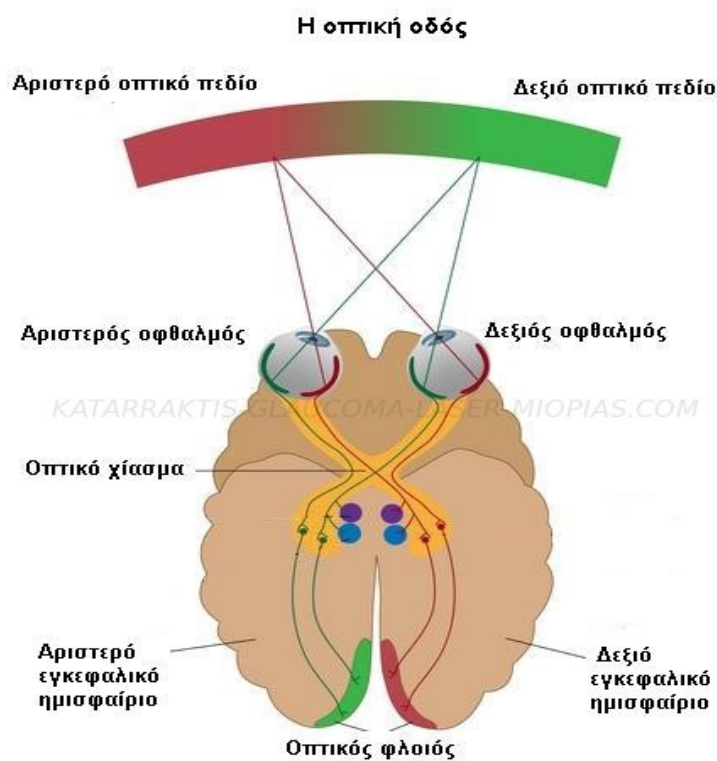
Όταν κοιτάμε ένα αντικείμενο, ακτίνες φωτός ανακλώνται από το αντικείμενο και διέρχονται στον οφθαλμό μέσω της κόρης (σχήμα 2). Οι ακτίνες συγκλίνουν, διαθλώνται από τον κερατοειδή



Σχήμα 2: Η δομή του βολβού του ανθρώπινου οφθαλμού

χιτώνα, τον κρυσταλλοειδή φακό και το υαλώδες σώμα και εστιάζονται τελικά στο

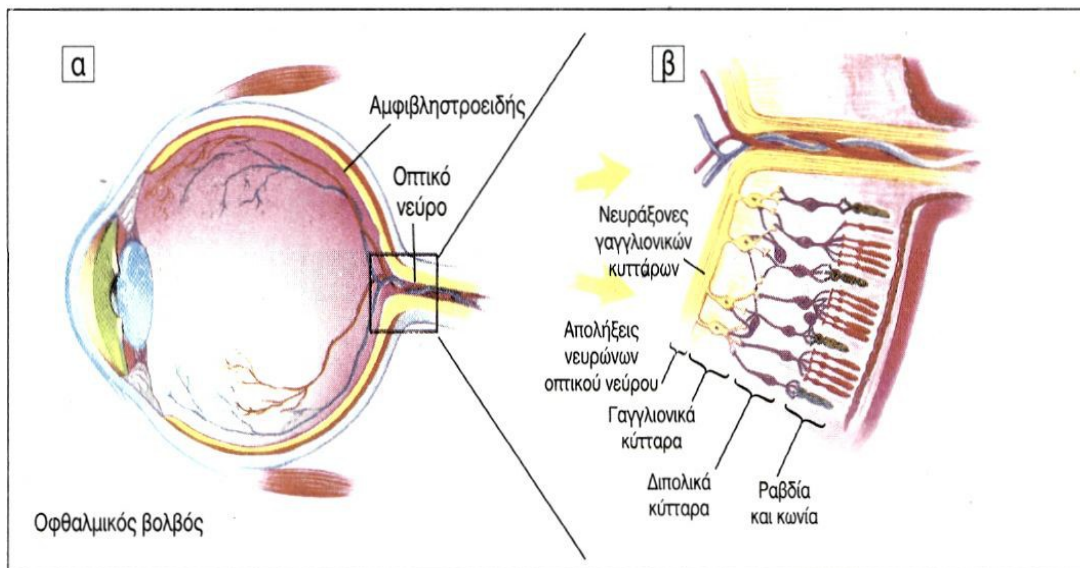
φωτοευαίσθητο χιτώνα του ματιού, τον αμφιβληστροειδή. Εκεί σχηματίζουν το αναγκαίο για την οπτική αντίληψη είδωλο. Η λειτουργία του φακού είναι η δημιουργία όσο το δυνατόν ευκρινέστερου ειδώλου στον αμφιβληστροειδή. Αυτό διαμορφώνεται ως οπτικό σήμα στα διάφορα στάδια της οπτικής οδού και καταλήγει σε ανώτερα κέντρα του εγκεφάλου (σχήμα 3).



Σχήμα 3: Η οπτική οδός προς τον εγκέφαλο.

Με τη βοήθεια των φωτοϋποδοχέων του αμφιβληστροειδή, τα ραβδία και τα κωνία, η φωτεινή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρικά σήματα (νευρικές ώσεις), τα οποία μεταβιβάζονται στα γαγγλιακά κύτταρα του αμφιβληστροειδή. Οι άξονες των γαγγλιακών κυττάρων εγκαταλείπουν τον οφθαλμό και τελικά η οπτική πληροφορία (όπως τα χρώματα, το σχήμα, η κίνηση και ο προσανατολισμός των αντικειμένων) μεταβιβάζεται δια μέσου των οπτικών νεύρων σε ανώτερα κέντρα του εγκεφάλου για περαιτέρω επεξεργασία, αναγκαία για την αντίληψη (σχήμα 4). Εκεί οι οπτικές πληροφορίες αναλύονται και έτσι προκαλούνται αντιδράσεις του

μυοσκελετικού μας συστήματος, όπως οι αντανακλαστικές και οι οφθαλμικές κινήσεις.



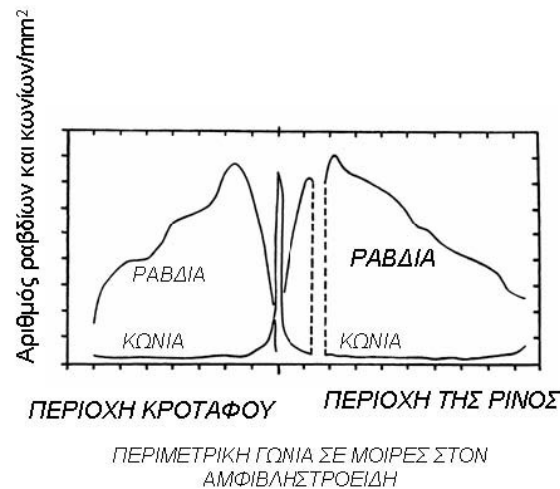
Σχήμα 4: Η οπτική πληροφορία μεταβιβάζεται μέσω των οπτικών νεύρων στον εγκέφαλο.

2.1.1 Ο αμφιβληστροειδής

Ο αμφιβληστροειδής είναι ο φωτοευαίσθητος χιτώνας του ανθρώπινου οφθαλμού, η λειτουργία του οποίου μας επιτρέπει να βλέπουμε. Έχει μήκος 32mm κατά μήκος του οριζώντιου άξονα, με πάχος 150μm στο κεντρικό βοθρίο, 400μm στο όριο του βοθρίου και 200μm στην περιφέρεια. Η οπτική αντίληψη ξεκινάει σε αυτόν με το σχηματισμό ενός ειδώλου στο επίπεδό του. Τα ειδικευμένα κύτταρά του, οι φωτοϋποδοχείς, είναι νευρώνες που μετατρέπουν τη φωτεινή ενέργεια των οπτικών ερεθισμάτων σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία στη συνέχεια διαβιβάζονται στον εγκέφαλο μέσω των οπτικών νεύρων.

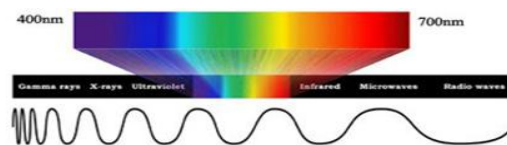
Υπάρχουν δύο τύποι φωτοϋποδοχέων στον αμφιβληστροειδή, τα ραβδία (rods) και τα κωνία (cones), τα οποία δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένα, καθώς ο αμφιβληστροειδής έχει περίπου 5 εκατομμύρια κωνία και 120 εκατομμύρια ραβδία. Τα περισσότερα ραβδία βρίσκονται στην περιφέρεια του αμφιβληστροειδή, ενώ τα περισσότερα κωνία είναι συγκεντρωμένα στο κεντρικό

βοθρίο, όπου και απουσιάζουν τα ραβδία (σχήμα 5). Τα ραβδία είναι υπεύθυνα αποκλειστικά για



Σχήμα 5: Η κατανομή ραβδίων και κωνίων στον αμφιβληστροειδή.

τη διεκπεραίωση της όρασης σε χαμηλά επίπεδα φωτεινότητας (σκοτοπική όραση). Παραμένουν τελείως ανενεργά σε συνθήκες υψηλού επιπέδου φωτεινότητας (φωτοπική όραση), όπου τα κωνία είναι πλήρως δραστηριοποιημένα. Τα κωνία περιέχουν διαφορετικές οπτικές χρωστικές και αποτελούν τη βάση της χρωματικής αντίληψης (color perception). Αντίθετα, τα ραβδία με το μοναδικό είδος χρωστικής τους απαντούν όλα με τον ίδιο τρόπο στα διαφορετικά μήκη κύματος του ορατού φάσματος της Η/Μ ακτινοβολίας (σχήμα 6). Για το λόγο αυτό η όραση μέσω των ραβδίων είναι άχρωμη.



Περιοχή	Εύρος μηκών κύματος	Το χρώμα
Κόκκινου (Red)	760 nm – 630 nm	Κόκκινο (R) 700 nm
Πορτοκαλί (orange)	630 nm – 600 nm	Πορτοκαλί 620 nm
Κίτρινου (Yellow)	600 nm – 570 nm	Κίτρινο 580 nm
Πράσινου (Green)	570 nm – 490 nm	Πράσινο (G) 530 nm
Μπλε (Blue)	490 nm – 450 nm	Μπλε (B) 475 nm
Ιώδους (Violet)	400 nm – 440 nm	Ιώδες (μωβ) 440 nm
*Ινδικό (idigo) του Νεύτωνα	450 nm – 440 nm	

Σχήμα 6: Το ορατό φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για τον άνθρωπο.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι στα παρακάτω γίνεται αντιστοιχία μήκους με γωνία όρασης, που αναφέρεται είτε σε μοίρες ($^{\circ}$ ή deg), είτε σε μονάδες arcmin. Το 1 arcmin είναι το 1/60 της μοίρας.

Τρεις είναι οι χαρακτηριστικές περιοχές του αμφιβληστροειδή (σχήμα 7):

1. η ωχρά κηλίδα (macula lutea),

διαμέτρου περίπου 5.5mm ($\sim 17^{\circ}$ γωνία όρασης),

2. το βοθρίο (foveal pit),

που καταλαμβάνει την κεντρική περιοχή της ωχράς κηλίδας, έχει διάμετρο 1.5mm ($\sim 5^{\circ}$ γωνία όρασης) και η κεντρική του περιοχή ($\sim 1^{\circ}$) ονομάζεται κεντρικό βοθρίο (foveola), το λεπτότερο σημείο του αμφ/δής ($\sim 150\mu\text{m}$). Το κεντρικό βοθρίο στερείται ραβδίων και εμφανίζει την μέγιστη ικανότητα ευκρίνειας λόγω της υψηλής πυκνότητας κωνίων.

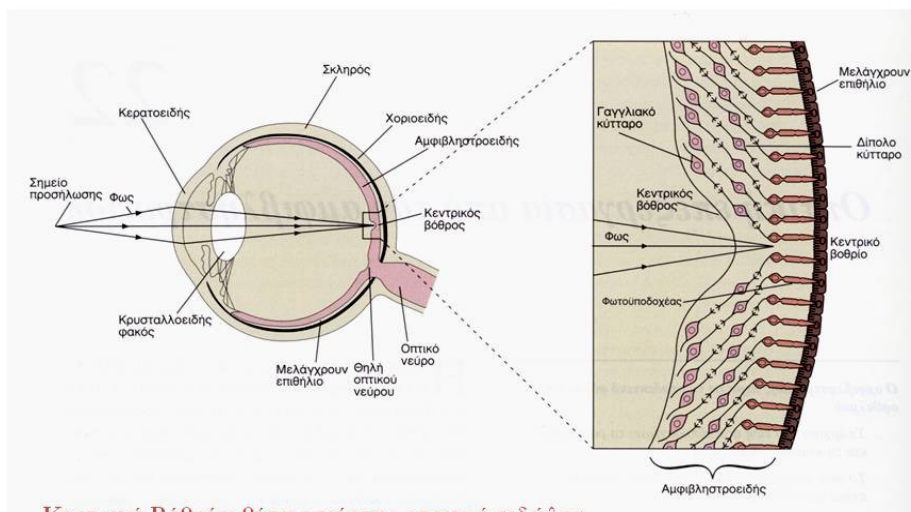
3. η θηλή του οπτικού νεύρου (optic disk),

που αποτελεί την περιοχή από την οποία οι ίνες του οπτικού νεύρου εγκαταλείπουν τον αμφ/δή, ενώ στερείται φωτοϋποδοχέων και έτσι δημιουργεί ένα τυφλό σημείο στο οπτικό μας πεδίο.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε στο σημείο αυτό ότι η διάταξη των νευρώνων στον αμφιβληστροειδή κυρίως ανιχνεύει και συγκρίνει αλλαγές, για παράδειγμα στη φωτεινότητα ή στη χρωματικότητα ενός αντικειμένου, και αγνοεί κατά μεγάλο μέρος τις φωτεινές εντάσεις που είναι σταθερές στο χώρο ή στο χρόνο. Συνεπώς οποιαδήποτε απότομη αλλαγή στην ένταση της αμφιβληστροειδικής εικόνας καταχωρείται και διαβιβάζεται, ενώ χαρακτηριστικά που είναι σταθερά, όπως η συνολική ή η μέση τιμή φωτεινότητας, ουσιαστικά αγνοούνται. Το αποτέλεσμα είναι οι στάσιμες εικόνες να προκαλούν την αδρανοποίηση των οπτικών νευρώνων, γνωστή ως «νευρωνική προσαρμογή» και άρα την αποτυχία της οπτικής μας αντίληψης.

S1

Οπτική Επεξεργασία σε Αμφιβληστροειδή



Κεντρικό Βόθριο: θέση εστίασης οπτικού ειδώλου
Θηλή οπτικού νεύρου: τυφλό σημείο

Σχήμα 7: Η οπτική επεξεργασία στον αμφιβληστροειδή

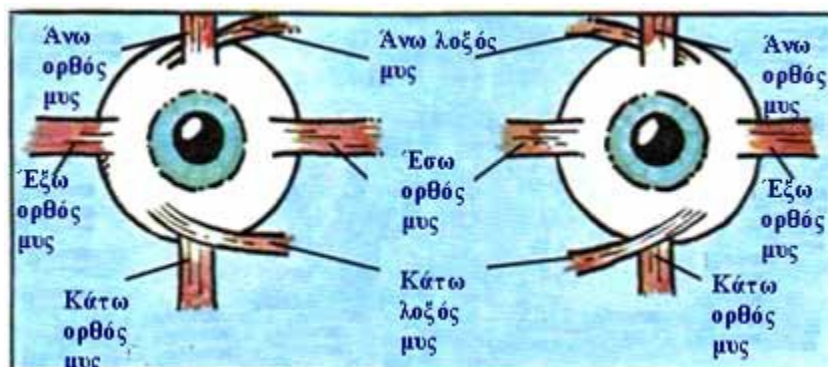
2.1.2 Οφθαλμικοί μύες

Οι οφθαλμοί μπορούν να περιστρέφονται από τη δράση έξι εξοφθάλμιων μυών (ανά

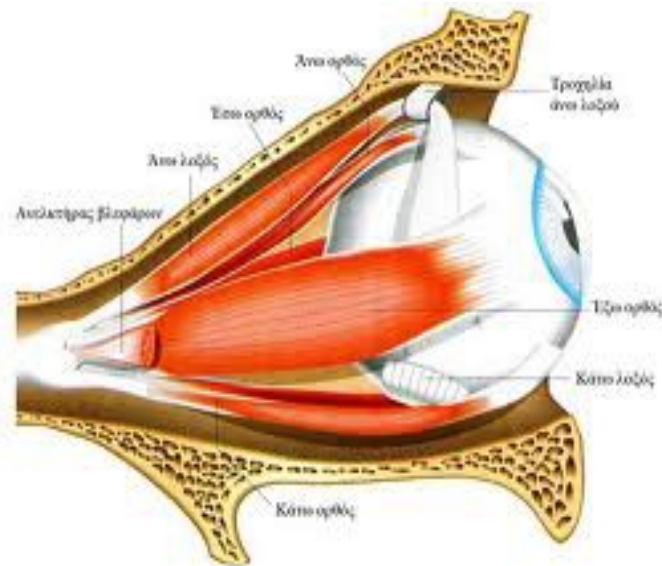


Σχήμα 8: Οι οφθαλμικές κατευθύνσεις κίνησης

οφθαλμό) οι οποίοι ενεργούν ως τρία ανταγωνιστικά ζεύγη επιτρέποντας κινήσεις κροταφικές (απαγωγής), ρινικές (προσαγωγής), προς τα άνω και κάτω, αλλά και κυκλοστροφικές (σχήμα 8). Τα ανταγωνιστικά ζεύγη οφθαλμικών μυών είναι : άνω και κάτω ορθός, έσω και έξω ορθός, άνω και κάτω λοξός (σχήμα 9α). Βεβαίως η κίνηση των οφθαλμών είναι συνήθως συνδυασμένη δράση των οφθαλμικών μυών. Ο έσω και ο έξω ορθός κινούν τον οφθαλμό στο οριζόντιο επίπεδο, ο άνω και ο κάτω ορθός κινούν τον οφθαλμό στο κατακόρυφο επίπεδο, ενώ ο άνω και ο κάτω λοξός υποβοηθούν για την ανύψωση και την ύφεση του οφθαλμού και συνεργάζονται με τους υπόλοιπους για συνδυασμένες και κυκλοστροφικές κινήσεις. Τέλος, οι οφθαλμοκινητικοί μύες ελέγχονται από τρία κρανιακά νεύρα και ο καθένας είναι υπεύθυνος για ξεχωριστή κίνηση ή συνδυασμό ξεχωριστών κινήσεων (σχήμα 9β).



(α)



(β)

Σχήμα 9: (α) οι οφθαλμικοί μύες και (β) η τριδιάστατη απεικόνισή τους και η θέση τους γύρω από το βολβό

2.1.3 Φοβική και Περιφερική όραση

Λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής των φωτοϋποδοχέων στον αμφιβληστροειδή, διακρίνονται δύο περιοχές διαφορετικής λειτουργικότητας (σχήμα 5). Η μία είναι το κεντρικό βοθρίο, με υψηλή διακριτική ικανότητα και δυνατότητα χρωματικής όρασης (λόγω της μεγάλης πυκνότητας κωνίων), υπεύθυνη για πολύπλοκη και λεπτομερή οπτική επεξεργασία (φοβική ή κεντρική όραση). Η άλλη περιοχή είναι περιφερική της πρώτης, χαμηλής διακριτικής ικανότητας (λόγω της αυξημένης πυκνότητας των ραβδίων), σημαντική όμως για την ανίχνευση και την κατεύθυνση των ερεθισμάτων (περιφερική όραση). Η φοβική όραση είναι υπεύθυνη για την επεξεργασία της λεπτομέρειας (περίγραμμα και όρια εικόνων), του χρώματος και την εκτίμηση του βάθους καθώς και πιο προηγμένων επεξεργασιών, όπως η αναγνώριση προσώπων. Από την άλλη μεριά η περιφερική όραση είναι σημαντική για τον προσανατολισμό στο χώρο, την αντίληψη της κίνησης και τον εντοπισμό των αντικειμένων προς αναγνώριση. Είναι λοιπόν απαραίτητη η ύπαρξη ενός συμπληρωματικού μηχανισμού για την κίνηση των οφθαλμών, το

«σύστημα παρατήρησης» (gaze system), με τη βοήθεια του οποίου όταν χρειάζεται να αναγνωρίσουμε ένα αντικείμενο στην περιφέρεια θα στρέψουμε και θα κατευθύνουμε τους οφθαλμούς μας, το κεφάλι μας ή ακόμη και όλο μας το σώμα, ώστε το είδωλό του να σχηματιστεί στο κεντρικό βοθρίο του αμφιβληστροειδή.

2.2 Το σύστημα παρατήρησης (Gaze system)

Οι κινήσεις των οφθαλμών είναι χρήσιμες για την εξερεύνηση του εξωτερικού κόσμου. Χάρη σ' αυτές τα είδωλα των αντικειμένων του ενδιαφέροντός μας μεταφέρονται στο κεντρικό βοθρίο, όπου μπορούν να αναλυθούν. Η όραση είναι μία ενεργητική διαδικασία κατά την οποία οι κινήσεις του οφθαλμού μετακινούν το βλέμμα μας πολύ γρήγορα σε επιλεγμένα σημεία της οπτικής μας αντίληψης, επιτρέποντάς μας να σαρώνουμε το οπτικό μας πεδίο και να συγκεντρώνουμε την προσοχή μας σε επιλεγμένα σημεία της εικόνας που αντικρίζουμε (σχήμα 10). Επειδή η επιλογή αυτή είναι υποκειμενική και εξαρτάται από πολυποίκιλους παράγοντες, κάθε σκανάρισμα αντανακλά την πρόθεση και το «σκοπό» του παρατηρητή, είτε συνειδητό και εκούσιο, είτε όχι.



Σχήμα 10: Η “σάρωση” μιας εικόνας.

Η διαδικασία της προσήλωσης σε ένα αντικείμενο ελέγχεται από ένα συνδυασμό τριών υποσυστημάτων οφθαλμοκινητικού ελέγχου, τα οποία συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρατήρησης (gaze system). Ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρατήρησης συλλαμβάνει και διατηρεί τις εικόνες ενδιαφέροντος στο κεντρικό βοθρίο, ακινητοποιεί την παρατηρούμενη εικόνα όταν το κεφάλι ή/και οι οφθαλμοί κινούνται και τέλος, διατηρεί τους οφθαλμούς ακίνητους όταν η εικόνα είναι εστιασμένη. Το σύστημα παρατήρησης ελέγχει όλες τις οφθαλμικές κινήσεις και τις ταυτόχρονες κινήσεις του κεφαλιού και χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες:

1. το οφθαλμοκινητικό σύστημα (oculomotor system)
2. το σύστημα σταθεροποίησης / προσήλωσης (fixation system)
3. το σύστημα κίνησης του κεφαλιού (head movement system)

Επιπλέον, οι οφθαλμοκινήσεις διακρίνονται σε συζυγείς (conjugate) και μη συζυγείς (non-conjugate), ανάλογα με το αν οι δύο οφθαλμοί κινούνται στην ίδια κατεύθυνση (π.χ. σακκαδική κίνηση) ή σε αντίθετες κατευθύνσεις (π.χ. σύγκλιση των οφθαλμών κατά την προσαρμογή) αντίστοιχα. Στις συζυγείς κινήσεις οι οφθαλμοί κινούνται επίσης περίπου κατά το ίδιο πλάτος και την ίδια γωνιακή ταχύτητα.

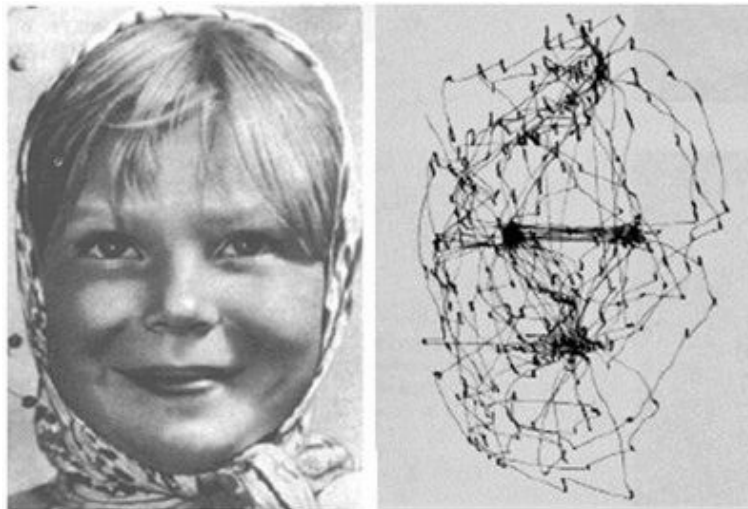
2.2.1 Το οφθαλμοκινητικό σύστημα (Oculomotor system)

Ο ρόλος του οφθαλμοκινητικού συστήματος είναι να διατηρεί το είδωλο του αντικειμένου-στόχου στο κεντρικό βοθρίο και συνεπώς υποστηρίζει την παρατήρηση ακίνητων και κινούμενων στόχων. Αυτό επιτυγχάνεται με τριών ειδών κινήσεις:

- (α) τις σακκαδικές κινήσεις (saccades),
- (β) τις ομαλές κινήσεις παρακολούθησης (smooth pursuit movements) και
- (γ) τις κινήσεις σύγκλισης / απόκλισης (vergence eye movements).

2.2.1 (α) Σακκαδικές κινήσεις (saccades)

Οι σακκαδικές είναι εκούσιες κινήσεις των οφθαλμών (πάνω από 100.000 ημερησίως), με τις οποίες «σαρώνουμε» μία εικόνα (σχήμα 11). Είναι οι πιο γρήγορες κινήσεις από όλες τις κινήσεις του ανθρώπινου σώματος ($\sim 700^\circ/\text{sec}$) και είναι πολύ σύντομες ($\sim 50 \text{ msec}$). Το πλάτος τους ($1^\circ - 20^\circ$) και η κατεύθυνσή τους είναι εκούσια, ενώ η ταχύτητά τους είναι ακούσια και καθορίζεται από την εκκεντρότητα του στόχου. Επιπλέον, η εκκεντρότητα και η προβλεψιμότητα του στόχου καθορίζει και την καθυστέρηση της απόκρισής τους. Τέλος, υφίστανται και χωρίς την απαραίτητη ύπαρξη στόχου, ακόμα δηλαδή και σε σκοτοπικές συνθήκες.



Σχήμα 11: Οι σακκαδικές κινήσεις κατά τη διάρκεια “σάρωσης” μιας εικόνας. Οι κουκκίδες αντιπροσωπεύουν προσωρινά σημεία σταθεροποίησης.

2.2.1 (β) Ομαλές κινήσεις παρακολούθησης (smooth pursuit movements)

Οι ομαλές κινήσεις παρακολούθησης είναι κινήσεις με τις οποίες μπορούμε να παρακολουθήσουμε ένα αντικείμενο που κινείται στο οπτικό μας πεδίο. Η μέγιστη ταχύτητά τους

είναι περίπου 100°/sec (πολύ μικρότερη από αυτή των σακκαδικών) και εξαρτάται από την ταχύτητα του κινούμενου αντικειμένου. Η προβλεψιμότητα της κίνησης του αντικειμένου (κατεύθυνση και στιγμή έναρξης) καθορίζει και την ταχύτητα απόκρισής τους.

2.2.1 (γ) Κινήσεις σύγκλισης - απόκλισης (vergence movements)

Είναι μη συζυγείς οφθαλμικές κινήσεις κατά τις οποίες τα μάτια είτε συγκλίνουν (converge), κατά την διάρκεια της προσαρμογής, είτε αποκλίνουν (diverge) και συμβαίνουν όταν ένα αντικείμενο-στόχος πλησιάζει ή απομακρύνεται αντίστοιχα. Εξαρτώνται από το βαθμό ανομοιότητας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου. Ανομοιότητα του αμφιβληστροειδή (retina disparity) ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο το είδωλο του αντικειμένου-στόχου προβάλλεται σε διαφορετικές περιοχές του αμφιβληστροειδή σε κάθε μάτι. Η σχετική αυτή κίνηση των ματιών αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία η οποία απαιτεί ανώτερη επεξεργασία στον εγκεφαλικό φλοιό και για αυτό παρατηρείται καθυστέρηση στην απόκριση κίνησης.

2.2.2 Το σύστημα σταθεροποίησης / προσήλωσης (Fixation system)

Το σύστημα σταθεροποίησης προσδιορίζεται από τις οφθαλμικές κινήσεις προσήλωσης σε ένα σταθερό σημείο. Το οπτικό μας σύστημα ελέγχεται από τη νευρωνική προσαρμογή, η οποία αποτελεί τη βάση κάθε οπτικής επεξεργασίας. Οι σταθερές φωτεινές εντάσεις παράγουν αδύναμες νευρωνικές αποκρίσεις, ενώ οι απότομες αλλαγές των φωτεινών εντάσεων στο χώρο και το χρόνο προκαλούν ισχυρές νευρωνικές αποκρίσεις ([15], [11]). Το αποτέλεσμα πρακτικά είναι τα σταθερά χαρακτηριστικά να εξασθενούν και τελικά να χάνονται από την οπτική μας αντίληψη.

Οι οφθαλμικές κινήσεις κατά τη διάρκεια της προσήλωσης είναι συνεπώς απαραίτητες, για

να ξεπεραστεί η αδυναμία της οπτικής αντίληψης λόγω της αμετάβλητης διέγερσης των αμφιβληστροειδικών νευρώνων, ακόμη και αν αυτό σημαίνει ενδεχόμενη μείωση της οπτικής οξύτητας [22]. Ο σκοπός των οφθαλμοκινητικών μηχανισμών προσήλωσης δεν είναι η αμφιβληστροειδική σταθεροποίηση, αλλά η ελεγχόμενη μετακίνηση του αμφιβληστροειδικού ειδώλου, ώστε να είναι τελικά κατάλληλο για οπτική επεξεργασία [24].

Πράγματι οι οφθαλμοί μας κινούνται συνεχώς, ακόμα και όταν προσηλώνουμε το βλέμμα μας σε κάποιο αντικείμενο. Τις οφθαλμοκινήσεις αυτές, ενώ το πλάτος τους είναι αρκετό για να είναι ορατές, δεν τις αντιλαμβανόμαστε, ενώ αν δεν υπήρχαν, η οπτική μας αντίληψη θα χανόταν τελείως, ως αποτέλεσμα της νευρωνικής προσαρμογής [17]. Η επιστημονική κοινότητα σήμερα συμφωνεί για την ύπαρξη τριών κυρίως τύπων οφθαλμικών κινήσεων προσήλωσης ([29],[2]):

- ◆ τις τρέμουλο-κινήσεις ή φυσιολογικό νυσταγμό (tremor)
- ◆ τις κινήσεις διολίσθησης (drifts) και
- ◆ τις μικροσακκαδικές κινήσεις (microsaccades)

2.2.2 (α) Τρέμουλο-κινήσεις ή φυσιολογικός νυσταγμός (Tremor)

Οι τρέμουλο-κινήσεις είναι ακούσιες, μη συζυγείς, απεριοδικές και κυματοειδείς κινήσεις των οφθαλμών και έχουν το μικρότερο πλάτος από όλες τις οφθαλμικές κινήσεις. Χαρακτηριστικά έχει ειπωθεί για το πλάτος τους ότι δεν ξεπερνά τη διάμετρο ενός κωνίου στην περιοχή του βοθρίου ([20], [29], [2]), δηλαδή περίπου $2.5\mu\text{m}$ ή 0.5arcmin (αντιστοιχία σε γωνία όρασης). Αποκαλούνται και φυσιολογικός νυσταγμός, έχουν συχνότητα περίπου 90Hz [2] και ταχύτητα μικρότερη από 20arcmin/sec [17]. Τα πλάτη και οι συχνότητές τους είναι συνήθως στο εύρος του θορύβου του συστήματος καταγραφής και για το λόγο αυτό είναι αρκετά δύσκολη η ακριβής καταγραφή τους.

Οι τρέμουλο-κινήσεις δεν δημιουργούν τρέμουλο στην οπτική μας αντίληψη. Αυτό

συμβαίνει επειδή η συχνότητά τους είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη διακριτική χρονική ικανότητα του ανθρώπου¹, με αποτέλεσμα το τρέμουλο του ειδώλου να μη γίνεται αντιληπτό ([10], [23]). Είναι σημαντικό το ότι, παρόλο το μικρό τους μέγεθος, είναι ικανές να διατηρήσουν τους νευρώνες σε λειτουργία. Παρόλα αυτά ο ρόλος τους στην υποστήριξη της όρασης δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί. Επιπλέον οι τρέμουλο-κινήσεις συμβαίνουν ανεξάρτητα στους δύο οφθαλμούς, κάτι που ίσως δημιουργεί ένα όριο στη στερεοσκοπική μας όραση ([21], [25]).

2.2.2 (β) Κινήσεις διολίσθησης (Drifts)

Οι κινήσεις διολίσθησης είναι αργές καμπυλοειδείς κινήσεις των οφθαλμών, που συμβαίνουν ταυτόχρονα με τις τρέμουλο-κινήσεις στο χρονικό διάστημα μεταξύ των μικροσακκαδικών κινήσεων, για λόγους διατήρησης της προσήλωσης. Είναι ακούσιες κινήσεις και έχουν καταγραφεί και ως συζυγείς και ως μη συζυγείς. Συμβαίνουν περίπου κατά το 95% - 97% του χρόνου προσήλωσης και η ταχύτητά τους δεν ξεπερνά τα 30 arcmins/sec [17].

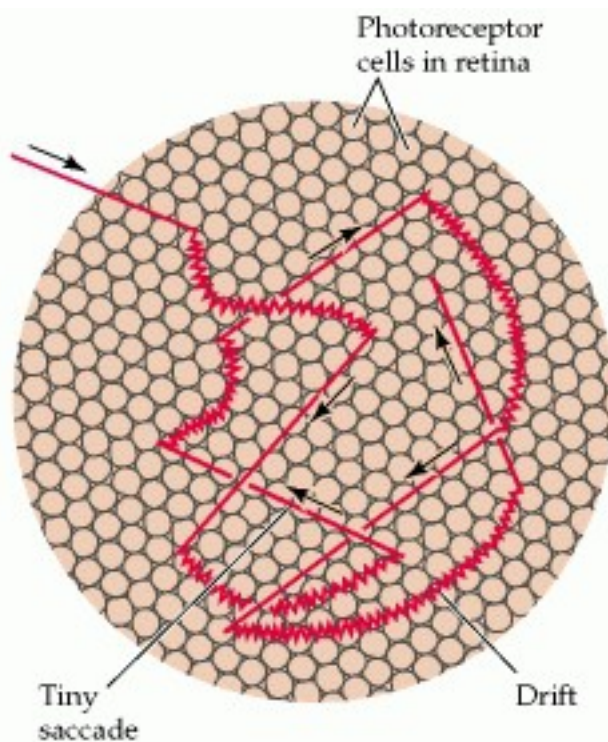
Κατά τη διάρκειά τους το είδωλο μετατοπίζεται για 5-15 φωτοϋποδοχείς, δηλαδή για 2.5arcmins - 7.5arcmins (12.5 μ m - 37.5 μ m) και για το λόγο αυτό αρχικά η ύπαρξή τους είχε αποδοθεί στην αστάθεια των οφθαλμοκινητικών μυών. Πρόσφατες έρευνες, όμως, έχουν δείξει πως ο ρόλος τους είναι η διατήρηση της προσήλωσης και είναι αντισταθμιστικός ως προς το ρόλο των μικροσακκαδικών κινήσεων, σε διαστήματα όπου οι τελευταίες απουσιάζουν ή σε διαστήματα όπου η αντιστάθμισή τους δεν είναι επαρκής ([19], [26]).

2.2.2 (γ) Μικροσακκαδικές κινήσεις (Microsaccades)

Οι μικροσακκαδικές αποτελούν τις γρηγορότερες και μεγαλύτερες σε εύρος από τις οφθαλμικές

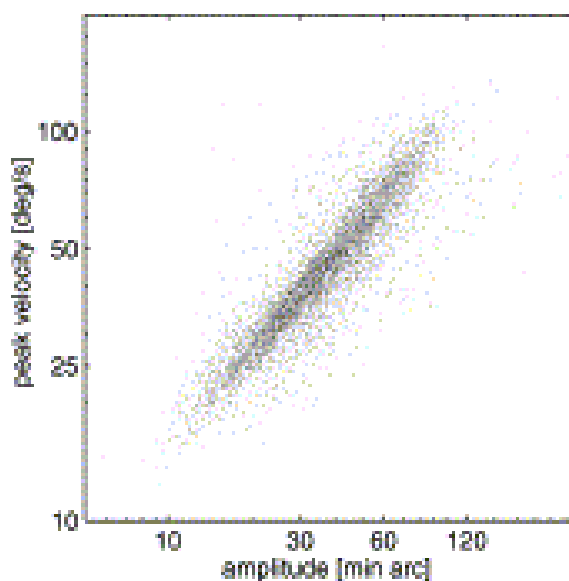
¹ Μέγιστη διακριτική χρονική ικανότητα (Critical Flicker Frequency): η μέγιστη συχνότητα κατά την οποία το αναβόσβημα μίας πηγής φωτός γίνεται αντιληπτό. Σε φωτοπικές συνθήκες είναι 60-70Hz.

κινήσεις προσήλωσης. Είναι μικρές, απότομες, συζυγείς και ακούσιες κινήσεις, συμβαίνουν στη διάρκεια της προσήλωσης και μεταφέρουν το αμφιβληστροειδικό είδωλο δια μέσω μερικών δεκάδων φωτοϋποδοχέων. Το πλάτος τους κυμαίνεται μεταξύ 5 arcmin - 120 arcmin (25 μm - 100 μm) και η ταχύτητά τους είναι μεγαλύτερη από 10%/sec. Η συχνότητά τους είναι από 0.1 Hz - 5.0 Hz, ενώ διαρκούν περίπου 25 msec (Ditchburn 1980). Οι μικροσακκαδικές κινήσεις δεν μπορούν να προσδιοριστούν μόνο από το μέγεθός τους καθώς το πλάτος των εκούσιων σακκαδικών κινήσεων μπορεί να είναι το ίδιο μικρό. Για το λόγο αυτό καθοριστικά για τον προσδιορισμό τους είναι η ταχύτητα και η επιτάχυνσή τους. Μικροσακκαδικές κινήσεις έχουν παρατηρηθεί και σε διάφορα άλλα είδη εκτός του ανθρώπου και κυρίως σε είδη με φοβική όραση (foveal vision).



Σχήμα 12: Οφθαλμικές κινήσεις προσήλωσης. Στη σχηματική αυτή παράσταση του βοθρίου οι ευθείες γραμμές αναπαριστούν μικροσακκαδικές κινήσεις, οι καμπυλοειδείς γραμμές αναπαριστούν κινήσεις διολίσθησης, ενώ οι τρέμουλο-κινήσεις φαίνονται ως ταλαντωτικές καμπυλοειδείς γραμμές. Το είδωλο οδηγείται προς το κέντρο της ωχράς κηλίδας μέσω των μικροσακκαδικών κινήσεων, μετά την απομάκρυνσή του από αυτήν από τις κινήσεις διολίσθησης, κατά τις οποίες συμβαίνουν ταυτόχρονα και τρέμουλο-κινήσεις.

Ένας από τους πιθανότερους ρόλους των μικροσακκαδικών κινήσεων είναι η αντιστάθμιση των μετατοπίσεων των οφθαλμών, που παράγονται από τις κινήσεις διολίσθησης (drifts) ([8], [3], [29]). Η πραγματοποίηση, η κατεύθυνση και το πλάτος των μικροσακκαδικών σχετίζεται με προηγούμενες μετατοπίσεις του ειδώλου στον αμφιβληστροειδή. Αν οι κινήσεις διολίσθησης, για παράδειγμα, μεταφέρουν το στόχο προσήλωσης μακριά από το κεντρικό βοθρίο, οι μικροσακκαδικές κινήσεις τείνουν να το επαναφέρουν στην αρχική του θέση (σχήμα 12). Επιπλέον παίζουν σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη της όρασης, αντιδρώντας στην αμφιβληστροειδική «κόπωση», δηλαδή στη νευρωνική προσαρμογή και αδρανοποίηση ([7], [19]). Βοηθούν στην εξισορρόπηση της νευρωνικής προσαρμογής σε μικρή κλίμακα χρόνου και στη διόρθωση των σφαλμάτων προσήλωσης σε πιο ευρεία κλίμακα χρόνου [9].



Σχήμα 13 : Η γραμμική σχέση πλάτους και ταχύτητας των μικροσακκαδικών κινήσεων.

Η σχέση της ταχύτητας των μικροσακκαδικών με το πλάτος τους είναι γραμμική (σχήμα 13), κατά αντιστοιχία με τις σακκαδικές κινήσεις ([30], [16], [18]). Για το λόγο αυτό έχει προταθεί πως ίσως οι μικροσακκαδικές και οι σακκαδικές κινήσεις να ελέγχονται από τα ίδια κέντρα του

εγκεφάλου [30]. Όσον αφορά στην κατευθυντικότητα των μικροσακκαδικών κινήσεων (αλλά και των κινήσεων διολίσθησης), έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει κάποια επιλεκτικότητα, τόσο στις οριζόντιες όσο και στις κατακόρυφες κατευθύνσεις. Παράγοντες όπως η παρουσία αστιγματισμού, οι οπτικές εκτροπές υψηλής τάξης αλλά και η αστάθεια των οφθαλμοκινητικών μυών, πιθανότατα να την επηρεάζουν.

Παρά το γεγονός ότι οι μικροσακκαδικές είναι ακούσιες κινήσεις, έχει παρατηρηθεί πως μπορούν να κατασταλούν εκούσια από έμπειρους παρατηρητές για μερικά δευτερόλεπτα χωρίς την απώλεια της οπτικής αντίληψης του στόχου ([26], [27]), ενώ συμβαίνει συχνά και κατά την πραγματοποίηση εργασιών που απαιτούν πολύ προσεκτική προσήλωση ([28], [13], [14], [1]). Φυσικά η παρατήρηση αυτή δεν αναιρεί το θεμελιώδη ρόλο των μικροσακκαδικών κινήσεων στη λειτουργικότητα της όρασης [6].

2.2.3 Το σύστημα κίνησης του κεφαλιού (head movement system)

Το σύστημα κίνησης του κεφαλιού είναι υπεύθυνο για το συγχρονισμό των κινήσεων του κεφαλιού με τις κινήσεις των οφθαλμών, με σκοπό τη διατήρηση του αντικειμένου-στόχου στο κεντρικό βοθρίο. Λόγω της συνεχούς εκούσιας και ακούσιας κίνησης του κεφαλιού, επηρεάζονται άμεσα όλες οι οφθαλμοκινήσεις και συνεπώς το οφθαλμοκινητικό και το σύστημα παρακολούθησης / προσήλωσης συνδέονται άρρηκτα με το σύστημα κίνησης του κεφαλιού.

Έχει παρατηρηθεί από παλαιότερες έρευνες ότι η κίνηση του κεφαλιού παίζει βοηθητικό ρόλο στην αποφυγή της οπτικής νευρωνικής προσαρμογής. Έτσι τα χαρακτηριστικά (μέγεθος, ταχύτητα, κατεύθυνση και συχνότητα) των οφθαλμοκινήσεων παρουσιάζουν διαφορές όταν το κεφάλι είναι εξωγενώς σταθεροποιημένο από όταν είναι ελεύθερο να κινηθεί.

Το σύστημα κίνησης του κεφαλιού αποτελείται από δύο αντανακλαστικά, τα οφθαλμο-κεφαλικά αντανακλαστικά:

- (α) το οπτοκινητικό αντανακλαστικό ή οπτοκινητικό νυσταγμό (optokinetic reflex – OKR) και
(β) το οφθαλμο-αιθουσαίο αντανακλαστικό (vestibulo-ocular reflex – VOR).

2.2.3 (α) Το οπτοκινητικό αντανακλαστικό (OKR)

Το οπτοκινητικό αντανακλαστικό ή ο οπτοκινητικός νυσταγμός αποτελείται από εναλλαγή σακκαδικών κινήσεων και ομαλών κινήσεων παρακολούθησης, αντίθετης κατεύθυνσης, και συμβαίνει όταν προσπαθούμε να προσηλώσουμε σε διαδοχικά περάσματα κινούμενων αντικειμένων ή όταν βρισκόμαστε σε κίνηση και παρατηρούμε σταθερά αντικείμενα. Όταν βρισκόμαστε, για παράδειγμα, μέσα σε ένα κινούμενο όχημα και παρατηρούμε μια σειρά από δέντρα, με μια σακκαδική κίνηση εστιάζεται το είδωλο ενός δέντρου στο κεντρικό βοθρίο και το παρακολουθούμε πραγματοποιώντας μια ομαλή κίνηση παρακολούθησης μέχρι να χαθεί από το οπτικό μας πεδίο, όπου με την πραγματοποίηση μιας σακκαδικής εστιάζουμε στο επόμενο δέντρο. Οι κινήσεις παρακολούθησης αποτελούν την αργή φάση (slow phase) και οι σακκαδικές τη γρήγορη φάση (fast phase) μετατόπισης των οφθαλμών στον επόμενο στόχο.

2.2.3 (β) Το οφθαλμο-αιθουσαίο αντανακλαστικό (VOR)

Το οφθαλμο-αιθουσαίο αντανακλαστικό αποτελεί την πιο αρχέγονη αντανακλαστική κίνηση ελέγχου της προσήλωσης του βλέμματος. Καθοδηγείται από ένα μηχανισμό στο εσωτερικό του αυτιού, τον αιθουσαίο, ο οποίος αποτελείται από τρεις ημικυκλικούς σωλήνες με υγρό που παρέχουν στον εγκέφαλο πληροφορίες για τη θέση του σώματος και του κεφαλιού στο χώρο. Ο μηχανισμός αυτός λειτουργεί έτσι, ώστε να διατηρούμε το είδωλο μιας εικόνας στο κεντρικό βοθρίο του αμφ/δή, ακόμα και όταν το κεφάλι ή το σώμα κινούνται. Ουσιαστικά, τα μάτια στρέφονται σε αντίθετη κατεύθυνση από το κεφάλι, ώστε να προσηλώνουν σε κάποιο σταθερό σημείο. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα ανάγνωσης ενός κειμένου: το κεφάλι κινείται και για

να συνεχίσουμε την ανάγνωση αναπτύσσονται αντανακλαστικές κινήσεις.

2.3 Ο ρόλος των οφθαλμικών κινήσεων προσήλωσης

Ο ρόλος των οφθαλμικών κινήσεων κατά την διάρκεια που προσηλώνουμε σε ένα στόχο, αλλά και κατά την διάρκεια που ανιχνεύουμε το οπτικό μας περιβάλλον, είναι πολύ σημαντικός για τη λειτουργικότητα της όρασης. Ένα μεγάλο ερώτημα το οποίο και παραμένει αναπάντητο είναι το ποιος είναι ο ακριβής λόγος συνύπαρξης των τριών αυτών διαφορετικών οφθαλμικών μικροκινήσεων προσήλωσης.

Τα υποδεκτικά πεδία στην περιοχή της fovea είναι τόσο μικρά ώστε οι drift και οι tremor κινήσεις μπορούν και εξαλείφουν την αδρανοποίηση των νευρώνων ακόμα και κατά την απουσία των μικροσακκαδικών κινήσεων. Επίσης οι μικροσακκαδικές κινήσεις είναι επαρκείς για την υποστήριξη της όρασης ακόμα και κατά την απουσία των drifts και των tremors γιατί τα υποδεκτικά πεδία στην περιφέρεια είναι τόσο μεγάλα, ώστε μόνο οι μικροσακκαδικές κινήσεις είναι αρκετά μεγάλες και γρήγορες (σε σύγκριση με drifts και tremors) για να εμποδίσουν την νευρωνική αδρανοποίηση.

Αδιευκρίνιστο επίσης παραμένει και το αν διαφέρει ο ρόλος των μικροσακκαδικών κινήσεων από αυτόν των drifts και tremors. Το πιο πιθανό είναι ότι οι μικροσακκαδικές κινήσεις είναι περισσότερο σημαντικές για την περιφερική όραση και οι drifts και οι tremors περισσότερο σημαντικές για την κεντρική όραση.

Όσον αφορά την προτιμώμενη κατεύθυνση των μικροσακκαδικών και drift κινήσεων έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα αμιγώς ατομικό χαρακτηριστικό που μπορεί να εξαρτάται από τις οπτικές εκτροπές, τον προσανατολισμό των νευρώνων ή την αστάθεια των οφθαλμοκινητικών μυών.

2.4 Βλεφαρισμοί των οφθαλμών

Το βλεφάρισμα είναι η γνωστή κίνηση γρήγορου ανοιγοκλεισίματος των βλεφάρων. Μια νέα μελέτη ειδικών του Πανεπιστημίου της Οσάκα στην Ιαπωνία δείχνει ότι ο ανθρώπινος εγκέφαλος εκμεταλλεύεται αυτόν τον ελάχιστο χρόνο του ανοιγοκλεισίματος των βλεφάρων για να ξεκουραστεί. Οι περισσότεροι άνθρωποι έχουν περίπου 15 - 20 τέτοιες στιγμές ξεκούρασης του εγκεφάλου τους ανά λεπτό. Αυτή η πνευματική ξεκούραση μπορεί να διαρκέσει από ένα έως και μερικά δευτερόλεπτα προτού αποκατασταθεί πλήρως η προσοχή του ατόμου. Τα αποτελέσματα προέκυψαν μετά από διεξαγωγή απεικονιστικών εξετάσεων σε 20 υγιείς νεαρούς εθελοντές, στη διάρκεια των οποίων οι ερευνητές παρατήρησαν πως όταν οι εθελοντές έκλειναν στιγμιαία τα μάτια τους οι περιοχές του εγκεφάλου που συνδέονται με την προσοχή έβγαιναν παροδικά εκτός λειτουργίας [5].

Τα σήματα που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης ήταν σήματα γωνιακής απόκλισης των οφθαλμών και σήματα γωνιακής ταχύτητας των οφθαλμών. Στα σήματα αυτά καταγράφηκαν και βλεφαρισμοί, όπως είναι φυσιολογικό, οι οποίοι έχουν χαρακτηριστικά υψηλή ταχύτητα (υψηλότερη της ταχύτητας των σακκαδικών), ενώ η διάρκειά τους είναι μικρότερη από αυτή των σακκαδικών κινήσεων των οφθαλμών. Με αυτόν τον τρόπο έγινε δυνατός και ο διαχωρισμός τους, όπως εξηγείται εκτενέστερα παρακάτω. Συνεπώς, εκτός από τις σακκαδικές και μικροσακκαδικές κινήσεις, συμπεριλαμβάνονται στη διαδικασία ταξινόμησης του προτεινόμενου συστήματος DSS και οι βλεφαρισμοί, καθώς εμφανίζονται με ανάλογη συχνότητα και με συγκρίσιμο χαρακτηριστικό μέγεθος γωνιακής ταχύτητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

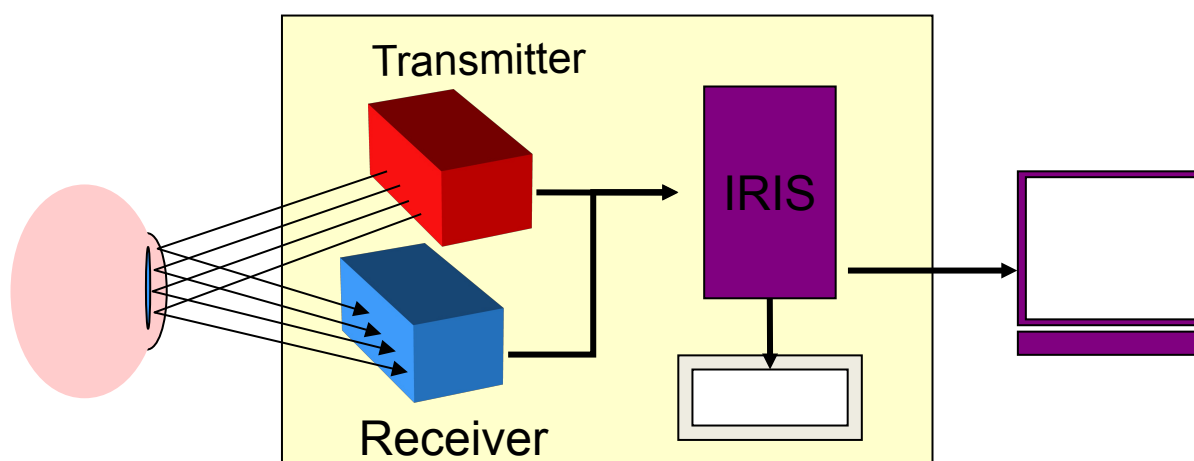
Το προτεινόμενο Σύστημα

3.1 Απόκτηση Δεδομένων

Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε το οφθαλμοκινητικό σύνολο δεδομένων της βάσης δεδομένων ASPIS (Athens Study for Psychosis Proneness and Incidence of Schizophrenia). Δύο χιλιάδες εβδομήντα πέντε (2075) άρρενες, ηλικίας 18 έως 24 ετών, συμμετείχαν στη διαδικασία συλλογής των δεδομένων της μελέτης, μετά από γραπτή τους συγκατάθεση. Η διαδικασία συμπεριλάμβανε μια πληθώρα οφθαλμικών (ως προς ομαλές κινήσεις παρακολούθησης, σακκαδικές, κινήσεις προσήλωσης) και νοητικών ασκήσεων, καθώς και τη συμπλήρωση λεπτομερών ερωτηματολογίων ψυχογραφικής ανάλυσης. Όλα τα δεδομένα που αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων ASPIS κωδικοποιήθηκαν με έναν μοναδικό αριθμό για κάθε άτομο, ενώ καταγράφηκαν μόνο οι οφθαλμικές κινήσεις του δεξιού οφθαλμού κάθε ατόμου, με τη χρήση της υπέρυθρης συσκευής IRIS SCALAR (σχήμα 14). Χρησιμοποιήθηκε ένας 12-bit αναλογικός/ψηφιακός μετατροπέας για τη μετατροπή των δεδομένων (Advantech PC-lab Card 818L), στα οποία έγινε δειγματοληψία στα 600 Hz, ώστε να αποθηκευτούν τελικά σε ψηφιακή μορφή στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή για την περαιτέρω επεξεργασία τους.

Για κάθε άτομο-δείγμα πραγματοποιήθηκε ένα οφθαλμοκινητικό ασκησιολόγιο προσήλωσης στην οθόνη του υπολογιστή, απαρτιζόμενο από τρεις διαφορετικές συνθήκες

προσήλωσης, όλες διάρκειας 50 δευτερολέπτων και με τυχαία σειρά. Στην πρώτη άσκηση-δοκιμασία έπρεπε απλά να προσηλώσουν το βλέμμα τους σε ένα λευκό σταυρό στο κέντρο της

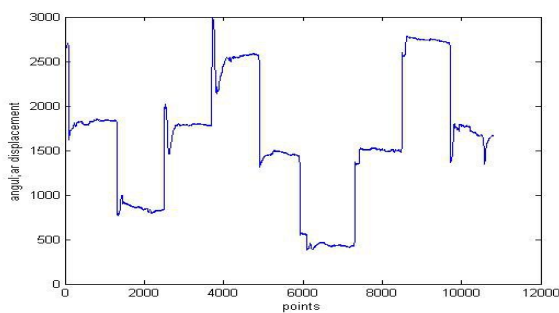


Σχήμα 14: Η υπέρυθρη συσκευή IRIS SCALAR που χρησιμοποιήθηκε και το σχηματικό διάγραμμα μετατροπής των δεδομένων σε ψηφιακή μορφή.

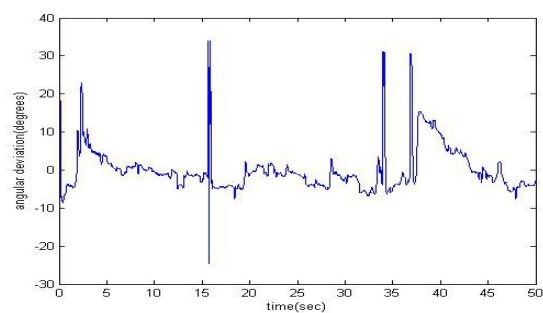
οθόνης, ενώ σε άλλη έπρεπε να κάνουν το ίδιο, αγνοώντας άλλους στόχους-σταυρούς που παρουσιάζονταν αλληπάλγηλα αριστερά ή δεξιά από τον κεντρικό στόχο. Χρησιμοποιήθηκαν δύο μικροί και δύο μεγαλύτεροι λευκοί σταυροί ως στόχοι απόσπασης της προσοχής. Παρουσιάζονταν για μισό δευτερόλεπτο ο καθένας σε άτακτα διαστήματα της συνολικής διάρκειας των 50 sec της δοκιμασίας, σε τυχαία απόσταση από τον κεντρικό στόχο, είτε αριστερά είτε δεξιά από αυτόν.

Στην τελευταία δοκιμασία οι συμμετέχοντες έπρεπε να κρατήσουν το βλέμμα τους προσηλωμένο στην αρχική του θέση, αποφεύγοντας οποιαδήποτε οφθαλμική κίνηση και χωρίς να υπάρχει στόχος. Πριν από καθεμία από τις δοκιμασίες οφθαλμικής προσήλωσης (σχήμα 15β), πραγματοποιούνταν βαθμονόμηση ως προς τις σακκαδικές κινήσεις που έκανε κάθε άτομο (σχήμα 15α).

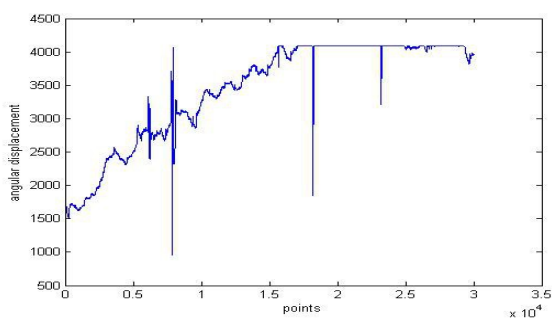
Κάποια από τα εξαχθέντα σήματα καταγραφής και βαθμονόμησης αποκλείστηκαν από την έρευνα, διότι εμφανίστηκε αυξημένη αλλοίωσή τους από τυχαίο θόρυβο, είτε από την κίνηση των ατόμων, είτε από την αστάθεια της συσκευής καταγραφής που είχε τοποθετηθεί στο κεφάλι τους (σχήμα 15γ, 15δ), με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν στην έρευνα 2,335 οφθαλμικά σήματα από 1,392 άτομα.



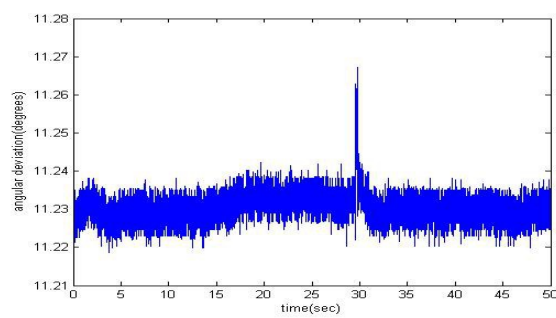
(α)



(β)



(γ)



(δ)

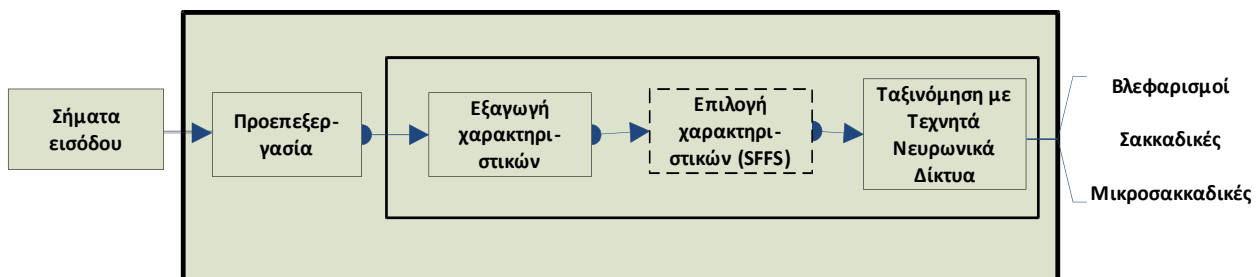
Σχήμα 15: (α) ένα χαρακτηριστικό σήμα βαθμονόμησης σακκαδικών κινήσεων (β) ένα σήμα καταγραφής οφθαλμικής προσήλωσης κατά τη διάρκεια της δεύτερης δοκιμασίας (γ) θορυβώδες σήμα βαθμονόμησης που αποκλείστηκε από την έρευνα (δ) θορυβώδες σήμα καταγραφής οφθαλμικής προσήλωσης που αποκλείστηκε

από την έρευνα.

3.2 Μεθοδολογία και Αλγόριθμος Ανίχνευσης

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε τέσσερα στάδια επεξεργασίας και ανάλυσης (σχήμα 16):

- Προεπεξεργασία των αποκτηθέντων σημάτων
- Διαδικασία Εξαγωγής Χαρακτηριστικών
- Διαδικασία Επιλογής Χαρακτηριστικών (προαιρετική)
- Διαδικασία Ταξινόμησης με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.



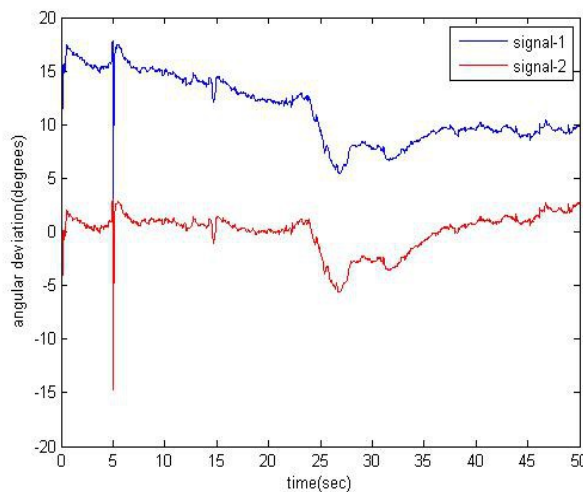
Σχήμα 16: Το προτεινόμενο σύστημα DSS

3.2.1 Το στάδιο της προεπεξεργασίας

Κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας πραγματοποιήθηκε απομάκρυνση της μέσης τιμής στα σήματα καταγραφής και υπολογίστηκε η γωνιακή ταχύτητα των σημάτων που προέκυψαν. Η γωνιακή τους ταχύτητα αποτελεί μία από τις εισόδους στο προτεινόμενο Σύστημα Υποστήριξης Απόφασης (Decision Support System – DSS). Η μέθοδος απομάκρυνσης της μέσης τιμής ενός σήματος μας επιτρέπει ουσιαστικά να εστιάσουμε στις διακυμάνσεις των τιμών των δεδομένων μας. Έτσι όλα τα σήματα καταγραφής της μελέτης μας είχαν κοινό σημείο αναφοράς (τον οριζόντιο άξονα), που είναι κρίσιμο, αφού χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο σύστημά μας

(σχήμα 17).

Οι γωνιακές ταχύτητες των καταγεγραμμένων σημάτων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις χαμηλές (λιγότερο από 100 deg/sec) και τις υψηλές (περισσότερο από 300 deg/sec). Οι πρώτες αντιστοιχούν σε κινήσεις προσήλωσης, ενώ οι δεύτερες σε σακκαδικές κινήσεις. Αυτός ο διαχωρισμός των οφθαλμοκινήσεων μέσω της τιμής της ταχύτητάς τους είναι απλός και ταυτόχρονα πολύ ξεκάθαρος. Συναντάται στη βιβλιογραφία ως “ταυτοποίηση κινήσεων προσήλωσης μέσω κατωφλίου ταχύτητας” και στηρίζεται στις τιμές της ταχύτητας των σημάτων. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας ενός σημείου ενδιαφέροντος μετριέται η απόσταση μεταξύ του σημείου εκείνου και του αμέσως επόμενου (ή προηγούμενου) του σήματος καταγραφής (σχήμα 17).



Σχήμα 17: Signal-1 είναι το αρχικό σήμα καταγραφής, ενώ στο signal-2 έχει αφαιρεθεί η μέση τιμή του signal-1.

Η γωνιακή ταχύτητα της οφθαλμοκίνησης υπολογίζεται ως η πρώτη παράγωγος του σήματος, αφού το σήμα καταγραφής μετράει τη γωνιακή απόκλιση των οφθαλμών. Ο υπολογισμός της γωνιακής ταχύτητας των οφθαλμοκινήσεων είναι καθοριστικός και συνεπώς πρέπει να υπολογιστεί με ακρίβεια, λαμβάνοντας υπόψη και την ύπαρξη των πολύ μικρών οφθαλμοκινήσεων, όπως είναι οι κινήσεις-τρέμουλο και τα drifts, για να διαφοροποιηθούν από

τις υπόλοιπες οφθαλμοκινήσεις καταγραφής. Η γωνιακή ταχύτητα, $\omega(t)$, σε δεδομένο χρόνο t ορίζεται ως η χρονική παράγωγος της γωνιακής απόκλισης, $\alpha(t)$:

$$\omega(t) = \frac{d\alpha}{dt} \quad (1)$$

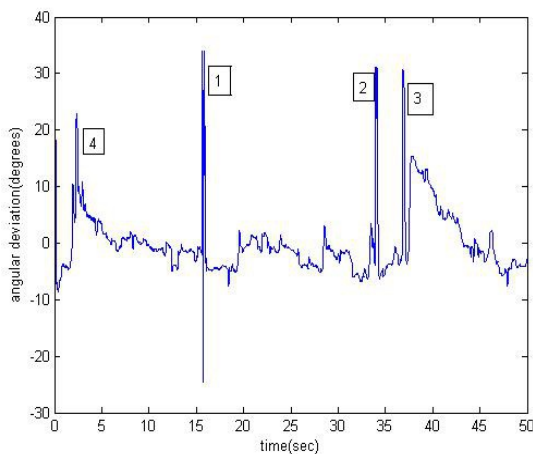
Η παραγωγή γίνεται μέσω συνέλιξης:

$$\omega(t) = \frac{d(\alpha h)(t)}{dt} = \left(\alpha \frac{dh}{dt}\right)(t) \quad (2)$$

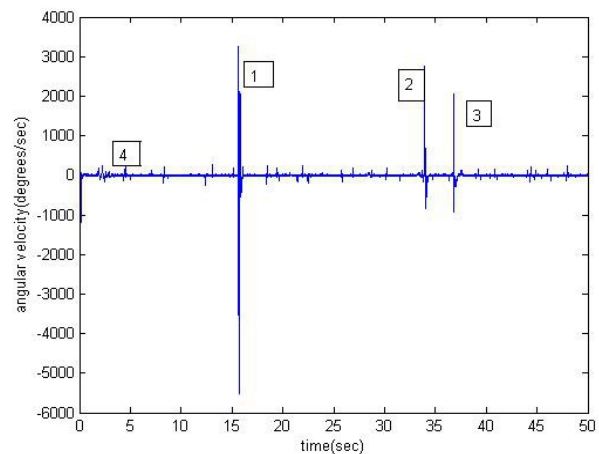
όπου $h(t)$ ο Γκαουσιανός παράγοντας εξομάλυνσης:

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

και σ είναι η παράμετρος εξομάλυνσης, της οποίας η πιο κατάλληλη τιμή βρέθηκε με δοκιμές να είναι η μονάδα ($\sigma=1$). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα χαρακτηριστικό σήμα καταγραφής μετά από αφαίρεση της μέσης τιμής (σχήμα 18α), καθώς και το αντίστοιχο σήμα της γωνιακής ταχύτητας (σχήμα 18β). Σημειωμένα με αριθμούς είναι χαρακτηριστικά σημεία ενδιαφέροντος, λόγω της διαφοροποίησης που παρουσιάζουν στην τιμή της γωνιακής τους απόκλισης ή/και της ταχύτητάς τους.



(α)

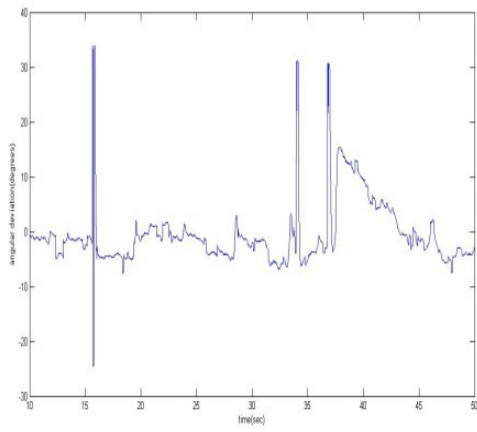


(β)

Σχήμα 18: (α) Το σήμα καταγραφής, μετά από τη διαδικασία αφαίρεσης της μέσης τιμής. Αυτό που μετράται είναι η γωνιακή απόκλιση των οφθαλμών. (β) Το αντίστοιχο σήμα γωνιακής ταχύτητας.

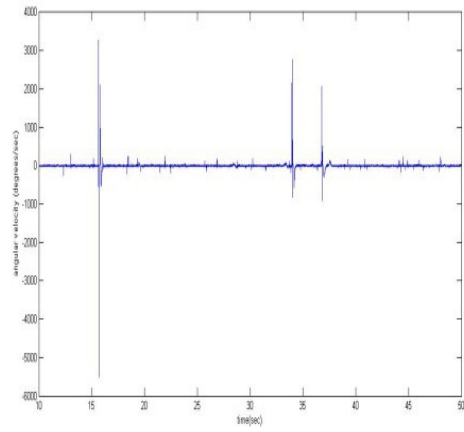
Μία ομάδα ειδικών από το Αιγινήτειο Νοσοκομείο του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών αναγνώρισε τους τύπους των οφθαλμοκινήσεων για κάθε σήμα με οπτική επισκόπηση. Για παράδειγμα, στο σήμα καταγραφής του σχήματος 18, ταυτοποίησαν τα σημεία με αριθμό 1, 2 και 3 ως βλεφαρισμούς (blinks), ενώ το σημείο με αριθμό 4 ως σακκαδική κίνηση (saccade). Όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα (18α και 18β), τόσο οι βλεφαρισμοί 1,2,3, όσο και η σακκαδική κίνηση 4 ξεχωρίζουν και στα δύο σήματα, αυτό της γωνιακής απόκλισης (angular deviation) και αυτό της γωνιακής ταχύτητας (angular velocity), λόγω του σχετικά υψηλού πλάτους που παρουσιάζουν.

Σε αντίθεση με τις σακκαδικές κινήσεις, οι βλεφαρισμοί χαρακτηρίζονται από τη διαδοχή μίας αρκετά μεγάλης θετικής και μίας αρκετά μεγάλης αρνητικής κορυφής του σήματος καταγραφής, κάτι που συμβαίνει και με τις σακκαδικές κινήσεις, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Επιπλέον οι δύο διαδοχικές κορυφές του βλεφαρισμού έχουν πολύ μικρότερη χρονική απόσταση μεταξύ τους από ότι συμβαίνει στις σακκαδικές, οι οποίες επιπλέον παρουσιάζουν σαφώς μικρότερη ταχύτητα από αυτή των βλεφαρισμών (σχήμα 18β). Παρόλα αυτά, ο διαχωρισμός μεταξύ σακκαδικών κινήσεων και βλεφαρισμών συνήθως δεν είναι πολύ εύκολος. Για παράδειγμα, στο σχήμα 18, παρά την υψηλή γωνιακή απόκλιση των “σημείων 4”, δηλαδή της περιοχής των σημείων γύρω από το νούμερο 4 (σχήμα 18α), η ταχύτητά τους δείχνει να είναι πολύ μικρή (σχήμα 18β), συνεπώς θεωρείται ότι τα “σημεία 4” αντιστοιχούν σε μια αλληλουχία σακκαδικών κινήσεων και όχι σε βλεφαρισμό. Στο σχήμα 19 παρακάτω φαίνονται τόσο τα σήματα γωνιακής απόκλισης όσο και τα σήματα γωνιακής ταχύτητας για διαφορετικές περιπτώσεις οφθαλμοκινήσεων, όπως αυτές αναγνωρίστηκαν από τους ειδικούς.

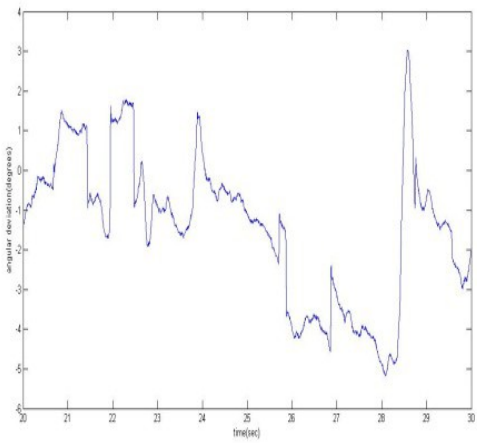


(α)

βλεφαρισμοί

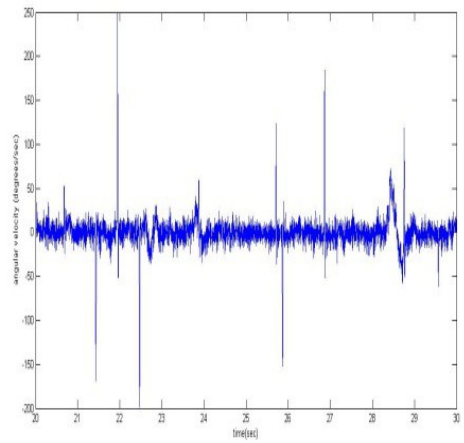


(β)

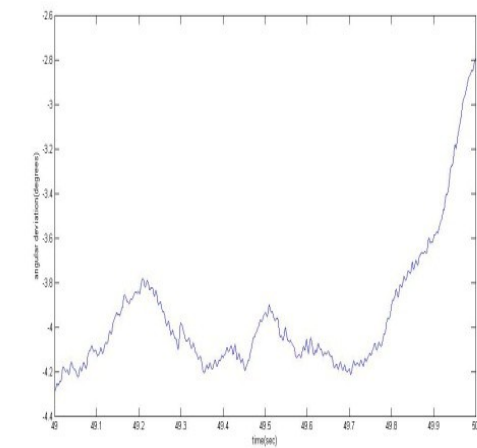


(γ)

σακκαδικές

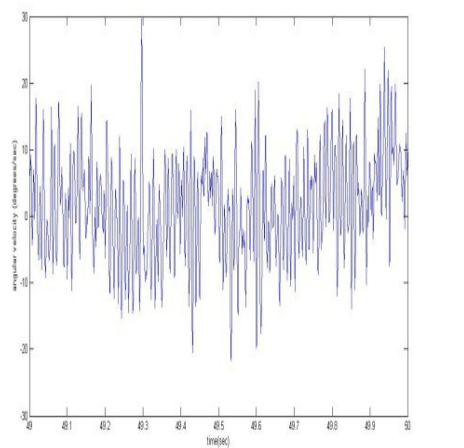


(δ)



(ε)

σημεία προσήλωσης



(στ)

Σχήμα 19: (α) Σήμα καταγραφής με βλεφαρισμούς και (β) αντίστοιχο σήμα ταχύτητας.

(γ) Σήμα καταγραφής με σακκαδικές κινήσεις και (δ) αντίστοιχο σήμα ταχύτητας.

(ε) Σήμα καταγραφής με σημεία προσήλωσης και (στ) αντίστοιχο σήμα ταχύτητας.

Τα παραπάνω σχήματα προέκυψαν από τοπική μεγένθυση των κατάλληλων περιοχών των σημάτων του προηγούμενου σχήματος 18.

3.2.2 Η διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι η κατασκευή ενός συστήματος υποστήριξης απόφασης (decision support system – DSS), που να μπορεί να αναγνωρίζει τους διαφορετικούς τύπους οφθαλμοκινήσεων. Για το λόγο αυτό εξάχθηκαν δεκατέσσερα (14) χαρακτηριστικά, επτά (7) χαρακτηριστικά από τα σήματα γωνιακής απόκλισης και επτά (7) από τα σήματα γωνιακής ταχύτητας. Συγκεκριμένα αυτά είναι η μέγιστη τιμή, η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, η κύρτωση, η παραμόρφωση, η ενέργεια του σήματος και η εντροπία. Τα επτά (7) αυτά χαρακτηριστικά επεξηγούνται παρακάτω αναλυτικά ως εξής:

1. Η μέγιστη τιμή αναφέρεται στο μέγιστο πλάτος όσον αφορά στο σήμα γωνιακής απόκλισης και στη μέγιστη κορυφή, όσον αφορά στο σήμα γωνιακής ταχύτητας.
2. Η μέση τιμή είναι η λεγόμενη "τυπική" μέση τιμή για κάποιο σήμα και υπολογίζεται ως εξής:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

όπου $x_i = 1, 2, \dots, n$ είναι οι διακριτές τιμές του εκάστοτε σήματος (γωνιακής απόκλισης ή γωνιακής ταχύτητας) μετά τη δειγματοληψία στα 600 Hz.

3. Η τυπική απόκλιση είναι ένα μέτρο της διασποράς ενός συνόλου δεδομένων x_i από τη μέση

τιμή του, (\bar{x}) , σύμφωνα με τη σχέση: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n}}$ (2), όπου n το μέγεθος του

συνόλου, δηλαδή ο πληθικός αριθμός του.

4. Η κύρτωση είναι ένας στατιστικός δείκτης, ο οποίος καθορίζει το χαρακτήρα απόκρισης ενός

σήματος, σύμφωνα με την εξίσωση: $K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4$ (3).

5. Η παραμόρφωση είναι ένα μέτρο ασυμμετρίας κατανομής των δεδομένων γύρω από το μεσαίο δείγμα. Αν η παραμόρφωση είναι αρνητική, σημαίνει ότι τα δεδομένα είναι απλωμένα περισσότερο αριστερά του μεσαίου, παρά δεξιά του. Αν η παραμόρφωση είναι θετική σημαίνει ότι τα δεδομένα είναι απλωμένα κυρίως δεξιά. Η παραμόρφωση της κανονικής κατανομής, ή οποιασδήποτε τέλεια συμμετρικής κατανομής, είναι μηδενική. Η παραμόρφωση μιας κατανομής ορίζεται ως:

$$S = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}^3 \quad (4).$$

6. Η ενέργεια του σήματος ορίζεται ως:

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 \quad (5).$$

7. Η εντροπία για σειρές συνεχούς χρόνου που αναπαριστούν την έξοδο μιας στοχαστικής διαδικασίας ορίζεται ως:

$$H(x) = \sum_{i=1}^n p(x_i) \log p(x_i) \quad (6),$$

όπου $p(x_i)$ είναι η πιθανότητα πραγματοποίησης του (x_i) .

Επειδή η διάρκεια των βλεφαρισμών (blinks) είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη (100-400ms)

από τη διάρκεια των σακκαδικών κινήσεων (6ms-300ms), χρησιμοποιήθηκαν δύο κινούμενα παράθυρα για την εκτίμηση των παραπάνω χαρακτηριστικών: ένα παράθυρο, W1, των 400ms (240 points=400ms×600Hz) και ένα ακόμα, W2, των 13ms (8 points=13ms×600Hz). Τα διανύσματα των χαρακτηριστικών που εκτιμήθηκαν με εφαρμογή του W1 χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση των βλεφαρισμών, ενώ τα διανύσματα των χαρακτηριστικών που εκτιμήθηκαν με την εφαρμογή του W2 χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση των διαστημάτων που αντιστοιχούν σε σακκαδικές και μικροσακκαδικές κινήσεις, και συνεπώς εφαρμόστηκε μόνο στα τμήματα των σημάτων στα οποία δεν υπήρχαν βλεφαρισμοί. Από τη χρήση των δύο παραθύρων, W1 και W2, δημιουργήθηκαν συνολικά 29,760 διανύσματα χαρακτηριστικών.

3.2.3 Η διαδικασία επιλογής χαρακτηριστικών

Το μέρος αυτό του προτεινόμενου συστήματος υποστήριξης απόφασης (DSS) είναι προαιρετικό. Η διαδικασία επιλογής χαρακτηριστικών είναι περισσότερο βοηθητική, όσον αφορά την ταχύτητα επεξεργασίας του συνόλου των δεδομένων για το επόμενο στάδιο της ταξινόμησης, παρά απαραίτητη. Στηρίζεται στην εξαγωγή (επιλογή) ενός υποσυνόλου χαρακτηριστικών, από το σύνολο των (δεκατεσσάρων) αρχικών, που περιέχουν επαρκή πληροφορία για το ζητούμενο διαχωρισμό των οφθαλμοκινήσεων που αναπαριστούν τα σήματα καταγραφής σε βλεφαρισμούς, σακκαδικές και μικροσακκαδικές κινήσεις.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι, επειδή από τις κινήσεις προσήλωσης (μικροσακκαδικές, τρέμουλο-κινήσεις, κινήσεις διολίσθησης) περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μικροσακκαδικές κινήσεις και ο ρόλος τους στην παρούσα μελέτη, δεν περιλήφθηκαν στη διαδικασία διαχωρισμού οι υπόλοιπες κινήσεις του Συστήματος Προσήλωσης (τρέμουλο-κινήσεις και κινήσεις διολίσθησης). Σε κάποια σημεία έχουμε ομαδοποιήσει τις τρέμουλο-κινήσεις και κινήσεις διολίσθησης και αναφερόμαστε σε αυτές ως “κινήσεις

προσήλωσης”, ενώ αναφερόμαστε ξεχωριστά στις μικροσακκαδικές κινήσεις. Ομοίως, από τις κινήσεις του οφθαλμοκινητικού συστήματος (σακκαδικές, κινήσεις σύγκλισης-απόκλισης, ομαλές κινήσεις παρακολούθησης), για την παρούσα μελέτη ενδιαφέρον παρουσιάζουν κυρίως οι σακκαδικές κινήσεις και για το λόγο αυτό δεν περιλήφθηκαν στη διαδικασία διαχωρισμού οι υπόλοιπες κινήσεις του οφθαλμοκινητικού συστήματος, ενώ το ίδιο ισχύει και για τις αντανακλαστικές κινήσεις του συστήματος κίνησης του κεφαλιού. Έτσι η ταξινόμηση των οφθαλμοκινήσεων στην παρούσα μελέτη συνοψίζεται σε βλεφαρισμούς, σακκαδικές και μικροσακκαδικές κινήσεις.

Ο αλγόριθμος επιλογής χαρακτηριστικών που εφαρμόστηκε για τη βελτίωση της απόδοσης της διαδικασίας ταξινόμησης είναι ο SFFS (Sequential Floating Forward Selection) [57], και υλοποιείται ακριβώς πριν από την ταξινόμηση, ώστε να επιλεγθούν τα κατάλληλα χαρακτηριστικά. Ο αλγόριθμος SFFS κάνει χρήση του αλγορίθμου FCM και η αρχή λειτουργίας του είναι η εξής: σε κάθε εφαρμογή του, αυτά που κρίνονται ως σημαντικότερα χαρακτηριστικά εισέρχονται στο τρέχον υποσύνολο επιλογής χαρακτηριστικών και δυναμικά παίρνουν τη θέση των λιγότερο σημαντικών χαρακτηριστικών από το υποσύνολο. Η επιλογή χαρακτηριστικών για το βέλτιστο υποσύνολο που προκύπτει είναι ένα πολύπλοκο και συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης και ο αλγόριθμος SFFS κρίθηκε ως ο καταλληλότερος, μετά από σχετική έρευνα, για τη μελέτη αυτή.

3.2.4 Διαδικασία Ταξινόμησης με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Για τη διαδικασία ταξινόμησης των οφθαλμοκινήσεων για την μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα από εφαρμογή δύο διαφορετικών δομών συστήματος, με χρήση δύο Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΝΔ) η καθεμία. Κάθε ΝΝΔ

αναπαριστά ένα στάδιο ταξινόμησης / διαχωρισμού. Στην πρώτη δομή (Α) του προτεινόμενου συστήματος η διαδικασία ταξινόμησης περιλάμβανε τα εξής δύο στάδια:

A1. διαχωρισμό των βλεφαρισμών (blinks) από όλες τις υπόλοιπες κινήσεις (σακκαδικές και μικροσακκαδικές) και ύστερα

A2. διαχωρισμό των μικροσακκαδικών κινήσεων (microsaccades) από τις σακκαδικές (saccades), ενώ η δεύτερη δομή (Β) του συστήματος περιλάμβανε τα εξής στάδια:

B1. διαχωρισμό των μικροσακκαδικών κινήσεων (microsaccades) από όλες τις υπόλοιπες (βλεφαρισμούς και σακκαδικές) και ύστερα

B2. διαχωρισμό των βλεφαρισμών (blinks) από τις σακκαδικές (saccades).

Πριν προχωρήσουμε σε περαιτέρω ανάλυση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε, καθώς και στην ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε διεξοδικά στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΝΔ).

3.3 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΝΔ)

3.3.1 Εισαγωγή : η ευρεία χρήση και εφαρμογή των ΝΔ

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, σε αυτή τη μελέτη έγινε προσπάθεια να κατασκευαστούν κατάλληλα ΝΔ, τα οποία θα ταξινομούν τις οφθαλμοκινήσεις (βλεφαρισμοί, σακκαδικές κινήσεις, μικροσακκαδικές κινήσεις) από τα σήματα εισόδου, δηλαδή τα σήματα γωνιακής απόκλισης και γωνιακής ταχύτητας. Πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός των ΝΔ με σκοπό την ταξινόμηση αυτών των οφθαλμοκινήσεων, ενώ η προσομοίωση των νευρωνικών δικτύων έγινε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB.

Τα νευρωνικά δίκτυα (neural networks) αποτελούν μία σχετικά νέα περιοχή στις φυσικές επιστήμες, καθώς έχουν γίνει γνωστά και έχουν αναπτυχθεί μόνο κατά τα τελευταία σαράντα περίπου χρόνια. Η έκρηξη ενδιαφέροντος για τα νευρωνικά δίκτυα σημειώθηκε τα τελευταία χρόνια, καθώς εφαρμόζονται με μεγάλη επιτυχία σε ένα ασυνήθιστα μεγάλο φάσμα τομέων της επιστήμης, της τεχνολογίας και της καθημερινότητας, όπως τα Χρηματοοικονομικά, η Ιατρική, η Επιστήμη του Μηχανικού, η Γεωλογία, η Φυσική, η Ρομποτική, η Επεξεργασία Σήματος, η Αεροπλοΐα, η Ναυτιλία, ακόμα και οι οικιακές συσκευές. Πιο συγκεκριμένα, σχετικά με την εφαρμογή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων σε κλινικές εφαρμογές όπως διάγνωση, πρόγνωση και ανάλυση επιβίωσης στους ιατρικούς τομείς της Ογκολογίας, Εντατικής Φροντίδας, Καρδιαγγειακής, Ψυχοφυσικής της Όρασης, κ.ά., τα νευρωνικά δίκτυα συνεισφέρουν τα μέγιστα στην υποστήριξη των λήψεων αποφάσεων από τους γιατρούς (medical decision support), λόγω και της προόδου που σημειώνεται στη στατιστική ανάλυση και την τεχνητή νοημοσύνη [16]. Στην πραγματικότητα, τα νευρωνικά δίκτυα εισάγονται οπουδήποτε τίθεται θέμα:

- πρόβλεψης,
- ταξινόμησης ή
- ελέγχου

Η σαρωτική αυτή επιτυχία, μπορεί να αποδοθεί σε δύο βασικά στοιχεία: την ισχύ και την ευχρηστία.

Όσον αφορά στην ισχύ, τα νευρωνικά δίκτυα είναι πολύ εξελιγμένες τεχνικές μη γραμμικής μοντελοποίησης. Η γραμμική μοντελοποίηση υπήρξε ευρέως διαδεδομένη για πολύ καιρό, δεδομένου ότι στα γραμμικά μοντέλα εφαρμόζονται πολύ γνωστές τεχνικές βελτιστοποίησης. Στις συνήθεις, όμως, περιπτώσεις η γραμμική προσέγγιση δεν ενδείκνυται. Τα νευρωνικά δίκτυα επιτρέπουν τη μη γραμμικότητα μέσω χρήσης μη γραμμικών συναρτήσεων ενεργοποίησης. Όμως

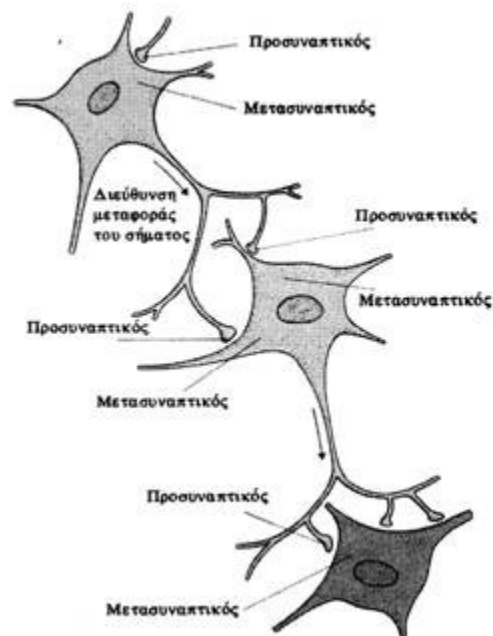
έτσι μετατίθεται το πρόβλημα στο ζήτημα της διάστασης, δηλαδή του πλήθους των διαφορετικών εισόδων και εξόδων, το οποίο αποτελεί μέγιστο πρόβλημα στις προσπάθειες μοντελοποίησης μη γραμμικών συναρτήσεων με μεγάλο αριθμό μεταβλητών.

Όσον αφορά στην ευχρηστία, τα νευρωνικά δίκτυα εκπαιδεύονται με παραδείγματα. Συγκεντρώνοντας αντιπροσωπευτικά δεδομένα και τροφοδοτώντας τα συστηματικά στο δίκτυο μέσω των κατάλληλων αλγόριθμων εκπαίδευσης, το δίκτυο «αντιλαμβάνεται» αυτομάτως τη δομή των δεδομένων. Παράλληλα, ο χρήστης χρειάζεται να έχει κάποιες ουσιώδεις γνώσεις σχετικά με τον τρόπο επιλογής και προετοιμασίας των δεδομένων, τον τρόπο εκλογής του κατάλληλου νευρωνικού δικτύου, αλλά και σχετικά με το πώς να ερμηνεύσει τα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά το επίπεδο των γνώσεων του χρήστη που απαιτείται για μια επιτυχημένη εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων, είναι πολύ χαμηλότερο συγκριτικά με τη χρήση πιο παραδοσιακών μη γραμμικών στατιστικών μεθόδων.

3.3.2 Τι είναι τα νευρωνικά δίκτυα (ΝΔ)

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι προσπάθειες να μοντελοποιήσουμε, να μιμηθούμε τον τρόπο που επιτελεί τις διάφορες εργασίες ο ανθρώπινος εγκέφαλος [54]. Πρόκειται για συστήματα επεξεργασίας πληροφοριών (υπολογιστικά συστήματα), που η δομή τους και η λειτουργία τους εμπνέονται από τις τρέχουσες γνώσεις μας για τα βιολογικά νευρικά συστήματα. Το σημείο-κλειδί της λειτουργίας τους είναι η δικτυακή δομή του συστήματος επεξεργασίας πληροφορίας. Τα νευρωνικά δίκτυα, όπως και ο άνθρωπος, έχουν τη δυνατότητα μάθησης μέσα από παραδείγματα. Στα βιολογικά συστήματα αυτό επιτυγχάνεται με την τροποποίηση των συνδέσεων-συνάψεων των νευρώνων (σχήμα 20). Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται και στα

νευρωνικά δίκτυα. Η βασική τους ομοιότητα με τα βιολογικά δίκτυα είναι ότι λαμβάνουν γνώσεις με την εξάσκηση και την εμπειρία, όπως ακριβώς και οι άνθρωποι, αλλά διαφέρουν στο ότι ακολουθούν ορισμένους προκαθορισμένους κανόνες, που είναι χαρακτηριστικό των υπολογιστών. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος “πλάθει” κανόνες μέσω επεξεργασίας των εμπειριών, προσαρμόζεται διαρκώς στο περιβάλλον και αλλάζει δομή (πλαστικότητα). Είναι ένα σύνθετο, μη γραμμικό και παράλληλο σύστημα επεξεργασίας πληροφορίας και έχει τη δυνατότητα να οργανώνει τα δομικά του στοιχεία (νευρώνες) με τρόπο που επιτρέπει την εκτέλεση εργασιών πολύ γρηγορότερα από τον υπολογιστή.



Σχήμα 20: Συνδέσεις-συνάψεις βιολογικών νευρώνων.

Λόγω της ικανότητας των νευρωνικών δικτύων να βρίσκουν λύσεις σε περιπτώσεις με πολύπλοκα ή αποσπασματικά δεδομένα, χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση προτύπων και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Ένα εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο είναι δυνατόν να θεωρηθεί "ειδήμονας" στην κατηγορία των πληροφοριών που του δίνονται για ανάλυση. Τα πλεονεκτήματα ενός νευρωνικού δικτύου περιλαμβάνουν:

- Δυνατότητα προσαρμοστικής μάθησης. Το δίκτυο είναι σε θέση να μάθει να εκτελεί διαδικασίες βασισμένες στα δεδομένα που του δίνονται.

- Αυτοοργάνωση. Ένα νευρωνικό δίκτυο είναι σε θέση να οργανώνεται με την πάροδο του χρόνου και με βάση τα δεδομένα που δέχεται από τις διάφορες εισόδους του.

- Επεξεργασία σε συνθήκες πραγματικού χρόνου. Οι υπολογισμοί ενός νευρωνικού δικτύου γίνονται ιδιαίτερα γρήγορα, αφού η σχεδίασή τους είναι βασισμένη σε παράλληλη αρχιτεκτονική των επεξεργασιών του συστήματος.

- Δυνατότητα διόρθωσης λαθών. Μερική καταστροφή του δικτύου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας επεξεργασίας. Τα μερικώς κατεστραμμένα νευρωνικά δίκτυα είναι σε θέση να αναδιατάσσουν τις διεργασίες επεξεργασίας του δικτύου διοχετεύοντας όλη τη διαδικασία επεξεργασίας πληροφοριών στο υγιές τμήμα τους.

3.3.3 Βιολογικά νευρωνικά δίκτυα

Τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από τους νευρώνες, που αποτελούν το

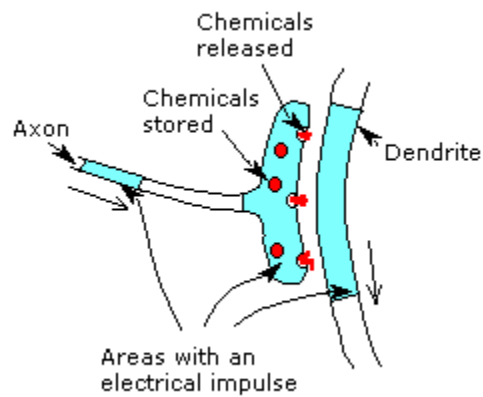
11
βασικό δομικό κομμάτι του ανθρώπινου εγκεφάλου. Ο εγκέφαλος περιέχει 10 περίπου νευρώνες και κάθε νευρώνας συνδέεται μέσω μερικών χιλιάδων συνάψεων (σχήμα 20).

15
Υπολογίζεται ότι υπάρχουν 10¹⁵ συνάψεις στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Η μετάδοση σημάτων, δηλαδή πληροφορίας μεταξύ των νευρώνων είναι χημικής φύσης. Χημικές ουσίες εκλύονται από τη μία πλευρά της σύναψης (synapse) και αυξάνουν ή μειώνουν το ηλεκτρικό δυναμικό μέσα στο νευρώνα (neuron) που δέχεται την πληροφορία (σχήμα 21).

Ένας νευρώνας (σχήμα 22) είναι αυτόνομος και αποτελείται από το κυρίως νευρικό κύτταρο/σώμα (cell body) και τις αποφυάδες του, που ονομάζονται νευρίτες και χωρίζονται σε

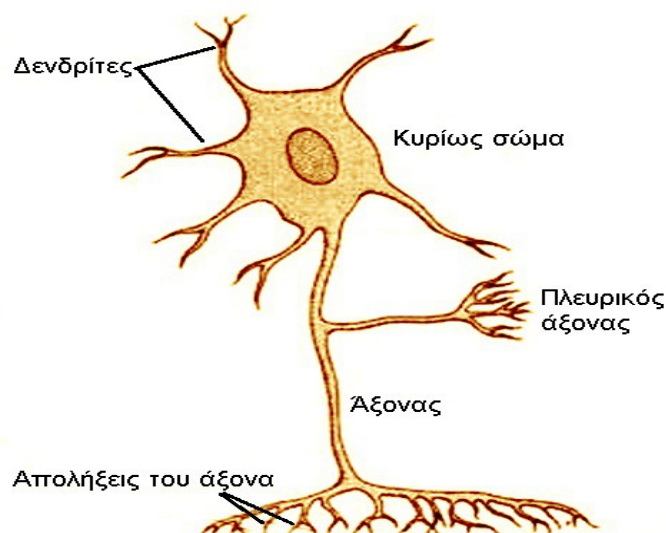
δύο κατηγορίες:

α) Στο νευράξονα ή άξονα κάθε νευρώνα (αχον): μια νηματοειδή προέκταση του κυρίως νευρικού κυττάρου. Οι νευρικές ώσεις - δυναμικά δράσης του κυτταρικού σώματος μετακινούνται κατά μήκος του άξονα προς την απόληξή του. Οι άξονες έχουν σαν άκρο την προσυναπτική μεμ -



Σχήμα 21: Η μετάδοση σημάτων μεταξύ των νευρώνων είναι χημικής φύσης.

βράνη που συμμετέχει στη δημιουργία της σύναψης, της περιοχής δηλαδή όπου έρχεται ο νευρώνας σε ηλεκτροχημική επαφή με άλλους νευρώνες για να τους μεταδώσει σήματα.



Σχήμα 22: Σχηματική αναπαράσταση βιολογικού νευρώνα

β) Στους δενδρίτες (dendrites): διακλαδισμένες αποφύσεις των νευρώνων. Βρίσκονται σε επαφή με τις απολήξεις διαφόρων αξόνων από γειτονικούς ή απομακρυσμένους νευρώνες μέσω των συνάψεων. Οι δενδρίτες συλλέγουν τα σήματα που εκπέμπονται από τις αξονικές απολήξεις και τα μεταδίδουν στο κυτταρικό σώμα του νευρώνα που ανήκουν.

Κατά μήκος της κυτταρικής μεμβράνης διατηρείται μια διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού, τέτοια ώστε το εσωτερικό του κυττάρου να βρίσκεται σε αρνητικό δυναμικό σε σχέση με τον εξωτερικό χώρο. Αν το δυναμικό αυξηθεί πέρα από ένα όριο, ο νευρώνας ενεργοποιείται και παράγεται παλμός περιορισμένης διάρκειας, που με τη σειρά του μεταδίδεται μέσω των συνάψεων σε άλλους νευρώνες. Κατά τις περιόδους της μάθησης τροποποιείται η ισχύς των συνάψεων (η ικανότητά τους να μεταδίδουν σήματα) και δημιουργούνται νέες συνάψεις. Το μεγάλο πλήθος νευρώνων σε συνδυασμό με την υψηλή παραλληλία έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη ταχύτητα επεξεργασίας. Παραστατικά φαίνονται τα παραπάνω στο σχήμα 23.

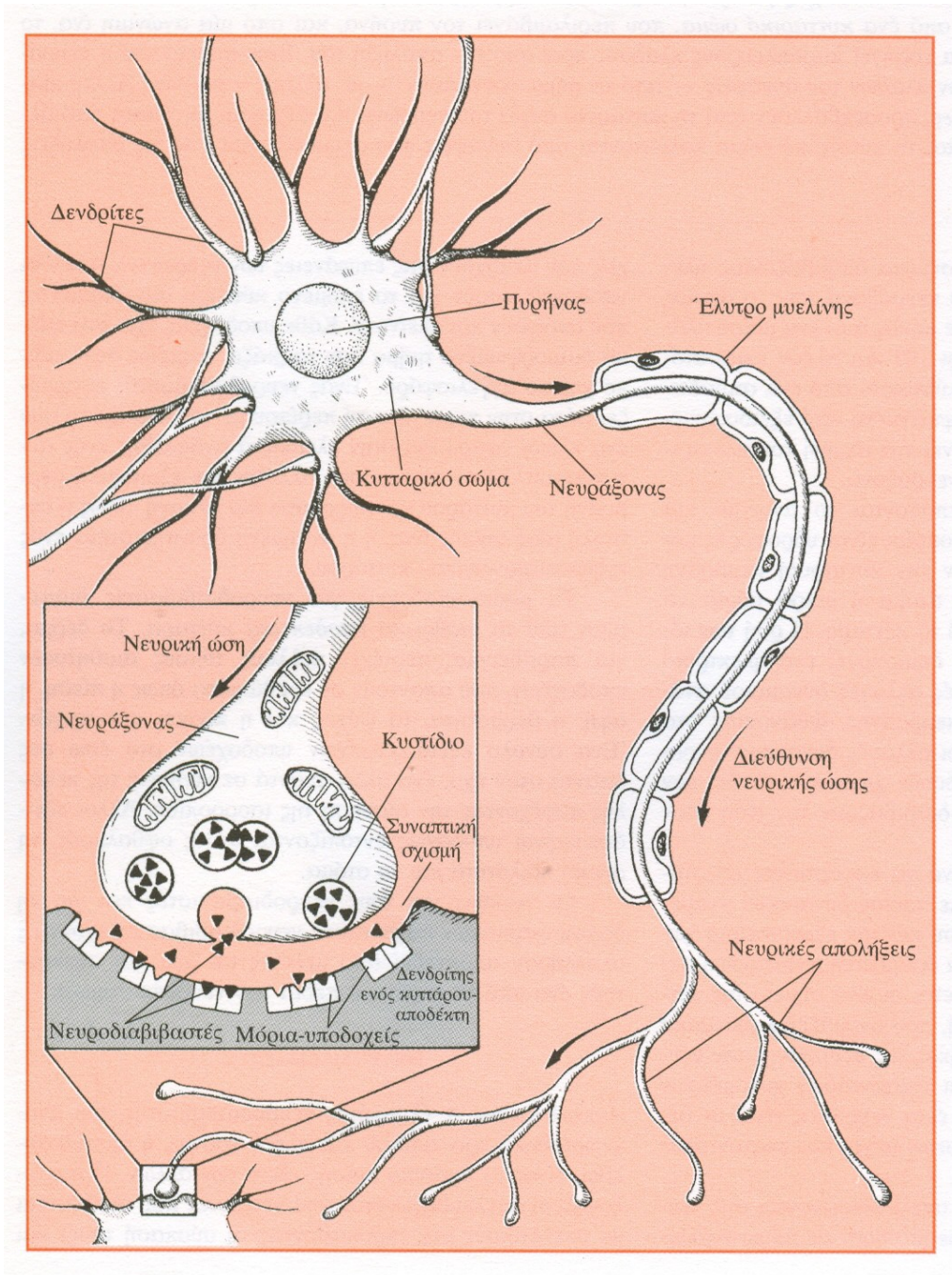
3.3.4 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Ο τεχνητός νευρώνας σχεδιάστηκε ώστε να προσομοιώνει τα χαρακτηριστικά των βιολογικών νευρώνων. Τα δεδομένα εισόδου (inputs) εφαρμόζονται στο νευρώνα και παράγονται τα δεδομένα εξόδου (outputs). Κάθε είσοδος πολλαπλασιάζεται με ένα αντίστοιχο βάρος (weight), που αναλογεί στη συναπτική δύναμη, και ύστερα αθροίζονται για να καθορίσουν το βαθμό ενεργοποίησης του νευρώνα.

3.3.4 (α) Ο στοιχειώδης νευρώνας (perceptron)

Το μοντέλο του αισθητήρα (perceptron) είναι από τα πρώτα μοντέλα νευρωνικών δικτύων που αναπτύχθηκαν και έδωσαν μεγάλη ώθηση στην ανάπτυξή τους. Ο στοιχειώδης αισθητήρας

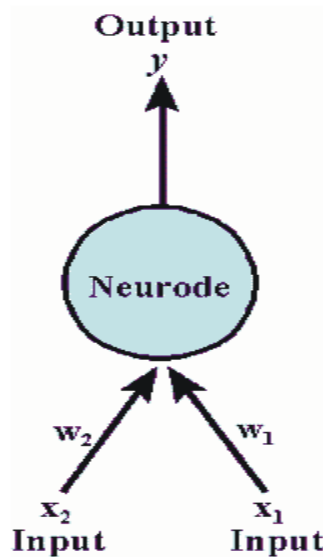
(elementary perceptor) αποτελείται από ένα μόνο νευρώνα και είναι το πιο απλό αυτοδύναμο σύστημα που υπάρχει. Ο μοναδικός νευρώνας του συστήματος έχει έναν ορισμένο αριθμό



Σχήμα 23: Σχηματική αναπαράσταση νευρικού κυττάρου και νευρικής σύναψης.

συνδέσεων που προέρχονται από άλλους νευρώνες, όπως φαίνεται στο σχήμα 24. Έχει ένα

ορισμένο πλήθος εισόδων, x_1, x_2, x_3, \dots , και μία μόνο έξοδο. Κάθε εισερχόμενο σήμα x_i συνδέεται



Σχήμα 24: Ο στοιχειώδης αισθητήρας (elementary perceptron)

με τον κεντρικό νευρώνα με ένα βάρος w_i , που δείχνει την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο νευρώνων που συνδέονται. Στην πιο απλή περίπτωση του ενός νευρώνα το βάρος w είναι η επίδραση του εισερχόμενου σήματος με το νευρώνα. Αυτό που έχει σημασία δεν είναι η τιμή του βάρους w καθεαυτή, ούτε η τιμή του σήματος x_i , αλλά το γινόμενο $x_i * w_i$. Κάθε είσοδος x_i πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο βάρος w_i που έχει η i -σύνδεση και τελικά αυτό που φτάνει στο νευρώνα από κάθε εισερχόμενο σήμα είναι το γινόμενο $x_i * w_i$. Ο αισθητήρας στη συνέχεια αθροίζει όλα τα επιμέρους γινόμενα και λαμβάνει ένα σήμα με συνολική τιμή:

$$S = \sum (X_i * W_i)$$

Στη συνέχεια εφαρμόζεται η συνάρτηση κατωφλίου Heaviside με ένα συγκεκριμένο κατώφλι δυναμικού θ , το οποίο συγκρίνεται με το άθροισμα S . Αν $S > \theta$, τότε ο αισθητήρας ενεργοποιείται, ενώ αν $S < \theta$, τότε το άθροισμα S μηδενίζεται και ο νευρώνας αδρανοποιείται. Δηλαδή:

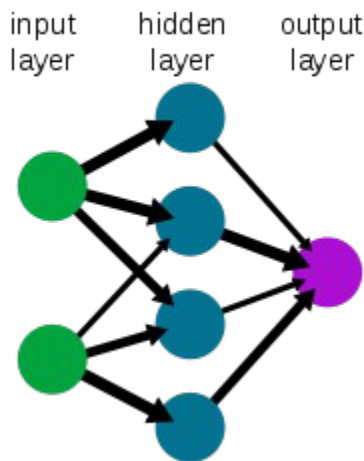
- αν $S > \theta$ τότε έξοδος = 1
- αν $S < \theta$ τότε έξοδος = 0 .

Γίνεται κατανοητό συνεπώς ότι η ενεργητικότητα του αισθητήρα εξαρτάται από τα βάρη των συνδέσεων, από τις τιμές των εισόδων και από την τιμή του κατωφλίου. Αυτό που “μαθαίνει” το σύστημα αποθηκεύεται στα βάρη των συνδέσεων, τα οποία, όπως θα εξηγήσουμε στη συνέχεια, μεταβάλλονται καθ' όλη τη διάρκεια εκπαίδευσης του συστήματος. Για τον αισθητήρα με n νευρώνες η διαδικασία σύγκρισης με το κατώφλι θ είναι η ίδια όπως και στο απλό μοντέλο αισθητήρα, με τη διαφορά ότι ο αισθητήρας τώρα έχει πολλές εξόδους (n), όσο είναι και το πλήθος των νευρώνων.

3.3.4 (β) Πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα (Multilayer Perceptrons)

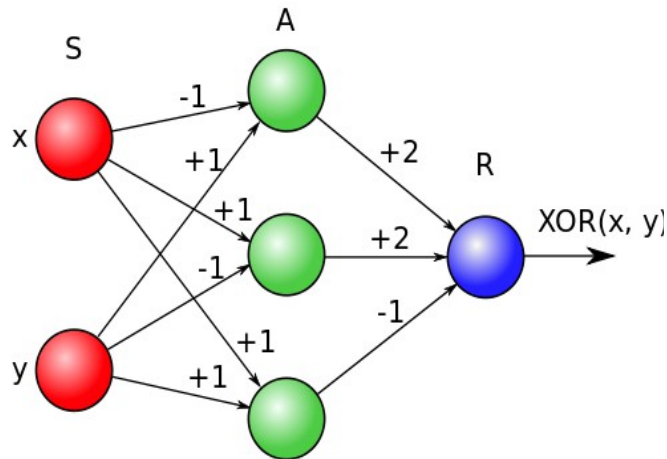
Ο αριθμός των νευρώνων που περιέχει ένα νευρωνικό δίκτυο αυξάνει, μαζί με την αύξηση της πολυπλοκότητας. Υπάρχει όμως πάντα το επίπεδο εισόδου (input layer), και το επίπεδο εξόδου (output layer), ανεξάρτητα από το είδος του ΝΔ. Το επίπεδο εισόδου είναι αυτό στο οποίο εισέρχονται τα σήματα, ενώ στο επίπεδο εξόδου εξάγεται το αποτέλεσμα του νευρωνικού δικτύου. Προαιρετικά υπάρχουν και τα κρυμμένα επίπεδα, όπως θα δούμε στη συνέχεια (σχήμα 25).

A simple neural network



Σχήμα 25: Τα επίπεδα εισόδου, εξόδου και τα κρυμμένα επίπεδα ενός απλού νευρωνικού δικτύου.

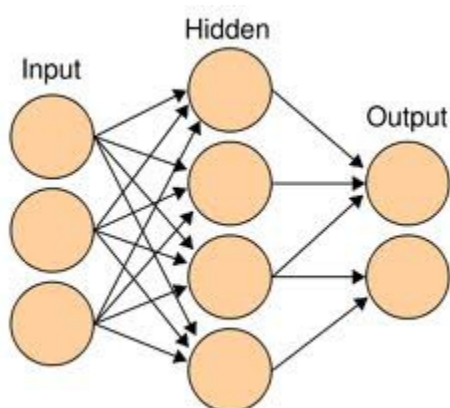
Ένα από τα πιο γνωστά προβλήματα των νευρωνικών δικτύων είναι η υλοποίηση της boolean συνάρτησης XOR (exclusive-or) ή συνάρτηση αποκλειστικής διάζευξης. Η boolean συνάρτηση αυτή δέχεται δύο εισόδους και δίνει μία έξοδο, η οποία είναι αληθής ("1"), αν στις εισόδους υπάρχει ακριβώς ένα "1", διαφορετικά η έξοδος της είναι ψευδής ("0"). Το μοντέλο του στοιχειώδους αισθητήρα δεν μπορούσε να υλοποιήσει τη συνάρτηση XOR και έτσι έγινε κατανοητό ότι έπρεπε να δημιουργηθούν ΝΔ με περισσότερα επίπεδα (σχήμα 26).



Σχήμα 26: Υλοποίηση συνάρτησης XOR.

Τα πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα έχουν ένα επίπεδο εισόδου, ένα ή περισσότερα κρυμμένα επίπεδα και ένα επίπεδο εξόδου. Γενικά για ένα ΝΔ, τρία επίπεδα είναι αρκετά για να επιλύσουμε κάθε είδους πρόβλημα: χρειάζεται το επίπεδο εισόδου, ένα κρυμμένο επίπεδο και το επίπεδο εξόδου. Το κρυμμένο επίπεδο βλέπει μόνο το εσωτερικό του ΝΔ και όχι κατευθείαν την είσοδο ή την έξοδο. Για να καθορίσουμε το πλήθος των νευρώνων που θα έχει το κρυμμένο επίπεδο, ώστε να μεταδίδεται με τον καλύτερο τρόπο η συνάρτηση μεταφοράς και να επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα, χρειάζεται πειραματισμός. Για τη συντομογραφία του πολυστρωματικού ΝΔ χρησιμοποιείται ο συμβολισμός: $p - m_1 - m_2 - \dots - m_i - n$, όπου p είναι ο

αριθμός των εισόδων, m_i ένα κρυμμένο επίπεδο με i νευρώνες, και n ο αριθμός των εξόδων.



Σχήμα 27: Δομή Πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου

3.3.4 (γ) Ευθέως τροφοδοτούμενα (feedforward) και επανατροφοδοτούμενα (feedbackward) νευρωνικά δίκτυα

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες δικτύων, ως προς τον τρόπο σύνδεσης των μονάδων του:

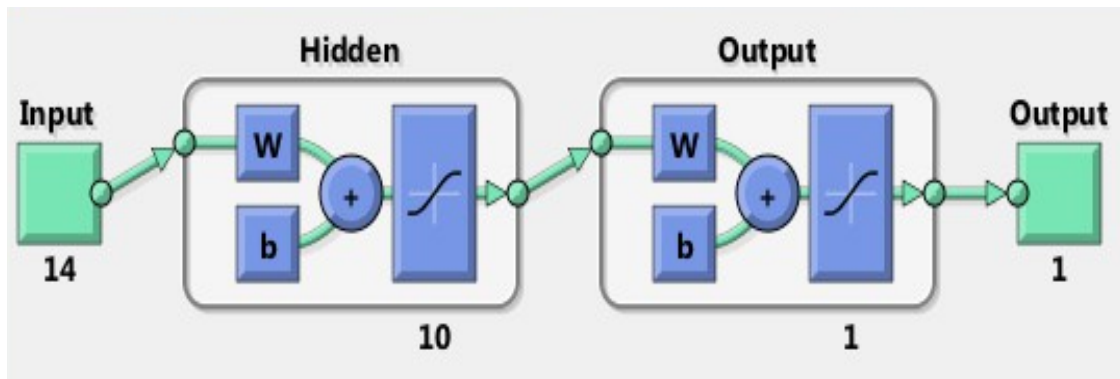
- τα ευθέως τροφοδοτούμενα (feedforward) δίκτυα και

– τα επανατροφοδοτούμενα (feedbackward) δίκτυα

Στα ευθέως τροφοδοτούμενα δίκτυα (σχήμα 27) οι μονάδες είναι οργανωμένες σε διαφορετικά επίπεδα. Οι μονάδες κάθε επιπέδου τροφοδοτούν τις μονάδες του επόμενου επιπέδου, μέχρι το τελευταίο επίπεδο. Δεν υπάρχει, συνεπώς, έξοδος μονάδας κάποιου επιπέδου που να αποτελεί είσοδο μονάδας για το ίδιο επίπεδο. Αντίθετα, στα επανατροφοδοτούμενα δίκτυα η έξοδος τουλάχιστον μίας μονάδας αποτελεί είσοδο σε μονάδα του ίδιου ή προηγούμενου επιπέδου. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούμε ευθέως τροφοδοτούμενα δίκτυα, όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 27.

3.4 Η Διαδικασία Ταξινόμησης – Το προτεινόμενο σύστημα

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, για τη διαδικασία ταξινόμησης των οφθαλμοκινήσεων για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν δύο Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΝΔ) για καθεμία από τις δύο δομές που δοκιμάστηκαν για το προτεινόμενο σύστημα. Κάθε ΝΔ υλοποιεί ένα στάδιο ταξινόμησης / διαχωρισμού και θα αναφερόμαστε σε αυτό στο εξής ως “ταξινομητή”. Κάθε ταξινομητής που υλοποιήθηκε απαρτίζεται από ένα πολυστρωματικό ΝΔ, ευθέως τροφοδοτούμενο, με ένα κρυμμένο επίπεδο και μία έξοδο (σχήμα 28). Μετά από πειραματισμό βρέθηκε ότι ο βέλτιστος αριθμός νευρώνων για το κρυμμένο επίπεδο είναι δέκα (10). Το επίπεδο εξόδου αποτελείται από ένα νευρώνα, που κωδικοποιεί για δύο κατηγορίες/κλάσεις. Για τον πρώτο ταξινομητή το επίπεδο εξόδου τροφοδοτεί το επίπεδο εισόδου για το δεύτερο στάδιο ταξινόμησης (δεύτερο ΝΔ).

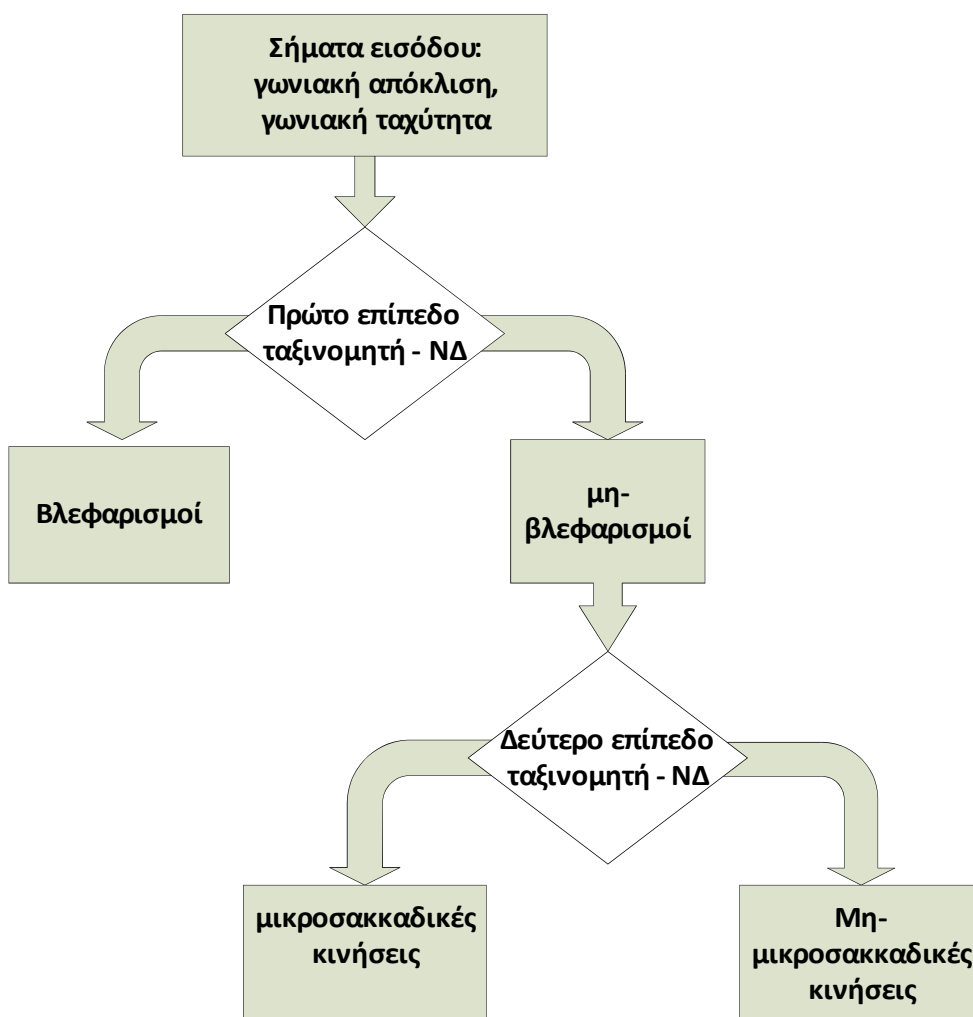


Σχήμα 28: Αρχιτεκτονική Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.

Σύμφωνα με την παράγραφο 3.2.4, για την πρώτη (A) από τις δύο δομές του συστήματος που δοκιμάστηκαν ο πρώτος ταξινομητής διαχωρίζει βλεφαρισμούς από μη-βλεφαρισμούς (“0” για βλεφαρισμό, “1” για μη-βλεφαρισμό), ενώ ο δεύτερος ταξινομητής διαχωρίζει τους μη-βλεφαρισμούς σε μικροσακκαδικές και μη-μικροσακκαδικές κινήσεις, δηλαδή σακκαδικές (“0” για μικροσακκαδική, “1” για σακκαδική).

Για την εκπαίδευση των ΝΔ χρησιμοποιήθηκαν τρία σύνολα δεδομένων: το εκπαιδευτικό σύνολο, το σύνολο αξιολόγησης και το σύνολο επαλήθευσης, ενώ για να αποφευχθεί το φαινόμενο της υπερ-εκπαίδευσης του ΝΔ, η εκπαίδευση σταματούσε όταν η απόδοση στο στάδιο επαλήθευσης μεγιστοποιούνταν. Κάθε ΝΔ εκπαιδεύτηκε με διαφορετικό εκπαιδευτικό σύνολο και σύνολο αξιολόγησης για δέκα φορές. Από το σύνολο των διανυσμάτων χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν, το 60% αυτών επιλέχθηκαν τυχαία για τα εκπαιδευτικά σύνολα, το υπόλοιπο 20% για τα σύνολα αξιολόγησης-δοκιμασίας των ΝΔ, ενώ το τελευταίο 20% για την επαλήθευση των ΝΔ. Για παράδειγμα, όσον αφορά στη δομή A του προτεινόμενου συστήματος, για τον ταξινομητή του πρώτου επιπέδου εξήχθησαν 649,236 διανύσματα χαρακτηριστικών με χρήση του κινούμενου παραθύρου W_1 , από τα οποία 389,541 για εκπαίδευση, 129,847 για αξιολόγηση και 129,847 για επαλήθευση. Για τον ταξινομητή του δεύτερου επιπέδου χρησιμοποιήθηκαν 127,750

διανύσματα χαρακτηριστικών με χρήση του κινούμενου παραθύρου W2, από τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία δεν υπήρχαν βλεφαρισμοί: 76,650 για εκπαίδευση, 25,550 για αξιολόγηση και τα υπόλοιπα 25,550 για επιβεβαίωση, ενώ ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία και για τη δεύτερη (B) προτεινόμενη δομή του συστήματος. Το σχηματικό διάγραμμα για τη δομή A του προτεινόμενου συστήματος DSS φαίνεται στο σχήμα 29.

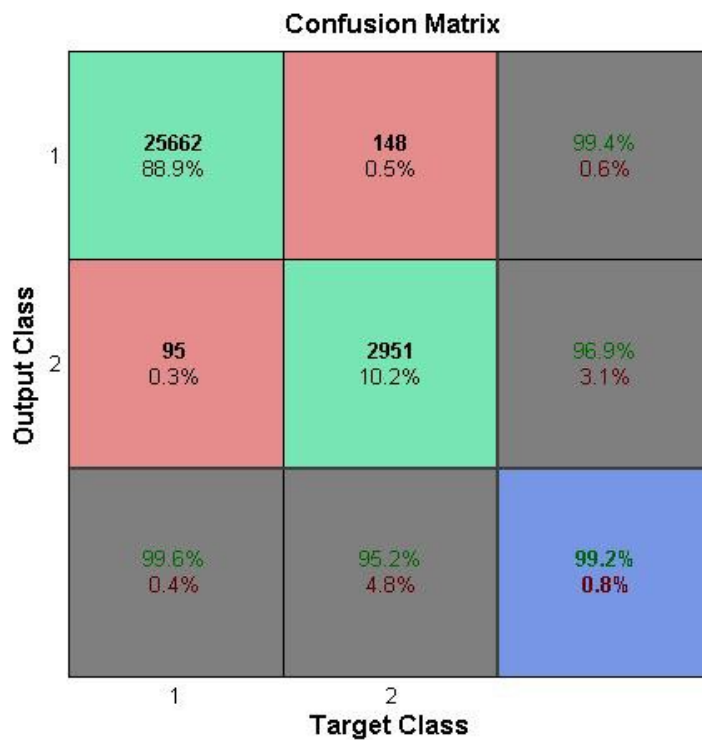


Σχήμα 29: Τα δύο επίπεδα ταξινόμησης / διαχωρισμού του προτεινόμενου συστήματος DSS.

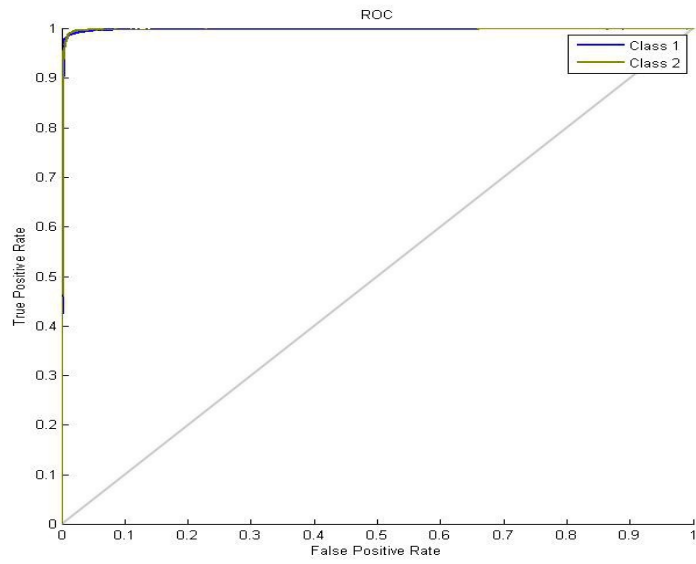
3.4.1 Πειραματικά αποτελέσματα – Δομή συστήματος A

Η παραπάνω προτεινόμενη μέθοδος για την ανίχνευση και το διαχωρισμό των οφθαλμοκινήσεων εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας οφθαλμοκινητικά δεδομένα από 1,392 άτομα,

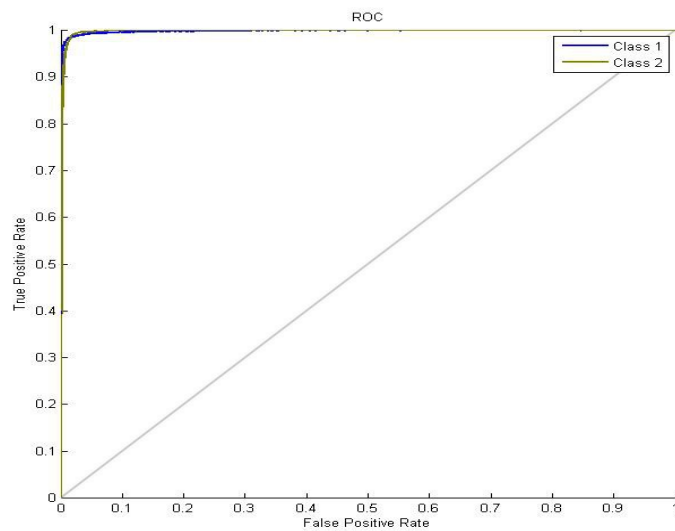
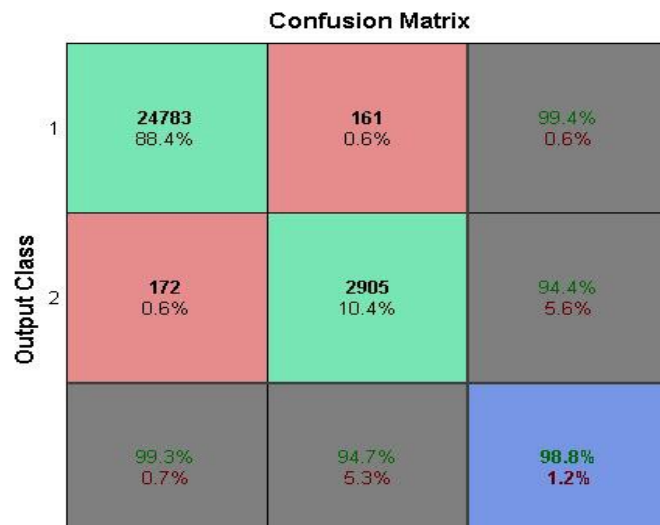
αποθηκευμένα στη βάση δεδομένων ASPIS. Για την προτεινόμενη δομή A του συστήματος η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για το πρώτο στάδιο ταξινόμησης υπολογίστηκε μετά από δέκα (10) επαναλήψεις να είναι 99.2%, χωρίς εφαρμογή του αλγόριθμου επιλογής χαρακτηριστικών, SFFS. Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτά φαίνονται στον πίνακα σύγχυσης (confusion matrix) του σχήματος 30α, ενώ η καμπύλη των λειτουργικών χαρακτηριστικών του δέκτη (ROC curve – Receiver Operating Characteristics) για το ίδιο στάδιο ταξινόμησης φαίνεται στο σχήμα 30β, για τις δύο τάξεις διαχωρισμού (κλάση 1: βλεφαρισμοί, κλάση 2: μη-βλεφαρισμοί).



(α)



(β)



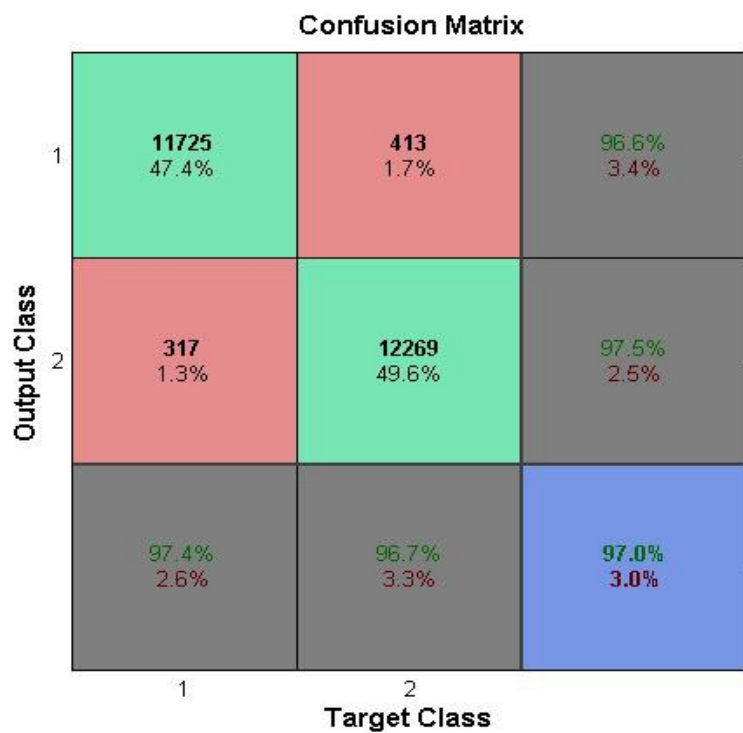
(δ)

Σχήμα 30: Δομή A: (α) Πίνακας σύγχυσης του πρώτου ταξινομητή μετά από δέκα επαναλήψεις και
(β) η αντίστοιχη ROC καμπύλη για κάθε κλάση διαχωρισμού.

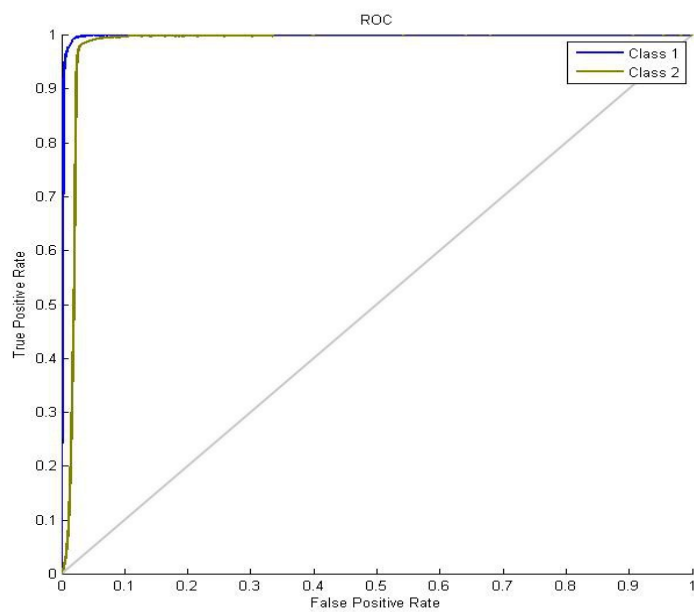
(γ) Πίνακας σύγχυσης του πρώτου ταξινομητή μετά από δέκα επαναλήψεις, με χρήση αλγόριθμου SFFS και
(δ) η αντίστοιχη ROC καμπύλη για κάθε κλάση διαχωρισμού.

Η χρήση του αλγόριθμου SFFS που προαναφέρθηκε έφερε διαφοροποιημένα αποτελέσματα. Τα χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν ήταν η παραμόρφωση, η εντροπία, η κύρτωση των σημάτων γωνιακής απόκλισης και γωνιακής ταχύτητας, καθώς και η μέση τιμή και το μέγιστο πλάτος της γωνιακής απόκλισης. Η συνολική ακρίβεια του πρώτου σταδίου ταξινόμησης υπολογίστηκε τώρα να είναι 98.8%, όπως φαίνεται στο σχήμα 30γ, ενώ η αντίστοιχη ROC καμπύλη για κάθε κλάση διαχωρισμού του πρώτου ταξινομητή φαίνεται στο σχήμα 30δ.

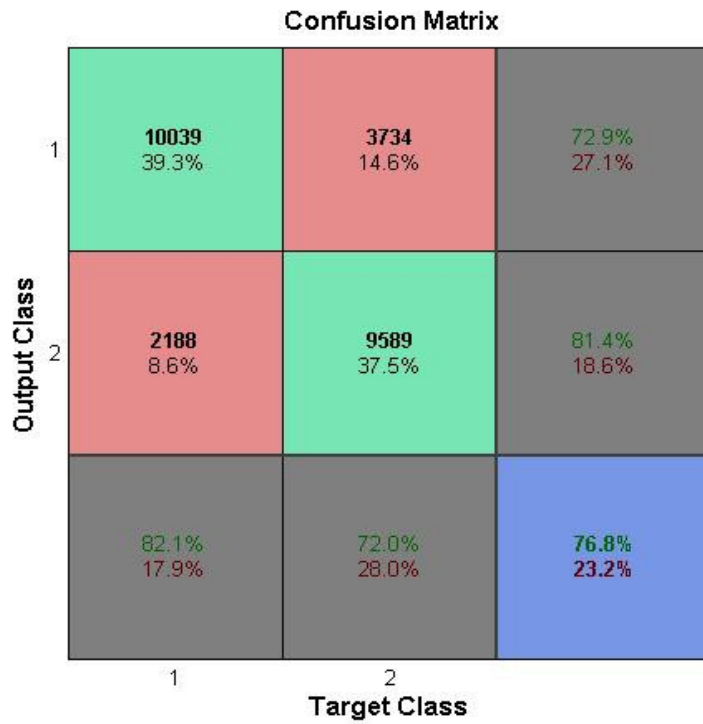
Για το δεύτερο στάδιο ταξινόμησης, κατά το οποίο διαχωρίζονται οι μικροσακκαδικές από τις σακκαδικές κινήσεις, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση υπολογίστηκε μετά από δέκα (10) επαναλήψεις να είναι 97.0%, χωρίς εφαρμογή του αλγόριθμου SFFS. Τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 31α και 31β αντίστοιχα: ο πίνακας σύγχυσης του δεύτερου σταδίου ταξινόμησης και η αντίστοιχη ROC καμπύλη για τις δύο κλάσεις διαχωρισμού (κλάση 1: μικροσακκαδικές, κλάση 2: σακκαδικές). Τα αντίστοιχα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου επιλογής χαρακτηριστικών, SFFS, φαίνονται στα σχήματα 31γ και 31δ αντίστοιχα, όπου επετεύχθη συνολική ακρίβεια 76.8% και έγινε επιλογή των χαρακτηριστικών εντροπίας του σήματος της γωνιακής ταχύτητας και τυπικής απόκλισης του σήματος της γωνιακής απόκλισης.



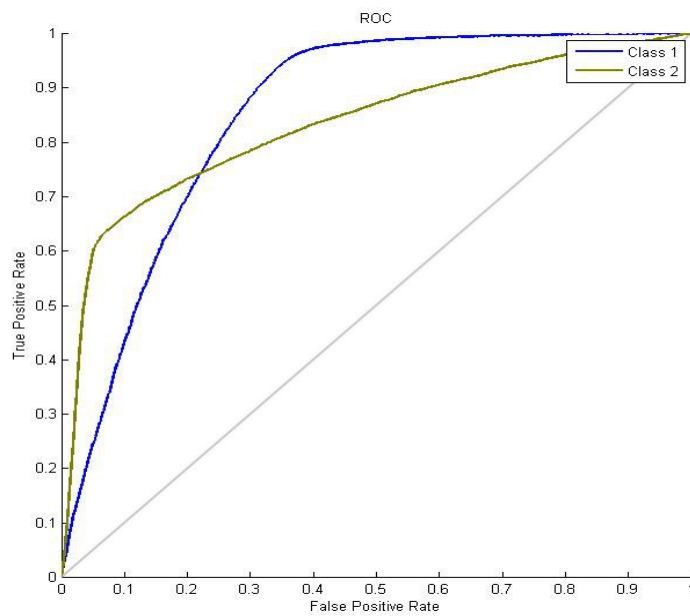
(α)



(β)



(γ)



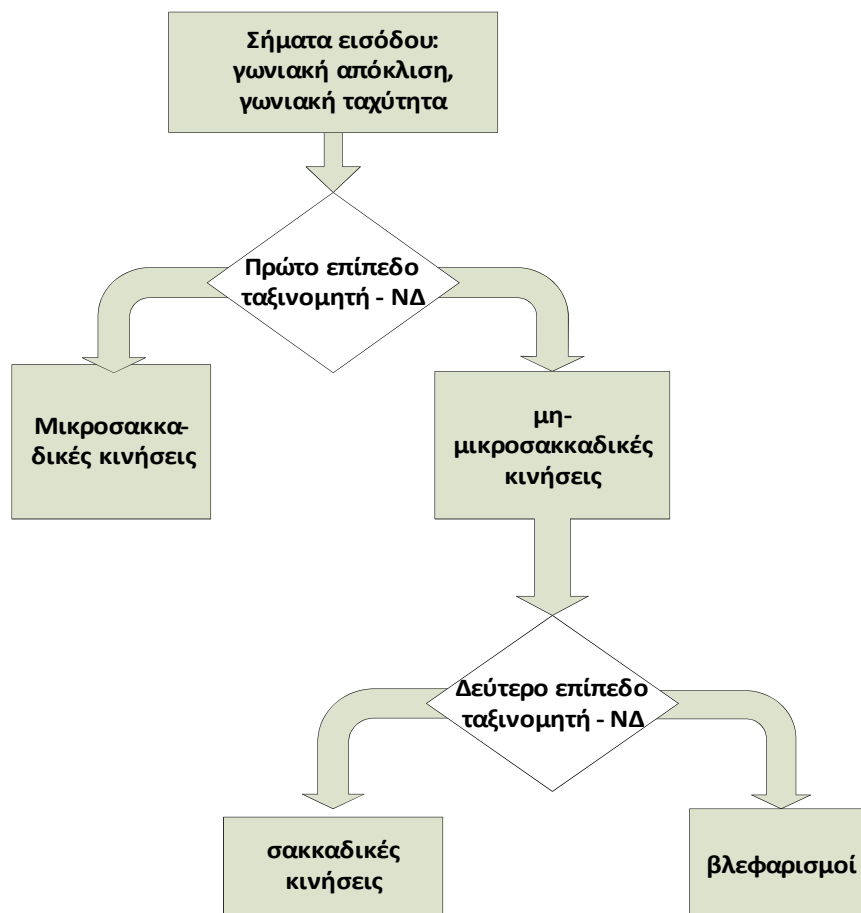
(δ)

Σχήμα 31: Δομή A: (α) Πίνακας σύγκρισης του δεύτερου ταξινομητή μετά από δέκα επαναλήψεις και (β) η αντίστοιχη ROC καμπύλη για κάθε κλάση διαχωρισμού.

(γ) Πίνακας σύγκυσης του δεύτερου ταξινομητή μετά από δέκα επαναλήψεις με χρήση αλγόριθμου SFFS και
(δ) η αντίστοιχη ROC καμπύλη για κάθε κλάση διαχωρισμού.

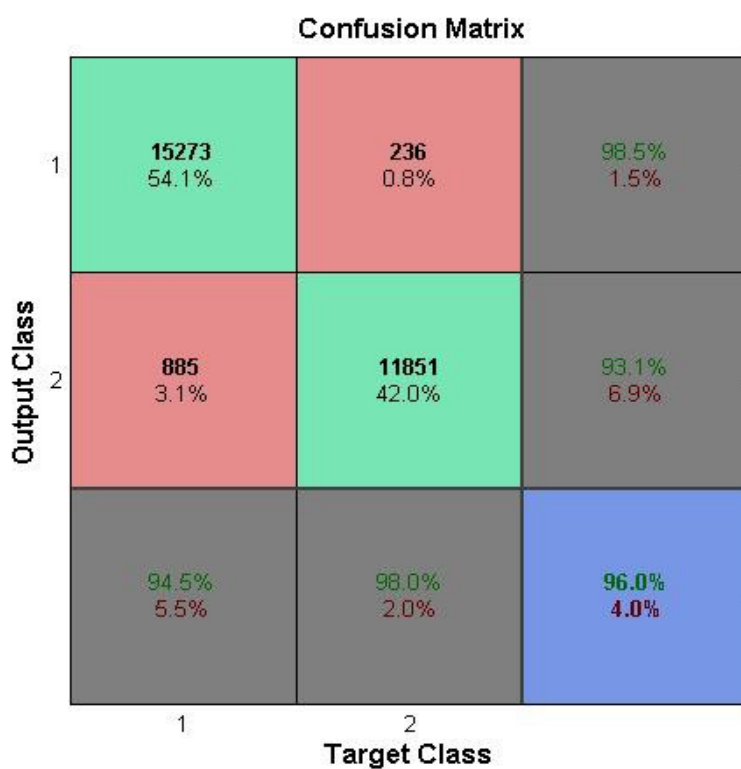
3.4.2 Πειραματικά αποτελέσματα – Δομή συστήματος B

Στη δεύτερη δομή (B) που δοκιμάστηκε το πρώτο νευρωνικό δίκτυο (ο πρώτος ταξινομητής) διαχωρίζει τις μικροσακκαδικές από τις υπόλοιπες οφθαλμοκινήσεις (σακκαδικές και βλεφαρισμούς), ενώ στο δεύτερο στάδιο ταξινόμησης διαχωρίζονται οι σακκαδικές κινήσεις από τους βλεφαρισμούς (σχήμα 32). Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι αυτή η δομή είχε μικρότερη συνολική ακρίβεια, όπως φαίνεται αναλυτικά παρακάτω.

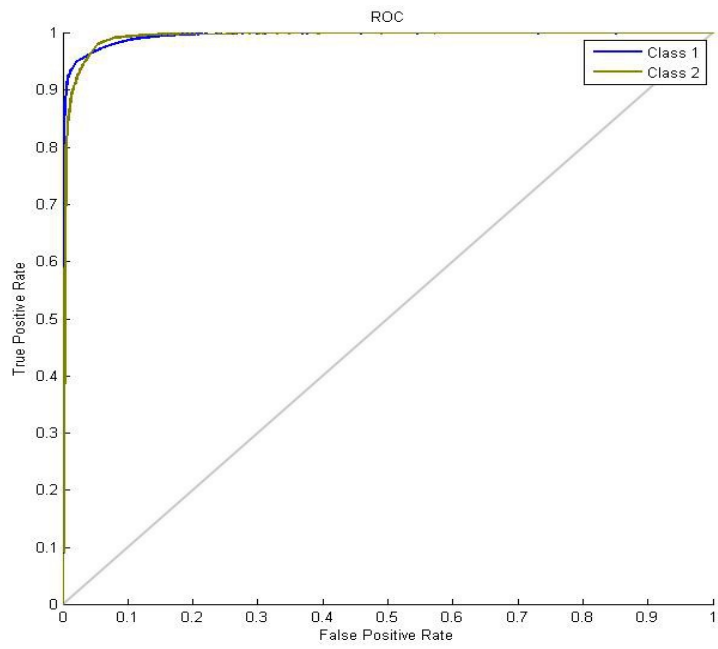


Σχήμα 32: Η δομή B του προτεινόμενου συστήματος.

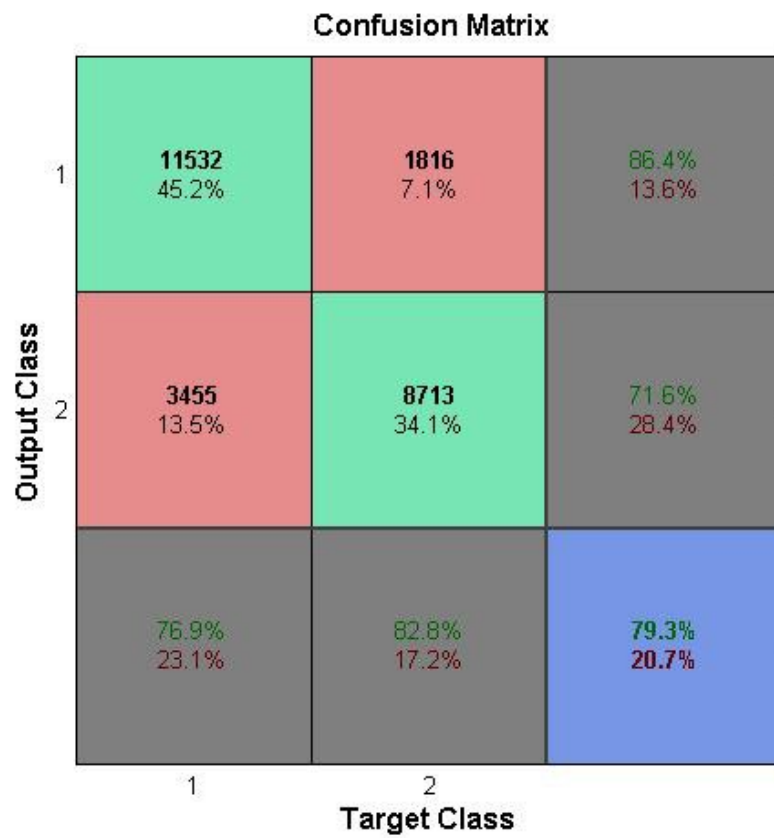
Ο πίνακας σύγχυσης και η ROC καμπύλη για κάθε κλάση διαχωρισμού του πρώτου επιπέδου ταξινόμησης (διαχωρισμός μικροσακκαδικών από τις υπόλοιπες οφθαλμοκινήσεις) μετά από δέκα (10) επαναλήψεις για την εξεταζόμενη δομή Β του συστήματος φαίνονται στα σχήματα 33α και 33β αντίστοιχα. Τα αντίστοιχα διαγράμματα για το δεύτερο επίπεδο ταξινόμησης (διαχωρισμός σακκαδικών κινήσεων από βλεφαρισμούς) μετά από δέκα (10) επαναλήψεις για την ίδια δομή φαίνονται στα σχήματα 34α και 34β αντίστοιχα.



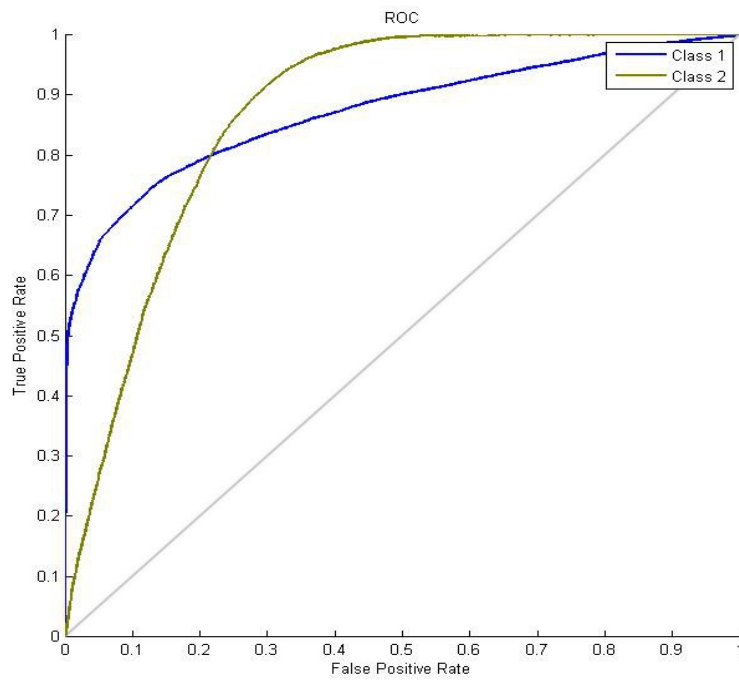
(α)



(β)



(γ)



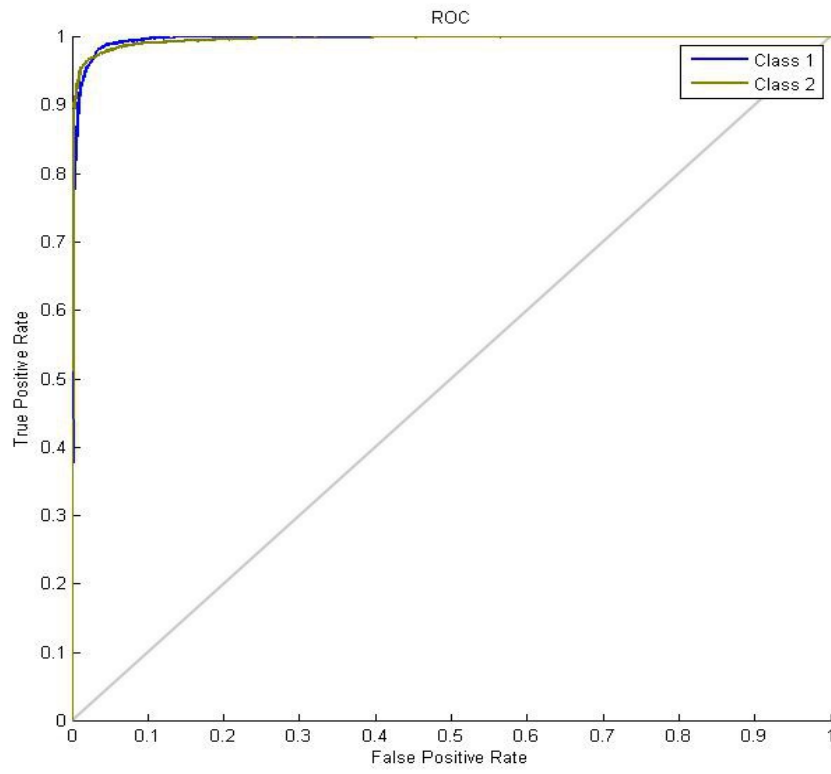
(δ)

Σχήμα 33: Δομή Β: (α) Πίνακας σύγχυσης για τον πρώτο ταξινομητή μετά από 10 επαναλήψεις και (β) η αντίστοιχη ROC καμπύλη για κάθε κλάση διαχωρισμού.

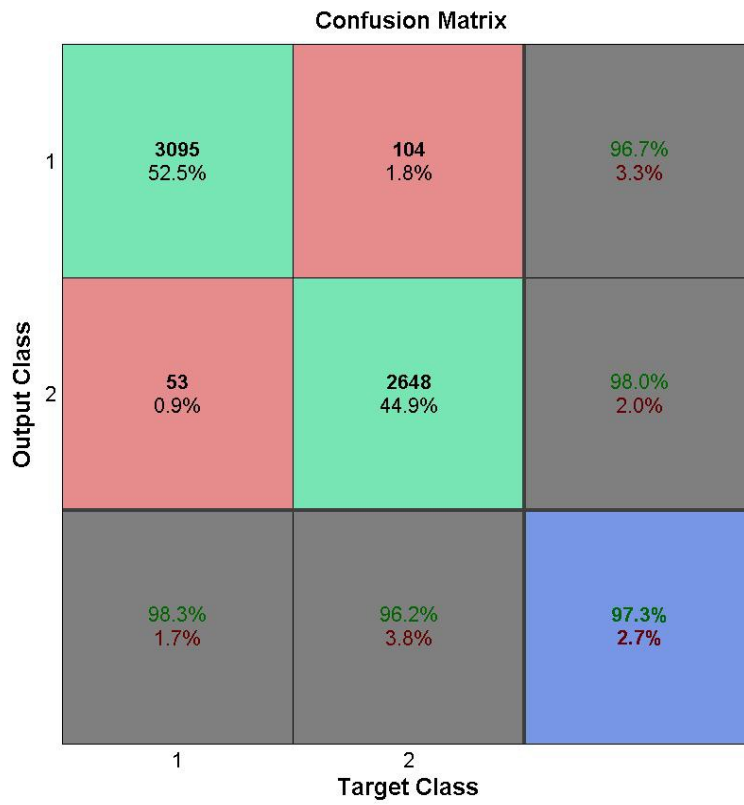
(γ) Πίνακας σύγχυσης του πρώτου ταξινομητή μετά από δέκα επαναλήψεις με χρήση αλγόριθμου SFFS και (δ) η αντίστοιχη ROC καμπύλη για κάθε κλάση διαχωρισμού.



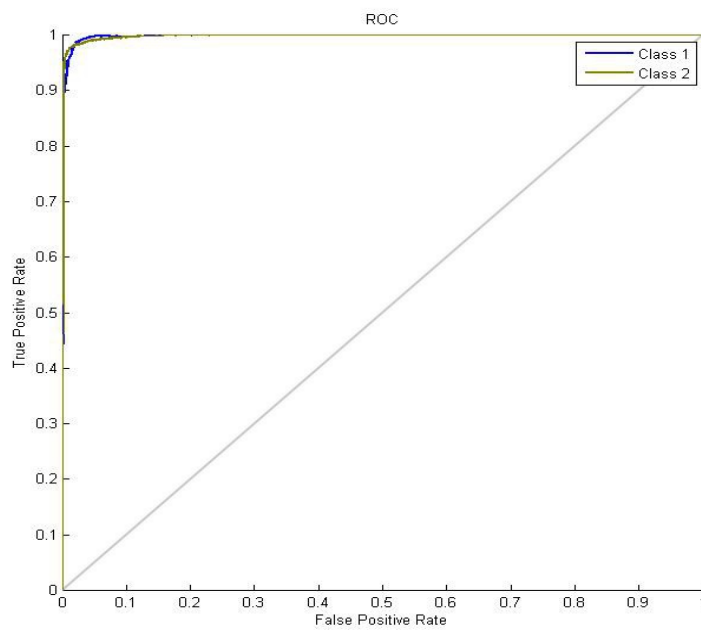
(a)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 34: Δομή Β: (α) Πίνακας σύγχυσης για το δεύτερο επίπεδο ταξινόμησης μετά από 10 επαναλήψεις και

(β) η αντίστοιχη ROC καμπύλη για κάθε κλάση διαχωρισμού.

(γ) Πίνακας σύγκρισης του δεύτερου ταξινομητή μετά από δέκα επαναλήψεις με χρήση αλγόριθμου SFFS και

(δ) η αντίστοιχη ROC καμπύλη για κάθε κλάση διαχωρισμού.

Όπως φαίνεται από τα πειραματικά αποτελέσματα, η δομή B που δοκιμάσαμε να εξετάσουμε έχει μικρότερη συνολική ακρίβεια, αλλά με πολύ μικρή διαφορά. Για το λόγο αυτό προτείνεται η χρήση και υλοποίηση οποιασδήποτε από τις δομές A ή B του προτεινόμενου συστήματος στήριξης απόφασης (DSS) της παρούσας μελέτης.

Τέλος, εξετάστηκε η δομή B και μετά από εφαρμογή του αλγόριθμου SFFS, για να διαπιστωθούν τα αποτελέσματα ως προς τη συνολική ακρίβεια / απόδοση. Τα πειραματικά αποτελέσματα (πίνακες σύγκρισης και αντίστοιχες ROC καμπύλες), που φαίνονται στα σχήματα 33γ, 33δ για το πρώτο στάδιο ταξινόμησης και στα 34γ, 34δ για το δεύτερο στάδιο ταξινόμησης, δείχνουν πολύ μικρότερη απόδοση στον πρώτο ταξινομητή (79.3%) και ελαφρώς μικρότερη απόδοση στο δεύτερο ταξινομητή (97.3%) σε σχέση με την αντίστοιχη απόδοση των ταξινομητών χωρίς την επιλογή χαρακτηριστικών από τον αλγόριθμο SFFS (96.0% και 98.0% αντίστοιχα).

3.4.3 Πειραματικά αποτελέσματα – σύγκριση

Όλα τα πειραματικά αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα 1 για λόγους ευκρίνειας και συγκριτικής ευχέρειας. Φαίνονται οι κλάσεις διαχωρισμού και η αντίστοιχη απόδοση που προέκυψε για κάθε επίπεδο ταξινόμησης και για καθεμία από τις δύο εξεταζόμενες δομές, με και χωρίς εφαρμογή του αλγορίθμου SFFS. Με απλή σύγκριση της συνολικής απόδοσης (πίνακας 1) των δύο επιπέδων ταξινόμησης καθεμιάς από τις δύο εξεταζόμενες δομές (A και B) του προτεινόμενου συστήματος, είναι εμφανές ότι επιτυγχάνουν παρόμοια συνολική απόδοση και, για το λόγο αυτό, προτείνονται και οι δύο για την υλοποίηση του συστήματος DSS.

	Πρώτος ταξινομητής	Πρώτος ταξινομητής με SFFS	Δεύτερος ταξινομητής	Δεύτερος ταξινομητής με SFFS
ΔΟΜΗ Α	Κλάσεις διαχωρισμού “0”: βλεφαρισμός “1”: μη-βλεφαρισμός		“0”: μικροσακκαδική “1”: σακκαδική	
	Απόδοση 99.20%	98.80%	97.00%	76.80%
ΔΟΜΗ Β	Κλάσεις διαχωρισμού “0”: μικροσακκαδική “1”: μη-μικροσακκαδική		“0”: σακκαδική “1”: βλεφαρισμός	
	Απόδοση 96.00%	79.30%	98.00%	97.30%

Πίνακας 1: Σύνοψη των πειραματικών αποτελεσμάτων για κάθε εξεταζόμενη δομή, για κάθε στάδιο ταξινόμησης, με και χωρίς εφαρμογή του αλγορίθμου SFFS.

Επιπλέον, η εφαρμογή του αλγορίθμου επιλογής χαρακτηριστικών, SFFS, δε βελτίωσε την απόδοση του εκάστοτε ταξινομητή, αλλά αύξησε την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος. Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι μέσω της χρήσης του αλγορίθμου SFFS εμφανίζεται μεγαλύτερη ταχύτητα απόκρισης, με αντιστάθμισμα τη μικρότερη συνολική ακρίβεια για το προτεινόμενο σύστημα DSS. Η χρήση του είναι προαιρετική, όπως αναφέρθηκε, και επαφίεται στις λειτουργικές προτεραιότητες της εκάστοτε εφαρμογής.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας συνοπτικός πίνακας πειραματικών αποτελεσμάτων (πίνακας 2) για την απόδοση κάθε επιπέδου ταξινόμησης του προτεινόμενου συστήματος (δομή Α) σε καθεμία από τις τρεις οφθαλμοκινητικές ασκήσεις-δοκιμασίες που αναφέρονται στην παράγραφο “Απόκτηση Δεδομένων” (3.1).

	Δοκιμασία 1	Δοκιμασία 2	Δοκιμασία 3
• Βλεφαρισμοί & μη-βλεφαρισμοί	99.8%	99.8%	99.7%
• Μικροσακκαδικές & μη-μικροσακκαδικές	95.2%	97.1%	95.3%

Πίνακας 2: Αποτελέσματα του προτεινόμενου DSS για κάθε δοκιμασία.

Όπως φαίνεται, οι διαφορές στην ακρίβεια του συστήματος για κάθε δοκιμασία δεν διαφοροποιούνται κατά πολύ, όμως η απόδοση του συστήματος αυξάνεται συνολικά με τη χρήση του συνόλου των σημάτων από όλες τις δοκιμασίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Επίλογος

4.1 Συμπεράσματα

Οι κινήσεις των οφθαλμών παρέχουν αξιόλογη ποσότητα πληροφορίας για τη μελέτη της ανθρώπινης συμπεριφοράς και έχουν γίνει αντικείμενο μελέτης πολύ έντονα τα τελευταία χρόνια [32]. Ο σημαντικότερος λόγος του αυξημένου ενδιαφέροντος ίσως είναι ότι οι κινήσεις των οφθαλμών υποδεικνύουν το επίκεντρο της οπτικής προσήλωσης. Οι οφθαλμοί δεν παραμένουν ακίνητοι όταν δέχονται ένα οπτικό ερέθισμα, αλλά κινούνται διαρκώς, με σκοπό να σχηματιστεί στον εγκέφαλο το οπτικό αντίλημα [33]. Ο λόγος, για τον οποίο είναι απαραίτητη η αδιάκοπη κίνησή τους είναι πως μόνο στο κεντρικό βοθρίο του αμφιβληστροειδή εμφανίζεται η μέγιστη ικανότητα ευκρίνειας, λόγω της υψηλής πυκνότητας κωνίων εκεί.

Οι οφθαλμοκινήσεις που αποτελούν το επίκεντρο του ενδιαφέροντος για την παρούσα μελέτη είναι οι σακκαδικές και μικροσακκαδικές κινήσεις των οφθαλμών. Έχει μελετηθεί πολύ στο παρελθόν η σχέση των σακκαδικών κινήσεων με διάφορα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης συμπεριφοράς [37]. Για παράδειγμα, σε πείραμα καταγραφής σακκαδικών κινήσεων κατά τη διάρκεια παρακολούθησης περιστρεφόμενων φωτογραφιών, έχει βρεθεί ότι η κατεύθυνση των σακκαδικών κινήσεων ακολουθεί τον προσανατολισμό του οπτικού ερεθίσματος [38].

Φυσικά, εκτός από τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί όσον αφορά τη φυσιολογική όραση, οι σακκαδικές κινήσεις έχουν επίσης μελετηθεί πολύ και σε σχέση με ασθένειες, όπως

είναι η διαταραχή ελλειμματικής προσοχής και υπερκινητικότητας (ΔΕΠΥ), η σχιζοφρένεια, αλλά και σε σχέση με ηλικιακές ομάδες, όπως είναι οι ηλικιωμένοι. Το βασικό κίνητρο της εστίασης του ενδιαφέροντος των μελετών στην οικογένεια των σακκαδικών κινήσεων πηγάζει από το γεγονός ότι παρέχουν τη δυνατότητα μη επεμβατικής και ευπρόσιτης έρευνας των ψυχοκινητικών λειτουργιών του ανθρώπου, αλλά και ανώτερου επιπέδου νοητικών διεργασιών και των υποκείμενων νευρωνικών μηχανισμών τους. Κατά συνέπεια, η μελέτη των σακκαδικών κινήσεων σε ανθρώπους με ψυχιατρικές ασθένειες μπορεί να βοηθήσει στην αποτελεσματικότερη διάγνωση και αντιμετώπιση των δυσλειτουργιών, μέσω μίας οδού επικοινωνίας των εγκεφαλικών με τις νευρωνικές τους λειτουργίες και ως προς τις συμπεριφορές που αυτές προκαλούν.

Παρόλη τη σημαντικότητα της μελέτης τους, οι οφθαλμικές κινήσεις μπορεί να είναι εξαιρετικά δύσκολο και κουραστικό να αναλυθούν. Όσον αφορά στην ανάλυση των οφθαλμικών κινήσεων αποτελεί πολύ σημαντικό στόχο ο διαχωρισμός και η ανίχνευση των διαφορετικών ειδών οφθαλμικών κινήσεων, όπως είναι οι σακκαδικές, οι μικροσακκαδικές και οι βλεφαρισμοί, μέσω ενός αυτόματου συστήματος υποστήριξης απόφασης, DSS. Για το λόγο αυτό η παρούσα μελέτη και το προτεινόμενο σύστημα DSS αποτελούν επίτευγμα και σημαντικό εργαλείο αυτοματοποιημένης βοήθειας για τους ειδικούς, προς την κατεύθυνση των πιο πρόσφατων ερευνητικών μελετών για το συσχετισμό των οφθαλμικών κινήσεων με την ψυχοκινητική συμπεριφορά ομάδων ασθενών με ψυχιατρικές παθήσεις.

Επιπλέον, όσον αφορά στην απόδοση του προτεινόμενου συστήματος DSS, υπάρχουν ποικίλοι παράγοντες που παίζουν ρόλο. Για παράδειγμα, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως ο τρόπος απόκτησης των δεδομένων που επεξεργάστηκαν και συγκεκριμένα το μέγεθος των παραθύρων W1 και W2 έχουν κρίσιμο ρόλο στη σωστό διαχωρισμό των οφθαλμικών κινήσεων σε σακκαδικές, μικροσακκαδικές και βλεφαρισμούς. Αν το μέγεθος των παραθύρων

είναι πολύ μικρό, είναι πιθανό να μη συμπεριλαμβάνονται οι κρίσιμες οφθαλμοκινήσεις βλεφαρισμών ή σακκαδικών, ενώ αν είναι πολύ μεγάλο, ιδιαίτερα το παράθυρο W2, μπορεί να αναμειχθούν οι μικροσακκαδικές με άλλες κινήσεις προσήλωσης, όπως είναι οι κινήσεις-τρέμουλο και οι κινήσεις διολίσθησης. Μετά από πειραματισμό με τα μεγέθη των παραθύρων καταλήξαμε στο συμπέρασμα πως, αν χρησιμοποιηθεί παράθυρο W1 με λιγότερα από 240 σημεία, η ακρίβεια του πρώτου σταδίου ταξινόμησης κατά τη δομή A ελαττώνεται στο 75%, ενώ αν χρησιμοποιηθεί παράθυρο W2 με περισσότερα από 8 σημεία, η ακρίβεια του πρώτου σταδίου ταξινόμησης κατά τη δομή A φτάνει στο 60%, παρερμηνεύοντας τις μικροσακκαδικές με κινήσεις-τρέμουλο και κινήσεις διολίσθησης, λόγω του μικρού τους πλάτους και της μικρής τους διάρκειας.

Τέλος, στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SFFS για επιλογή χαρακτηριστικών, ο οποίος αποτελεί μια υποβέλτιστη λύση. Θα μπορούσε να έχει χρησιμοποιηθεί ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm – GA), που έχει παρόμοια απόδοση με τον SFFS, όχι όμως σε αυξημένες διαστάσεις συστήματος, όπως στην περίπτωση μας. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι της μεθόδου “branch and bound” θεωρείται πως παρέχουν βέλτιστα αποτελέσματα, αλλά η βελτιστότητα που παρέχουν περιορίζεται από τη μονοτονικότητα της συνάρτησης επιλογής χαρακτηριστικών. Επιπλέον αυτού, για συστήματα με πολλά χαρακτηριστικά, όπως της δικής μας περίπτωσης, οι αλγόριθμοι “branch and bound” δεν είναι πρακτικοί, καθώς το πλήθος των χαρακτηριστικών που μπορούν να χειριστούν αποτελεσματικά εξαρτάται από την απόδοση του ηλεκτρονικού υπολογιστή που χρησιμοποιείται.

4.2 Μελλοντική έρευνα – Κατακλείδα

Μετά από την παρουσίαση όλης της διαδικασίας που ακολουθήθηκε, την εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων και τη σύγκρισή τους, προτείνεται η υλοποίηση του προτεινόμενου

συστήματος DSS, είτε κατά τη δομή Α είτε κατά τη δομή Β και με προαιρετική εφαρμογή του αλγόριθμου SFFS για επιλογή χαρακτηριστικών, η οποία προτείνεται σε περίπτωση που η ταχύτητα απόκρισης του συστήματος έχει περισσότερη σημασία από την απόδοσή του, καθώς η τελευταία εμφανίζεται χαμηλότερη με την εφαρμογή του SFFS. Υπενθυμίζεται, εδώ ότι, κατά τη δομή Α στο πρώτο επίπεδο ταξινόμησης διαχωρίζονται οι βλεφαρισμοί από τις υπόλοιπες οφθαλμοκινήσεις, τις οποίες διαχωρίζει ο δεύτερος ταξινομητής σε μικρασακκαδικές και σακκαδικές, ενώ κατά τη δομή Β στο πρώτο επίπεδο ταξινόμησης διαχωρίζονται οι μικρασακκαδικές από τις υπόλοιπες οφθαλμοκινήσεις, τις οποίες διαχωρίζει ο δεύτερος ταξινομητής σε βλεφαρισμούς και σακκαδικές.

Η μετρηθείσα πειραματικά απόδοση του προτεινόμενου συστήματος υποστήριξης απόφασης κρίνεται ικανοποιητική. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κλινικές μελέτες στο μέλλον, αφότου εξελιχθεί. Η αυτοματοποίηση της ταξινόμησης οφθαλμοκινήσεων που υλοποιήθηκε προσδίδει στην εφαρμογή αντικειμενικότητα ως προς την εκτίμηση σημάτων ηλεκτροοφθαλμογραφήματος και διευκολύνει τη χρήση της σε κλινικές εφαρμογές. Με το προτεινόμενο σύστημα DSS γίνεται δυνατή η ιατρική διάγνωση σε πραγματικό χρόνο. Στο μέλλον προτείνεται η περαιτέρω ανάπτυξη του συστήματος και η ενσωμάτωσή του σε συσκευή ταξινόμησης οφθαλμοκινήσεων. Η συσκευή αυτή θα παρείχε στους ειδικούς τη δυνατότητα ταχύτερης διάγνωσης, μέσω της γρήγορης και ακριβούς ταξινόμησης των σημάτων ηλεκτροοφθαλμογραφήματος σε πραγματικό χρόνο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Bridgeman, B. and J. Palca (1980). "The role of microsaccades in high acuity observational tasks." *Vision Res* **20**(9): 813-7.
2. Carpenter, R. H. S. M. o. t. E. P., (1988). "Movements of the Eyes.", Pion, London.
3. Cornsweet, T. N. (1956). "Determination of the stimuli for involuntary drifts and saccadic eye movements." *J Opt Soc Am* **46**(11): 987-93.
4. Γεώργιος Παναγής (2002). "Νευροεπιστήμη της συμπεριφοράς.". Ιατρικές Εκδόσεις Π.Φ. Πασχαλίδη.
5. Denney, D. and Denney, C. (1984). "The eye blink electro-oculogram." *British Journal of Ophthalmology*, **68**, 225-228.
6. Ditchburn, R. W. (1980). "The function of small saccades." *Vision Res* **20**(3): 271-2.
7. Ditchburn, R. W., D. H. Fender, et al. (1959). "Vision with controlled movements of the retinal image." *J Physiol* **145**(1): 98-107.
8. Ditchburn, R. W. and B. L. Ginsborg (1953). "Involuntary eye movements during fixation." *J Physiol* **119**(1): 1-17.
9. Engbert, R. and R. Kliegl (2004). "Microsaccades keep the eyes' balance during fixation." *Psychol Sci* **15**(6): 431-6.
10. Gerrits, H. J. and A. J. Vendrik (1970). "Artificial movements of a stabilized image." *Vision Res* **10**(12): 1443-56.
11. Hubel, D. H. and T. N. Wiesel (1965). "Receptive Fields and Functional Architecture in Two Nonstriate Visual Areas (18 and 19) of the Cat." *J Neurophysiol* **28**: 229-89.
12. Ιωάννης Βρεττός (2006). "Μελέτη Οφθαλμικών Κινήσεων Προσήλωσης." (διπλωματική εργασία), Πανεπιστήμιο Κρήτης, Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Οπτική και Όραση, Ηράκλειο Κρήτης.
13. Kowler, E. and R. M. Steinman (1977). "The role of small saccades in counting." *Vision Res* **17**(1): 141-6.
14. Kowler, E. and R. M. Steinman (1979). "Miniature saccades: eye movements that do not count." *Vision Res* **19**(1): 105-8.

15. Kuffler, S. W. (1952). "Neurons in the retina; organization, inhibition and excitation problems." *Cold Spring Harb Symp Quant Biol* **17**: 281-92.
16. Lisboa, P.J.G., (2002). "A review of evidence of health benefit from artificial neural networks in medical intervention." *Neural Networks* 15, pp.11-39.
17. Martinez-Conde, S., S. L. Macknik, et al. (2000). "Microsaccadic eye movements and firing of single cells in the striate cortex of macaque monkeys." *Nat Neurosci* **3**(3): 251-8.
18. Martinez-Conde, S., S. L. Macknik, et al. (2004). "The role of fixational eye movements in visual perception." *Nat Rev Neurosci* **5**(3): 229-40.
19. Moller, F., M. L. Laursen, et al. (2002). "Binocular quantification and characterization of microsaccades." *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* **240**(9): 765-70.
20. Nachmias, J. (1961). "Determiners of the drift of the eye during monocular fixation." *J Opt Soc Am* **51**: 761-6.
21. Ratliff, F. and L. A. Riggs (1950). "Involuntary motions of the eye during monocular fixation." *J Exp Psychol* **40**(6): 687-701.
22. Riggs, L. A. and F. Ratliff (1951). "Visual acuity and the normal tremor of the eyes." *Science* **114**(2949): 17-8.
23. Riggs, L. A., F. Ratliff, et al. (1953). "The disappearance of steadily fixated visual test objects." *J Opt Soc Am* **43**(6): 495-501.
24. Sharpe, C. R. (1972). "The visibility and fading of thin lines visualized by their controlled movement across the retina." *J Physiol* **222**(1): 113-34.
25. Skavenski, A. A., R. M. Hansen, et al. (1979). "Quality of retinal image stabilization during small natural and artificial body rotations in man." *Vision Res* **19**(6): 675- 83.
26. Spauschus, A., J. Marsden, et al. (1999). "The origin of ocular microtremor in man." *Exp Brain Res* **126**(4): 556-62.
27. Steinman, R. M., R. J. Cunitz, et al. (1967). "Voluntary control of microsaccades during maintained monocular fixation." *Science* **155**(769): 1577-9.
28. Steinman, R. M., G. M. Haddad, et al. (1973). "Miniature eye movement." *Science* **181**(102): 810-9.
29. Winterson, B. J. and H. Collewyn (1976). "Microsaccades during finely guided visuomotor tasks." *Vision Res* **16**(12): 1387-90.
30. Yarbus, A. L. (1967). "Eye Movements and Vision." Plenum, NewYork.

31. Zuber, B. L. and L. Stark (1965). "Microsaccades and the velocity-amplitude relationship for saccadic eye movements." *Science* **150**(702): 1459-60.
32. Leigh, R. (2004). "Using saccades as a research tool in the clinical neurosciences." *Brain*, p. 460–477.
33. Munoz, D. (2004). "Lookaway: the anti-saccade task and the voluntary control of eye movement." *Nat.Rev.Neurosci.*, p. 218–228.
34. J. L. a. D. Zee, (1991). "The neurology of eye movements" F.A. Davis Company.
35. E. K. Han Collewijn, "The significance of microsaccades for vision and oculomotor control." *Journal of Vision*, vol. 20, no. 8, p. 1–21, 2008.
36. S. L. M. X. G. T. a. D. H. H. Susana Martinez-Conde, (2009). "Microsaccades: a neurophysiological analysis." Cell Press.
37. J. B. J. a. I. T. C. H. Smeets, (2003). "Nature of variability in saccades." *J Neurophysiol*, no. 90, p. 12–20.
38. A. K. G. U. Tom Foulsham, (2008). "Turning the world around: Patterns in saccade direction vary with picture orientation" *Vision Research*, no. 48 , p. 1777–1790.
39. K. H. ,. T. K. ,. Y. S. ,. H. K. ,. K. A. ,. K. S. ,. M. A. Yusuke Goto, (2010). "Saccade eye movements as a quantitative measure of frontostriatal network in children with ADHD." *Brain & Development*, vol. 32 , p. 347–355.
40. A. D. a. R. Dodge, (1908). "An experimental study of the ocular reactions of the insane from photographic records," *Brain*, no. 31, p. 451 – 489.
41. J. C. a. M. Panouilleres, (2009). "Adaptation of reactive and voluntary saccades: different patterns of adaptation revealed in the antisaccade task," *J Physiol*, no. 587.1 , p. 127–138.
42. N. C. S. ,. I. E. Nikolaos Smyrnis, (2009). "Larger variability of saccadic reaction times in schizophrenia patients.," *Psychiatry Research*, no. 268 , p. 129–136.
43. M. D. C. M. L. K. G. D. B. J. Ramchandran RS, (2004). "The relationship of saccadic peak velocity to latency: Evidence for a new prosaccadic abnormality in schizophrenia.," *Experimental Brain Research.*, no. 159, pp. 99-107.
44. M. S. H. M. S. K. J. A. S. James L. Reillya, (2005). "Abnormalities in visually guided saccades suggest corticofugal dysregulation in never-treated schizophrenia.," *Biological Psychiatry*, vol. 57, no. 2, p. 145–154.
45. D. C. G. a. M. A. Basso, (2009). "A Review of Saccadic Research in Psychiatric Patient Populations," *Brain Cogn.*

46. D. D. S. a. J. R. Anderson., (2001). "Automated eye-movement protocol analysis," *Human-Computer Interaction*, vol. 16, no. 1, p. 39–86.
47. C. M. S. M. Z. E. A. B. E. A. Dmitry Laguna, (2011). "Detecting cognitive impairment by eye movement analysis using automatic classification algorithms."
48. J. A. W. H. G. a. G. T. Andreas Bulling, (2011). "Eye Movement Analysis for Activity Recognition Using Electrooculography," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, vol. 33, no. 4, pp. 741-753.
49. N. S. .. E. K. .. I. Evdokimidis, (2004). "Active eye fixation performance in 940 young men: effects of IQ, schizotypy, anxiety and depression," *Exp Brain Res*, vol. 156, p. 1–10.
50. N. E. H. S. R. L. a. C.-K. P. Zhaohua Wu, "On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series." 27 7 2007.
51. M. N. a. K. Holmqvist, (2009). "An Adaptive Algorithm for Fixation, Saccade, and Glissade Detection in Eye-Tracking Data."
52. H. Schiffman, (2001). "Sensation and Perception. An Integrated Approach.", New York: John Wiley and Sons, Inc.
53. E. V. I. K. a. G. K. M. P.A. Asvestas, (2008). "Classification of event – related potentials associated with response errors in actors." *Bioinformatics and Bioengineering*.
54. T. P. R. J. Jiang J, (2010). "Medical image analysis with artificial neural networks," *Computerized Medical Imaging and Graphics.*, no. 34 , pp. 617-631.
55. J. F. a. R. Walker, (2012). "Human saccadic eye movements." *Scholarpedia*, vol. 7, no. 7.
56. J. F. V. W. P. G. N. Rodrigo Moraes, (2013). "Document-level sentiment classification: An empirical comparison between SVM and ANN," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 2, pp. 621-633.
57. W. D. E. R. Jianping Hua, (2009). "Performance of feature selection methods in the classification of high-dimension data.," *Pattern Recognition*, vol. 42, pp. 409-424.
58. G. S. Hongbin Zhang, (2002). "Feature selection using tabu search method," *Pattern Recognition*, vol. 35, pp. 701-711.

