



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΓΧΡΩΜΗ ΟΡΑΣΗ

ΧΡΗΣΤΟΣ ΦΩΤΗΣ Α.Μ. 540

ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗΣ Α.Μ. 587

ΓΙΩΡΓΟΣ ΣΟΦΙΑΝΙΔΗΣ Α.Μ. 591

Επιβλέπων Καθηγητής: κ ΚΟΥΤΣΟΘΕΟΔΩΡΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

Αίγιο - 2016

Ευχαριστίες

Πριν από όλα θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ.Θεόδωρο Κουτσοθεοδωρή που μας έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθούμε με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης να τον ευχαριστήσουμε για τη βοήθεια την καθοδήγησή του στην εκπόνηση και τις χρήσιμες συμβουλές του. Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλουμε και στις οικογένειές μας που μας στήριξαν με κάθε τρόπο σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

Πρόλογος

Η πτυχιακή εργασία που παρουσιάζουμε είναι με θέμα «Η έγχρωμη όραση» των φοιτητών Χρήστου Φώτη, Χρήστου Κατσιγιάννη και Γιώργου Σοφιανίδη του τμήματος Οπτικής και Οπτομετρίας Τ.Ε.Ι Δυτικής Ελλάδος. Παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση του θεωρητικού μέρους και της έρευνας της πτυχιακής εργασίας.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Το φως	5
1.1 Φύση του φωτός.....	5
1.2 Το χρώμα.....	9
1.2.1 Χαρακτηριστικά.....	9
1.2.2 Κατηγοριοποίηση.....	10
1.2.3 Χρωματικά μοντέλα.....	10
Κεφάλαιο 2 : Η ανθρώπινη όραση.....	32
2.1 Λειτουργία.....	32
2.2 Διακριτική ικανότητα.....	33
2.3 Αμφιβληστροειδής.....	35
Κεφάλαιο 3 : Η αντίληψη της έγχρωμης όρασης.....	39
3.1 Οι θεωρίες.....	39
3.2 Γενετική εξέλιξη.....	46
3.3 Διαταραχές στην αντίληψη χρωμάτων.....	49
Κεφάλαιο 4 : Τεστ Ισιχάρα.....	54
Κεφάλαιο 5 : Έρευνα αξιολόγησης χρωματικού σφάλματος.....	56
5.1 Υλικά και μέθοδοι.....	56
5.2 Αποτελέσματα μετρήσεων.....	56
5.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα.....	62
Βιβλιογραφία.....	64

Κεφάλαιο 1 : Το Φως

1.1 Φύση του φωτός

Από την εποχή του Εμπεδοκλή (5ος π.Χ. αιώνας) και για αρκετούς αιώνες κυριαρχούσε η άποψη ότι το φως είναι μια δέσμη από σωματίδια κάτι σαν μικρές σφαίρες τα οποία εκπέμπει η φωτοβολούσα πηγή (Δημόκριτος). Κατά τους Αλεξανδρινούς και αργότερα Ρωμαϊκούς χρόνους οι ενασχολούμενοι ενδιαφέρονταν περισσότερο για την γεωμετρία των φωτεινών φαινομένων και λιγότερο για την φύση του φωτός.

Πολύ αργότερα το 17^ο αιώνα επαναφέρει το θέμα ο Isaac Newton. Πίστευε ότι το φως αποτελείται από σωματίδια απείρων ειδών , που το κάθε είδος προκαλούσε την αίσθηση ενός μόνο χρώματος . Στην «Οπτική» του μάλιστα 1675 – 1703 θα αντικαταχθεί στη κυματική θεωρία που είχαν διατυπώσει οι σύγχρονοί του Hook και Huygens με την απορία ποιο είναι το μέσο διάδοσης του φωτός στο κενό εφόσον είναι (υλικό) κύμα .

Παρά ταύτα ο Ολλανδός φυσικός Christian Huygens το 1678 απέδειξε τους νόμους της ανάκλασης, της διάθλασης και της περίθλασης βασιζόμενος στην γεωμετρική οπτική και κυρίως στη κυματική θεωρία. Η θεωρία του όμως περιέπεσε σε αδράνεια για πάρα πολλά χρόνια έναντι της σωματιδιακής θεωρίας μέχρι το 1801 οπότε ο Thomas Young έκανε μια σειρά πειραμάτων με τα οποία απέδειξε ότι υπό συνθήκες το φως συμβάλλει σαν να είναι κύμα. Το 1825 ο Fresnel με νέα πειράματα συμβολής διακρίνει ταυτόχρονα φαινόμενα περίθλασης ενισχύοντας σημαντικά την εγκυρότητα της κυματικής θεωρίας , παρέμενε όμως το ερώτημα του «μέσου» διάδοσης του φωτός . Ο Maxwell το 1873 υποστήριξε την ιδέα (ηλεκτρομαγνητική θεωρία) ότι το φως είναι ένα είδος ηλεκτρομαγνητικού κύματος δηλαδή κύμα ταυτόχρονης διάδοσης ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου χρονικά μεταβαλλόμενων με ταχύτητα σταθερή στο κενό

$$c = 3$$

10^8 m/s εξαρτώμενη από τις ιδιότητες του μέσου, διατυπώνοντας ταυτόχρονα τις γνωστές εξισώσεις του μαζί με την θεμελιώδη εξίσωση

$$c_o = \lambda_o \cdot f$$

Το 1887 ο Hertz επιβεβαιώνει πειραματικά, ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συμπεριφέρονται όπως και το φως, δηλαδή ανακλώνται, διαθλώνται συμβάλλουν, δημιουργούν φαινόμενα περίθλασης και διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα ανακαλύπτοντας επίσης το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Το 1905 ο Einstein ερμήνευσε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιώντας την έννοια των «κβάντων» φωτός που διατύπωσε το 1900 ο Planck, επαναφέροντας έτσι στο προσκήνιο τη σωματιδιακή θεωρία του φωτός, κάτω όμως από ένα εντελώς νέο και διαφορετικό πρίσμα. Εκείνο της εξίσωσης

$$E = hf$$

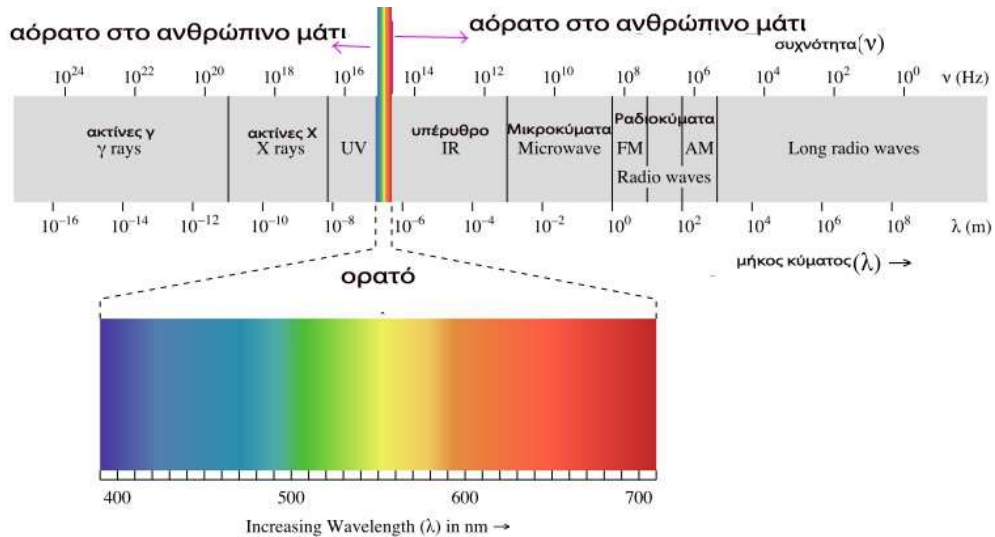
Όπου h μία σταθερά που έχει τιμή $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ και ονομάζεται σταθερά του Planck. Το «φωτόνιο» είναι πλέον γεγονός.

Το φως λοιπόν έχει διπλή υπόσταση. Άλλες φορές συμπεριφέρεται ως κύμα, ενώ άλλες ως σωματίδιο. Η κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία ερμηνεύει την διάδοση, τη συμβολή και την περίθλαση του, ενώ η σωματιδιακή θεωρία ερμηνεύει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο καθώς και πειραματικά δεδομένα όπως το φαινόμενο Compton που σχετίζονται με τις αντιδράσεις του φωτός με την ύλη. Η δε φυσική θεωρία που περιγράφει όλα αυτά τα φαινόμενα είναι η κβαντική Ηλεκτροδυναμική.

Το οριζόμενο ως «Φως» στην καθημερινότητά μας είναι το συνεχές μέρος (φάσμα) της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο μέσω της όρασης του (εικόνα). Το φάσμα αυτό εκτείνεται από 400 – 700 nm σε όρους

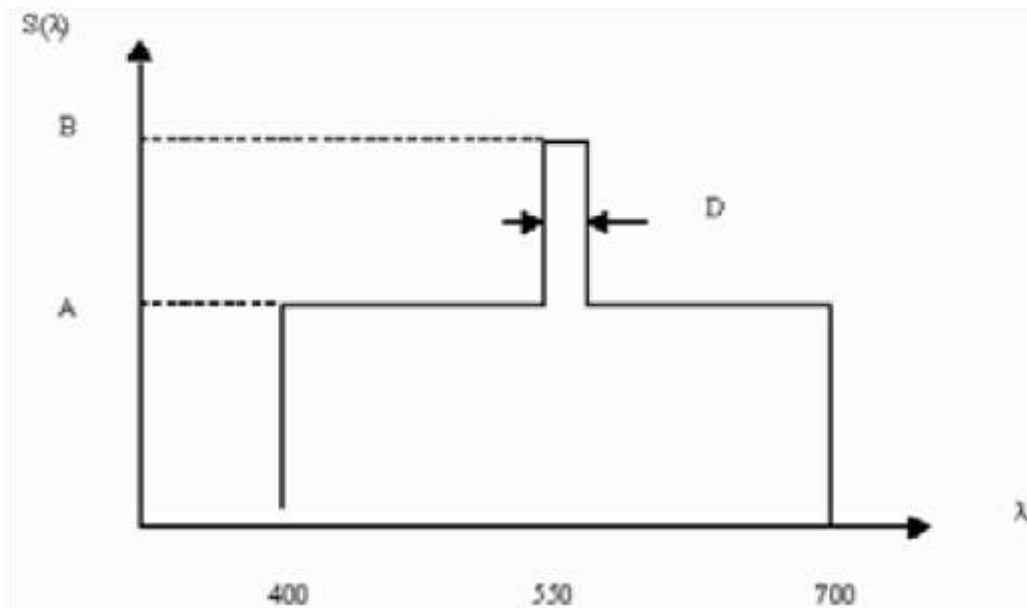
μήκους κύματος ή $7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ σε όρους συχνότητας
 (μέσω της γνωστής σχέσης

$$c_0 = \lambda_0 \cdot f$$



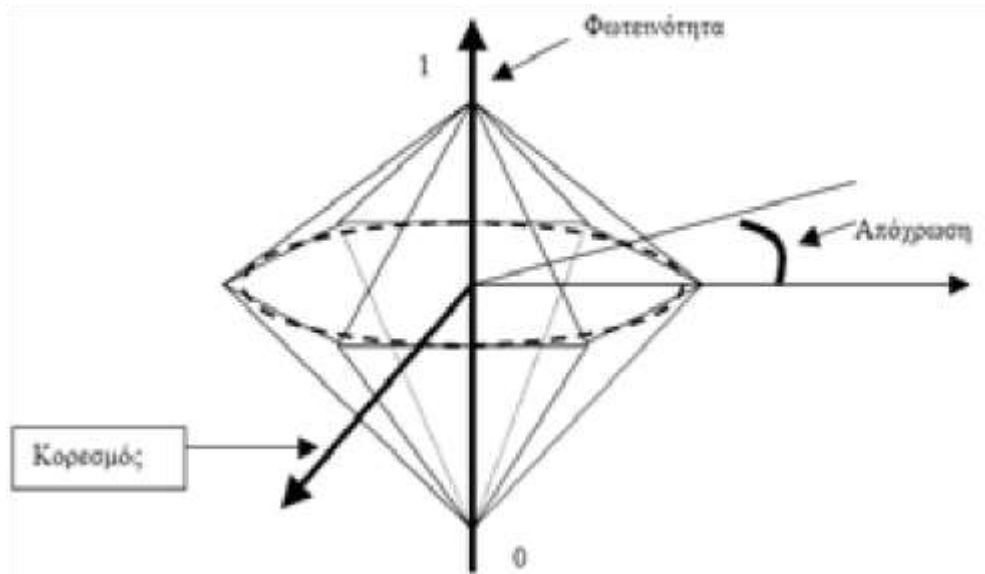
Εικόνα 1: Φάσμα φωτός.

Το φως που εκπέμπεται από διάφορες φωτεινές πηγές περιέχει ένα μίγμα από μήκη κύματος τα οποία περιγράφονται με την απεικόνιση της φασματικής πυκνότητας τους (**spectral density $S(\lambda)$**) σε κατάλληλα διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά απεικονίζουν την ισχύ που έχει κάθε μήκος κύματος στο εκπεμπόμενο φως. Το σχήμα 1 περιγράφει τη φασματική πυκνότητα μιας πρασινωπής πηγής φωτός .



Σχήμα 1 : φασματική πυκνότητα μιας πρασινωπής πηγής φωτός.

Η φασματική πυκνότητα του συγκεκριμένου παραδείγματος παρατηρούμε ότι εμφανίζει ένα μέγιστο για μήκη κύματος περίπου 550 nm. Το μέγιστο αυτό ονομάζεται δεσπόζων μήκος κύματος (**dominant wavelength**) και καθορίζει και τη χροιά (**hue**) του χρώματος που εκπέμπεται από μια πηγή. Για παράδειγμα η συγκεκριμένη πηγή θα έχει πράσινο χρώμα. Επιπρόσθετα, στο συγκεκριμένο παράδειγμα εμφανίζεται και μια ποσότητα λευκού φωτός η οποία μειώνει τον κορεσμό (**saturation**) του πράσινου και το ξανοίγει. Η συνολική ισχύς του εκπεμπόμενου φωτός μας δίνεται από το εμβαδόν της καμπύλης της φασματικής πυκνότητας του. Η ισχύς αυτή ονομάζεται φωτεινότητα (**luminance**). Ο κορεσμός ή καθαρότητα (**purity**) του φωτός μετρά το ποσοστό της φωτεινότητας που περιέχεται στο κύριο μήκος κύματος (σχήμα 2)



Σχήμα 2: Χαρακτηριστικά μεγέθη του φωτός .

1.2 Το χρώμα

Το χρώμα είναι σημαντικός περιγραφικός παράγων αναγνώρισης αντικειμένων και διάκρισης περιοχών του περιβάλλοντος που ζεί ο άνθρωπος. Μπορούμε να διακρίνουμε χιλιάδες διαφορετικές αποχρώσεις και εντάσεις χρωμάτων, ενώ αντιθέτως από τις αποχρώσεις του γκρι μόνο 20-30. Περίπου το 65% των αισθητήρων (κωνίων) στο ανθρώπινο μάτι είναι ευαίσθητοι στο κόκκινο, 33% στο πράσινο και μόνο το 2% στο μπλε.

1.2.1 Χαρακτηριστικά του χρώματος.

Ακτινοβολία (Radiance) .Είναι το συνολικό ποσό ενέργειας που εκπέμπεται από την πηγή φωτός και μετριέται σε Watts.

Φωτεινότητα (Luminance). Είναι το ποσό της ενέργειας που φτάνει στον παρατηρητή. Μετράται σε lumens (lm).

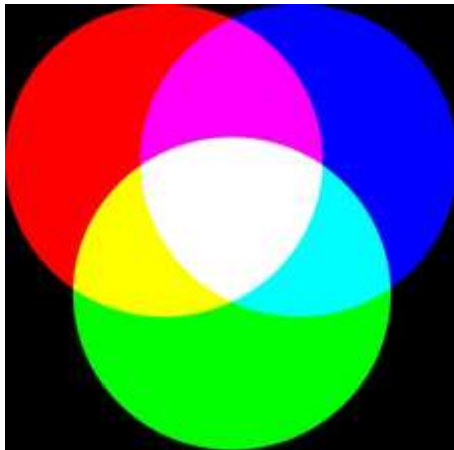
Λαμπρότητα (Brightness) .Είναι υποκειμενικός παράγοντας ,περιέχει το στοιχείο της έντασης της φωτεινότητας (Intensity), που είναι αχρωματικός παράγων και μετριέται με την κλίμακα του γκρι.

Απόχρωση ή χροιά (Hue). Υποκειμενικός παράγων ο οποίος αντιπροσωπεύει το επικρατέστερο χρώμα έτσι όπως το αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής.

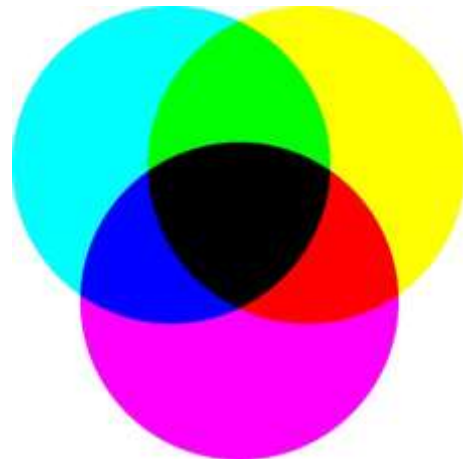
Καθαρότητα ή κορεσμός (Saturation).αναφέρεται στην καθαρότητα του χρώματος, σε σχέση με την «ποσότητα» άσπρου φωτός με το οποίο αναμειγνύεται (τα καθαρά χρώματα είναι πλήρως κορεσμένα και έτσι μιλάμε για ξεθωριασμένα χρώματα κατά περίπτωση), (βλέπε και πάλι σχήμα 2).

1.2.2 Κατηγοριοποίηση

Βασικά είναι τα χρώματα που προστιθέμενα δίνουν το λευκό. Αυτά είναι τα μπλέ (Blue), πράσινο(Green),κόκκινο(Red).



Εικόνα 2: βασικά χρώματα



Εικόνα 3 : συμπληρωματικά χρώματα

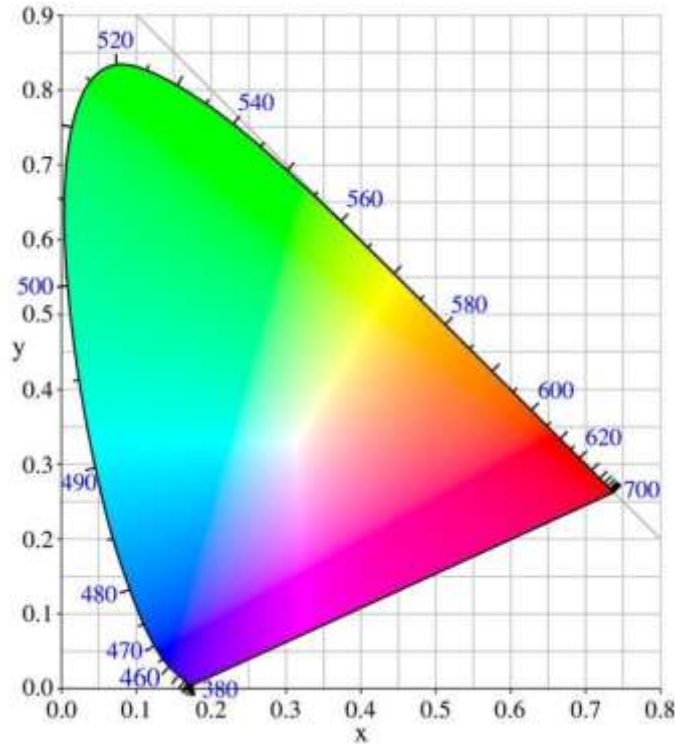
Συνδυασμός των βασικών χρωμάτων ανά δύο δίνει τα συμπληρωματικά χρώματα

(εικόνα 2). Έτσι κόκκινο + μπλέ = μωβ (Magenta), κόκκινο + πράσινο = κίτρινο (Yellow), πράσινο + μπλε = κυανό (Cyan). Τα συμπληρωματικά χρώματα προστιθέμενα μαζί δίνουν μαύρο (δηλαδή ανυπαρξία φωτός) και ανά δύο το βασικό τους δηλαδή κίτρινο + κυανό = πράσινο, κίτρινο + μωβ = κόκκινο, κυανό + μωβ = μπλέ (εικόνα 3).

1.2.3 Χρωματικά Μοντέλα

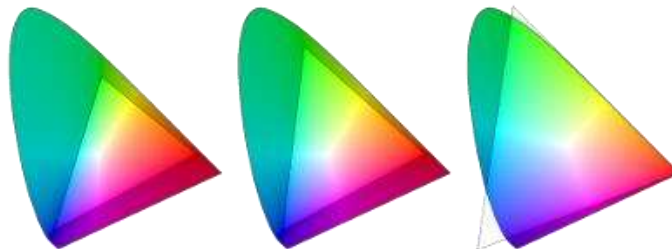
Ονομάζουμε ένα καθορισμένο φάσμα χρωμάτων αντιληπτό από τον άνθρωπο «χρωματικό χώρο ή διάστημα».

Η **Commission internationale de l'éclairage** ή **αγγλικά International Commission on Illumination (CIE)** ιδρύθηκε το 1913 σαν ένας διεθνώς αναγνωρισμένος οργανισμός ο οποίος θα ασχολείτο με την ανάπτυξη και την ανταλλαγή ιδεών και πληροφοριών που αφορούν τα χρώματα και ειδικότερα τις εφαρμογές των χρωμάτων. Στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων αυτού του οργανισμού αναπτύχθηκαν κάποια χρωματικά μοντέλα με αντικειμενικό στόχο τη δημιουργία ενός χρωματικού μοντέλου που να περιγράφει ικανοποιητικά το ορατό χρωματικό φάσμα. Έτσι το 1931 όρισε το παρακάτω (σχήμα 3) τρισδιάστατο χρωματικό διάγραμμα όπου $x=R$, $y=G$, $z=B$, $z=1-(x+y)$ και τα μήκη κύματος εκπεφρασμένα σε nm. Εμφανίζει την οπτική χρωματική απόκριση του ανθρώπου σε σχήμα πετάλου. Όπως θα δούμε όμως σε επόμενα κεφάλαια, το ανθρώπινο οπτικό σύστημα είναι εξαιρετικά σύνθετο και ανιχνεύει πολύ περισσότερες αποχρώσεις από τις προβλεπόμενες του διαγράμματος.



Σχήμα 3 : πρότυπο CIE 1931

Αυτό φαίνεται καθαρά όταν χρησιμοποιούμε διαφορετικούς χρωματικούς χώρους για την ανάλυση μας. Έτσι οι χώροι sRGB, AdobeRGB, ProPhotoRGB απεικονίζονται από λευκά τρίγωνα αντιστοίχως (εικόνα 4) .



Εικόνα 4 : sRGB, AdobeRGB, ProPhotoRGB

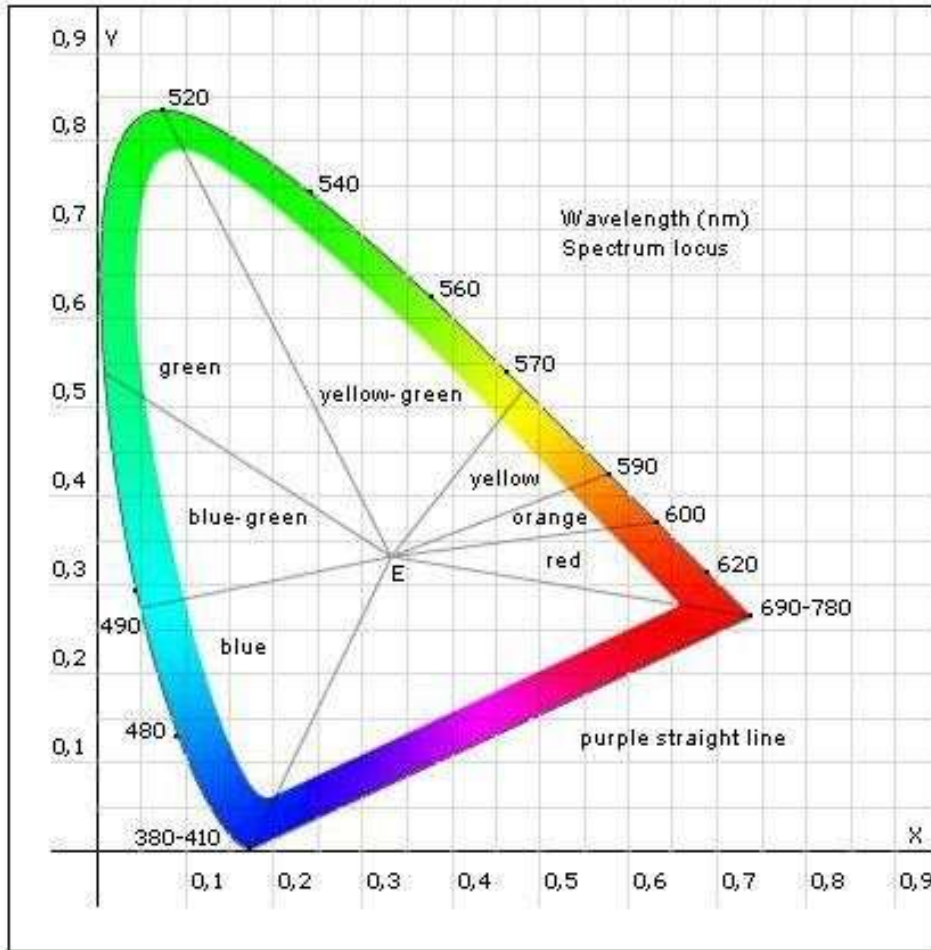
Το sRGB, είναι ο μικρότερος χώρος και μπορεί να κωδικοποιήσει το μικρότερο αριθμό χρωμάτων. Είναι μία προσέγγιση μίας οθόνης CRT δεκαετίας. Τώρα οι περισσότερες σύγχρονες οθόνες μπορούν εύκολα να εμφανίσουν περισσότερα χρώματα από αυτό. Το sRGB είναι ένα τυπικό πρότυπο και χρησιμοποιείται σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών (μεταξύ των οποίων και το Διαδίκτυο).

Το AdobeRGB χρησιμοποιείται συχνά ως *χώρος επεξεργασίας*. Μπορεί να κωδικοποιήσει περισσότερα χρώματα από το RGB και αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να προσαρμόσουμε πολύ καλύτερα (δηλαδή πολύ πλησιέστερα στην ανθρώπινη αντίληψη) τα χρώματα σε μια εφαρμογή (φωτογραφία) .

Το PhoPhoto είναι ο μεγαλύτερος χώρος που διατίθεται και χρησιμοποιείται συχνά για αρχειοθέτηση εγγράφων. Μπορεί να κωδικοποιήσει σχεδόν το πλήρες φάσμα χρωμάτων που ανιχνεύει το ανθρώπινο μάτι και επιπλέον μπορεί να κωδικοποιήσει χρώματα που το μάτι δεν ανιχνεύει!

Επανερχόμενοι στο πρότυπο CIE 1931 παρατηρούμε ότι κάθε σημείο στα όρια του διαγράμματος είναι απόλυτα καθαρό χρώμα, ενώ όσο προχωράμε προς το σημείο της ίσης ενέργειας (άσπρο) η καθαρότητα μειώνεται. Εάν ενώσουμε με ευθεία γραμμή δύο σημεία του διαγράμματος, τότε κάθε σημείο της γραμμής αντιστοιχεί σε μία ορισμένη μίξη των χρωμάτων που βρίσκονται στα άκρα της.

Αντίστοιχα ισχύουν και για το τρίγωνο που σχηματίζεται αν ενώσουμε τρία σημεία (μίξη των τριών χρωμάτων). (σχήμα 4)



Σχήμα 4 : Συνδυασμοί στο πρότυπο CIE 1931

Με βάση το παραπάνω πρότυπο έχουμε τα μοντέλα **κατάταξης χρώματος**. Αυτά είναι τα RGB , CMY, CMYK, Munsell, HSB. Όμως το χρώμα σύμφωνα με την ανθρώπινη αντίληψη δεν είναι απόλυτο ούτε σταθερό. Έτσι μέσω των μοντέλων **εμφάνισης χρώματος** HIS και CIE-lab εισάγονται νέες παράμετροι για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα αυτό. Ας δούμε το παρακάτω παράδειγμα (εικόνα 5 . Τα εσωτερικά τετράγωνα φαίνονται διαφορετικού χρώματος.

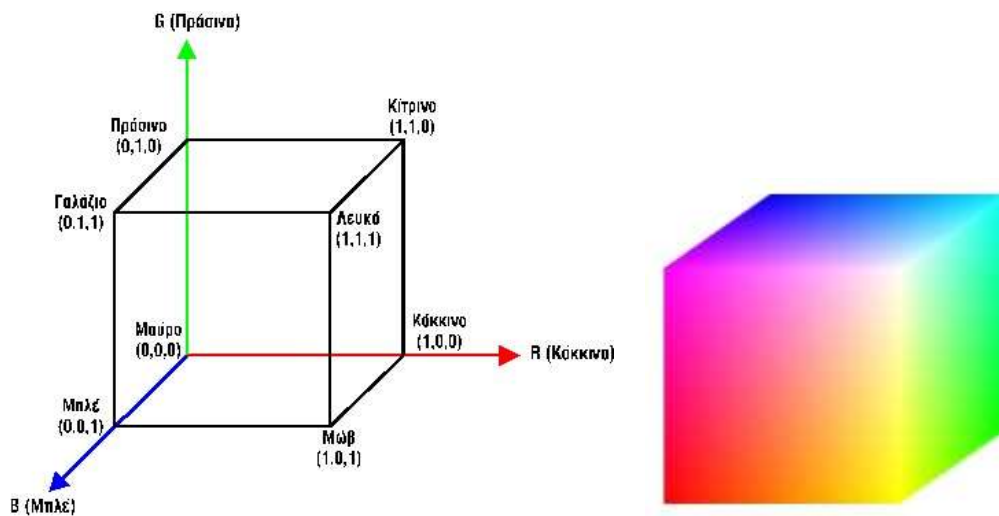


Εικόνα 5 : Πλάνη εγκεφάλου.

Στην πραγματικότητα έχουν όμως το ίδιο χρώμα. Ο εγκέφαλος μας ξεγελάστηκε από το χρώμα που τα περιβάλλει.

Το μοντέλο RGB (προσθετικό)

Στο RGB μοντέλο, τα χρώματα θεωρούνται προσμίξεις των βασικών χρωμάτων Κόκκινο, Πράσινο, Μπλε όπως τα είδαμε στην κατηγοριοποίηση. Το μοντέλο βασίζεται στο καρτεσιανό σύστημα και αναπαριστάται με τον λεγόμενο RGB κύβο. Χρησιμοποιείται στην απεικόνιση χρωμάτων στις οθόνες και γενικά στα συστήματα απεικόνισης όπως είδαμε πριν για τους χώρους sRGB, AdobeRGB, ProPhotoRGB καθώς και στις html εικόνες του διαδικτύου (σχήμα 5), (εικόνες 6,7).



Σχήμα 5

Κάθε εικόνα αποτελείται από 3 υποεικόνες, μία για κάθε βασικό χρώμα



Εικόνα 6 : πραγματική



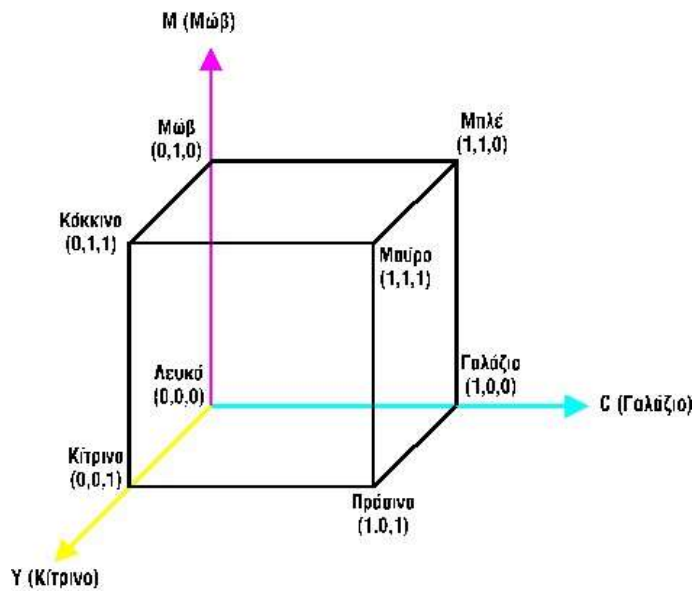
Εικόνα 7 : υποεικόνες κόκκινου, πράσινου, μπλέ

Το μοντέλο CMY – CMYK (αφαιρετικό)

Στο CMY μοντέλο, τα χρώματα θεωρούνται προσμίξεις των συμπληρωματικών χρωμάτων Κυανό, Μωβ, Κίτρινο που είδαμε στη κατηγοριοποίηση.

Χρησιμοποιείται στις εκτυπωτικές μηχανές διότι αντιθέτως με το μοντέλο RGB που προϋποθέτει φωτεινή πηγή, το μοντέλο αυτό βασίζεται στη λογική της απορρόφησης του φωτός από την τυπωμένη μελάνη των τριών συμπληρωματικών χρωμάτων δηλαδή με αφαιρετικό τρόπο. Προστίθεται συνήθως και το μαύρο χρώμα (CMY-K) για καλύτερα οπτικά αποτελέσματα. Αναλυτικότερα, πολλές φορές παρατηρούμε ότι όταν τυπώνουμε μια έγχρωμη εικόνα από τον υπολογιστή, η εικόνα που τυπώνεται αποκλίνει χρωματικά σε πολλά σημεία από αυτή που βλέπουμε στον υπολογιστή. Κι αυτό γιατί δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εκτύπωση μελάνια των τριών αυτών χρωμάτων (κόκκινο, πράσινο, μπλε). Η επικάλυψη δύο και μόνο εξ αυτών δημιουργεί μαύρο. Να γιατί χρειάζεται διαφορετική προσέγγιση με το σύστημα CMY που είναι συμπληρωματικό μοντέλο του RGB. Τεχνικά κάτι τέτοιο όμως δεν είναι εφικτό γιατί οι τεχνολογίες εκτύπωσης δεν μπορούν εύκολα να δώσουν απόλυτα καθαρά μελάνια CYAN, MAGENTA και YELLOW (υπάρχουν ελάχιστες αποκλίσεις). Έτσι στις συσκευές εκτύπωσης προστίθεται και μαύρο μελάνι και προκύπτει το μοντέλο τετραχρωμίας CMYK (Cyan,Magenta,Yellow,Black) ώστε να είναι δυνατή η εκτύπωση του

απόλυτου μαύρου. (σχήμα 6), (εικόνες 8,9)



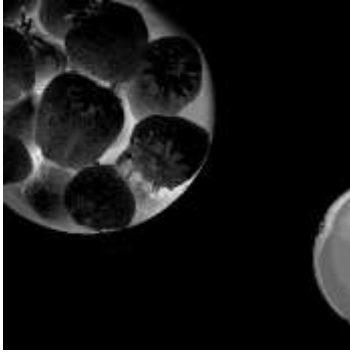
Σχήμα 6

Η εικόνα στην περίπτωση αυτή αποτελείται από 4 υποεικόνες.



Εικόνα 8 : Πραγματική





Εικόνα 9 : υποεικόνες , κυανού, μωβ, κίτρινου, μαύρου

Η μετατροπή μεταξύ των δύο μοντέλων γίνεται ως εξής:

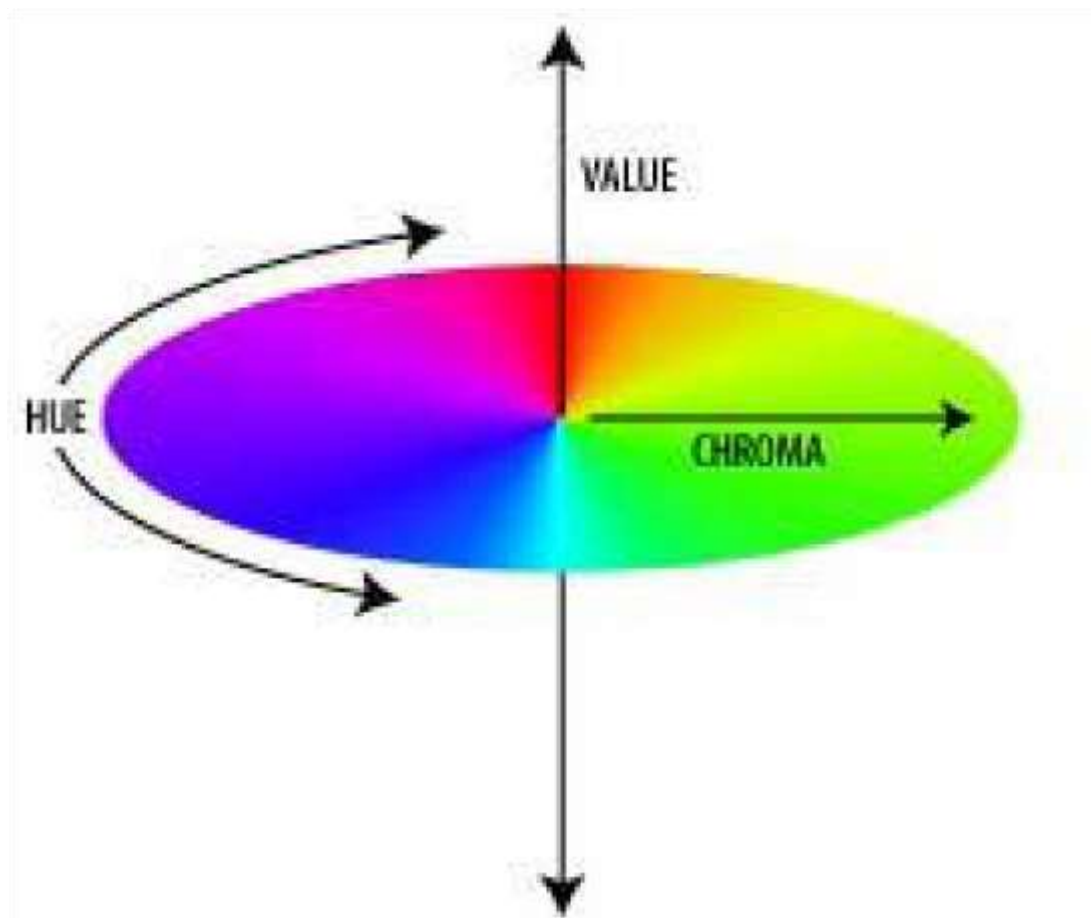
Τα δύο μοντέλα συνδέονται με τη λογική σχέση

$$\begin{aligned}
 & C \cup I \cup R \\
 & M \cup 1 \cup G \\
 & Y \cup 1 \cup B
 \end{aligned}$$

Και στηρίζουν όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο της θεωρία της τριχρωματικής όρασης και αντίληψης.

Το μοντέλο MUNSELL

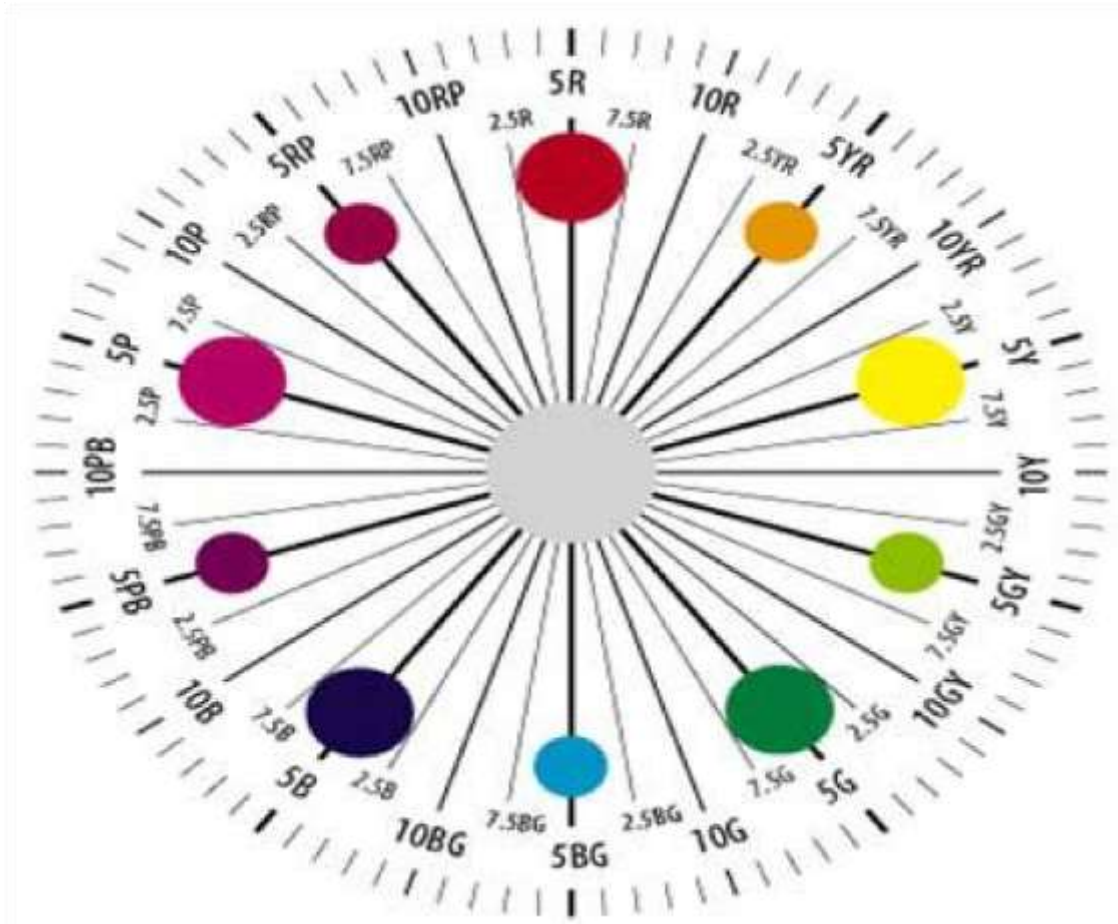
Ένα από τα δημοφιλέστερα χρωματικά μοντέλα το οποίο αναπτύχθηκε από τον Albert Munsell το 1898. Ο Munsell θέλησε να περιγράψει τα χρώματα με έναν ορθολογικό τρόπο. Έτσι δημιούργησε έναν χρωματικό δίσκο (τροχό) με τρεις μεταβλητές που ονόμασε κανάλια (εικόνα 10) . Την “**Χροιά**” (Hue) την “**Τιμή**” (Value) και το “**Χρώμα**” (Chroma).



Εικόνα 10 : μοντέλο Munsell.

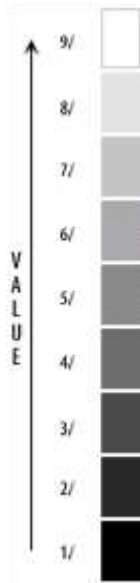
Η “**Χροιά**” είναι ένας δείκτης χρώματος που διατρέχει μια σειρά χρωμάτων στην περιφέρεια του δίσκου (εικόνα 11). Αποτελεί το ποιοτικό μέτρο διαχωρισμού του ενός χρώματος από το άλλο. Αποτελείται από πέντε βασικά χρώματα: κόκκινο (R), κίτρινο (Y), πράσινο (G), μπλε (B), πορφυρό (P) και άλλα πέντε ενδιάμεσα χρώματα:

κίτρινο-κόκκινο (YR), πράσινο-κίτρινο (GY), μπλε-πράσινο (BG), πορφυρό-μπλε (PB) και κόκκινο-πορφυρό (RP).



Εικόνα 11 : Χροιά στο μοντέλο Munsell

Η “τιμή” του χρωματικού μοντέλου Munsell αναφέρεται στην φωτεινότητα του κάθε χρώματος και συνεπώς μεταβάλλεται μεταξύ μαύρου και άσπρου. Παίρνει συνολικά 9 τιμές φωτεινότητας μεταξύ μαύρου και άσπρου, όπου το 1 αντιστοιχεί στο μαύρο, το 9 στο λευκό και οι ενδιάμεσες τιμές προκύπτουν από την ανάμιξη του μαύρου και του άσπρου σε διάφορες αναλογίες (εικόνα 12) .

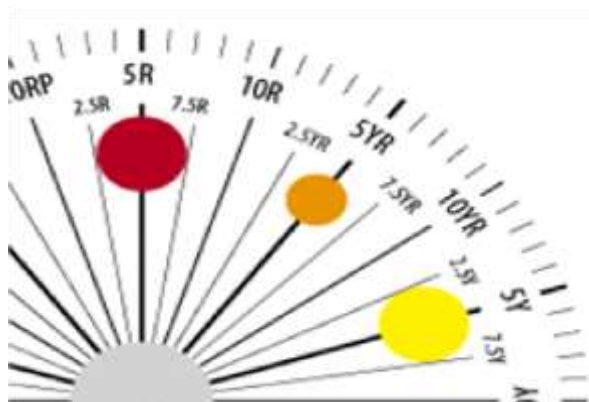


Εικόνα 12

Το “**Χρώμα**” είναι η ποιοτική μεταβλητή με βάση την οποία ξεχωρίζουμε την καθαρή χροιά (γεμάτο χρώμα) από την γκρι σκιά που υπάρχει σε κάθε χρώμα (ουσιαστικά η διαβάθμιση της φωτεινότητας κάθε χρώματος). Η μεταβλητή “**χρώμα**” παίρνει τιμές από το κέντρο του δίσκου προς την περιφέρειά του.



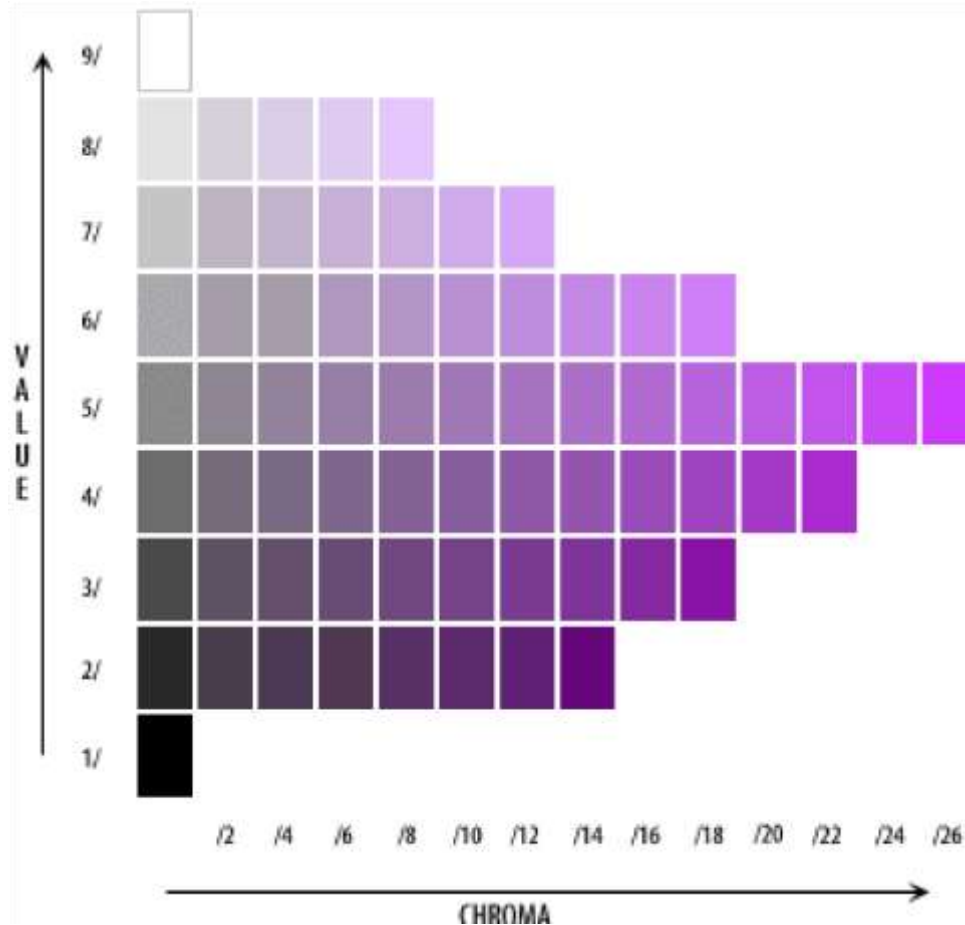
Το χρώμα που αντιστοιχεί σε χροιά 7.5YR (κίτρινο-κόκκινο), με τιμή 7, χρώμα 12, και συμβολίζεται ως: 7.5YR / 7 / 12 (εικόνα 13)



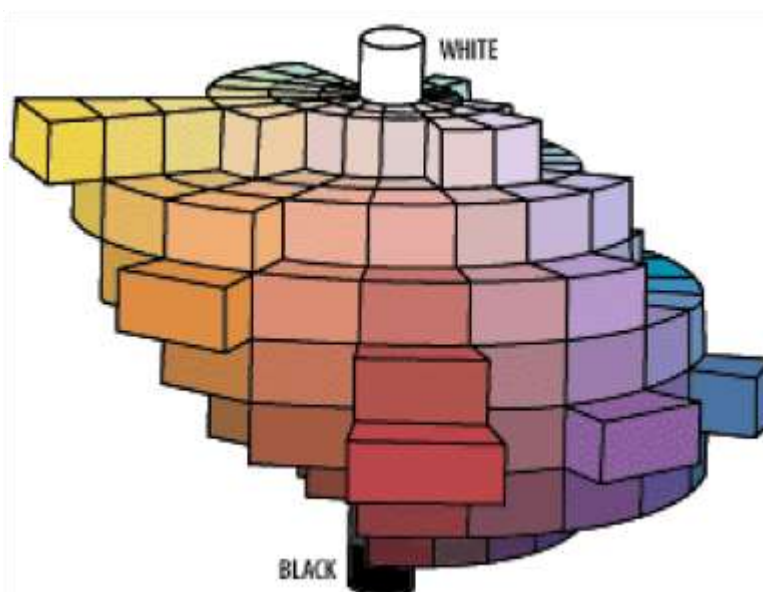
Εικόνα13 : παράδειγμα

Μια χαρακτηριστική ιδιότητα της μεταβλητής “χρώμα” είναι το ότι δεν είναι ομοιόμορφη για όλες τις “χρoιές” και τις “τιμές”. Ο Munsell παρατήρησε ότι το “χρώμα” μπορεί να “γεμίσει” για διαφορετικές “χρoιές” σε διαφορετικά σημεία πάνω στον δίσκο.

Παράδειγμα (εικόνα 14 και 15): Το χρώμα με χρoιά 5RP (κόκκινο-πορφυρό) “γεμίζει” όταν η “τιμή” και το “χρώμα” παίρνουν τιμές 5 και 26 (5/26)



Εικόνα 14 : παράδειγμα



Εικόνα 15 : παράδειγμα

Ενώ με βάση την αρχική δομή θα περιμέναμε η τρισδιάστατη αναπαράσταση να είναι μία σφαίρα τελικά δεν ισχύει αυτό (εικόνα 15).

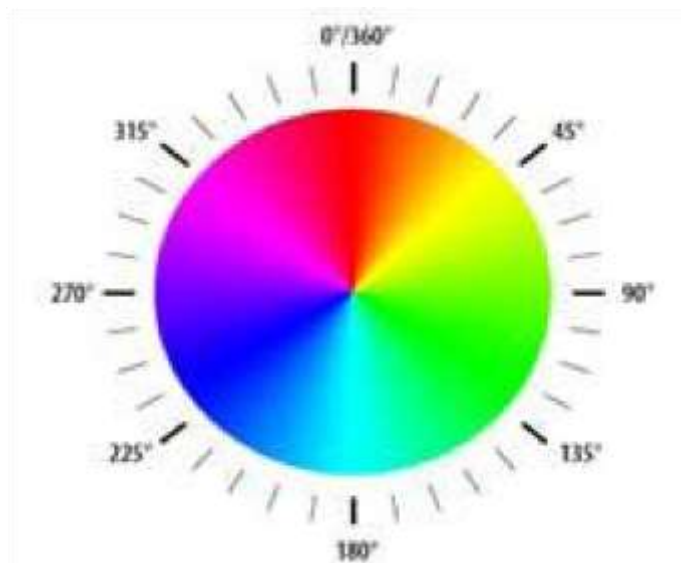
Το Μοντέλο HSB ή HSV

Το χρωματικό μοντέλο HSB (εικόνα 16) είναι παρόμοιο με το μοντέλο Munsell και περιγράφεται από 3 μεταβλητές ή κανάλια. Η αντιστοιχία μεταξύ των μεταβλητών των μοντέλων HSB και Munsell είναι ως εξής: **Χροιά (Hue)** του HSB = **Χροιά** του Munsell

Κορεσμός (Saturation) του HSB = **Χρώμα** του Munsell **Φωτεινότητα (Brightness)**) ή **Τιμή (Value)** του HSB = **Τιμή** του Munsell

Χροιά

Σε αντίθεση με τον δίσκο του μοντέλου Munsell, ο συμβατικός χρωματικός δίσκος διαιρείται σε μοίρες γωνιών (όπως και ο τριγωνομετρικός κύκλος) όπου κάθε χρώμα αντιστοιχίζεται σε μία συγκεκριμένη γωνία από 0ο έως 360ο (εικόνα).



Εικόνα 16 : Χρωματικό μοντέλο HSB.

Κορεσμός

Αναφέρεται στην καθαρότητα ενός χρώματος (εικόνα 17). Δίνει το επί τοις εκατό ποσοστό του γκρι σε σχέση με την χροιά, δηλ. 0% αντιστοιχεί στο γκρι και 100% αντιστοιχεί σε πλήρως κορεσμένο χρώμα.

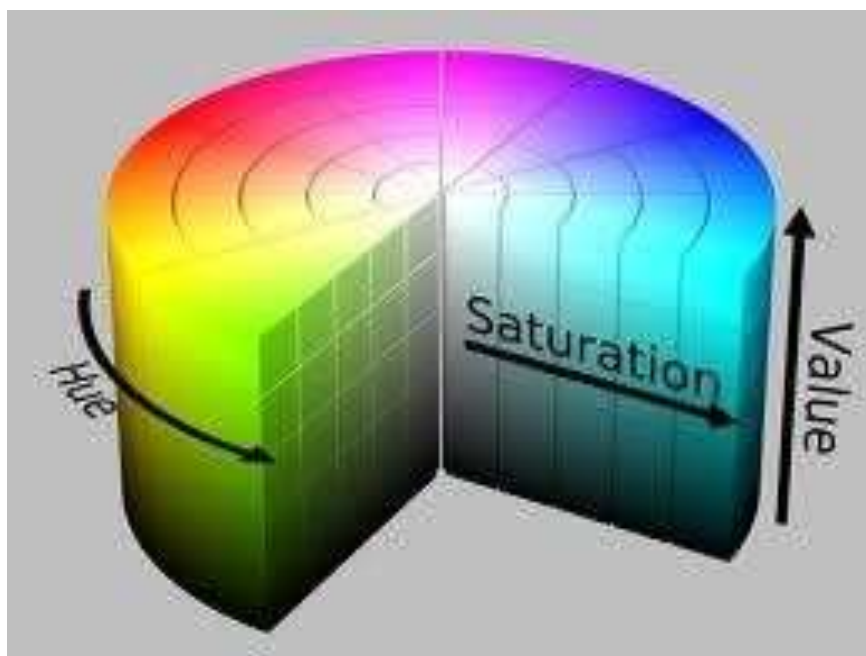


Εικόνα 17 : Η μεταβολή του “κορεσμού” για το μωβ χρώμα.

Φωτεινότητα

Είναι το ποσοστό φωτός ή σκιάς του κάθε χρώματος και μετράται σε επί τοις εκατό ποσοστά του λευκού χρώματος (0% σε μαύρο και 100% σε λευκό).

Η τρισδιάστατη αναπαράστασή του είναι κυλινδρική (εικόνα 18).

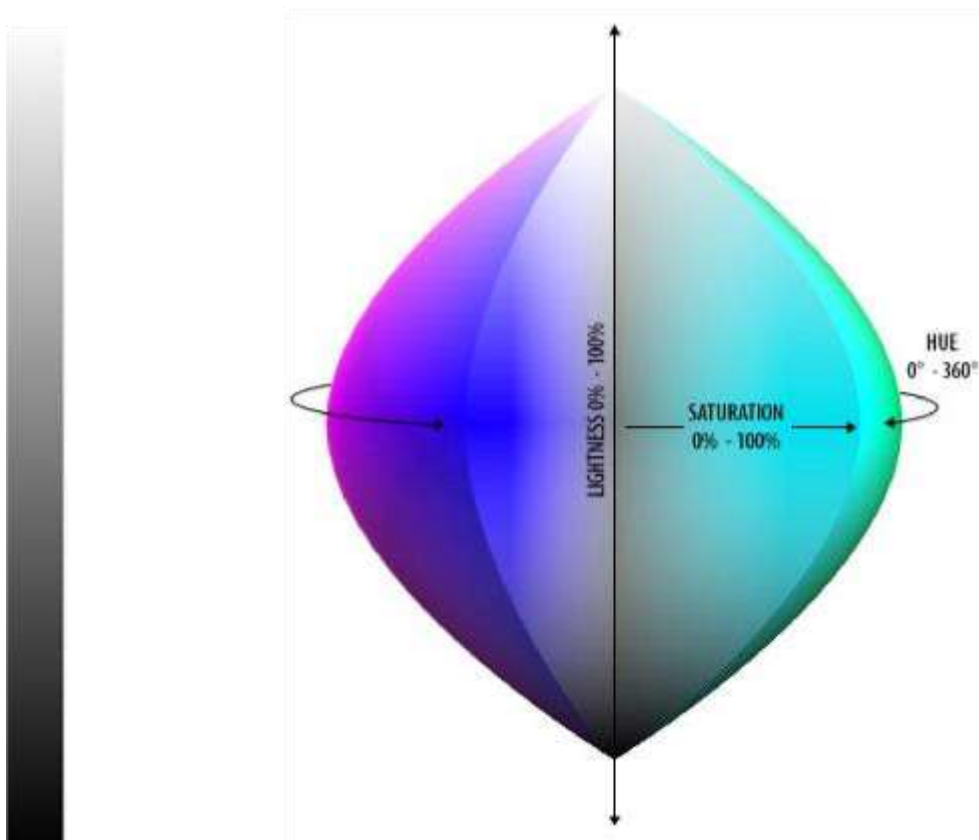


Εικόνα 18 : φωτεινότητα στο χρωματικό μοντέλο HSB.

Το μοντέλο HSI (HLS)

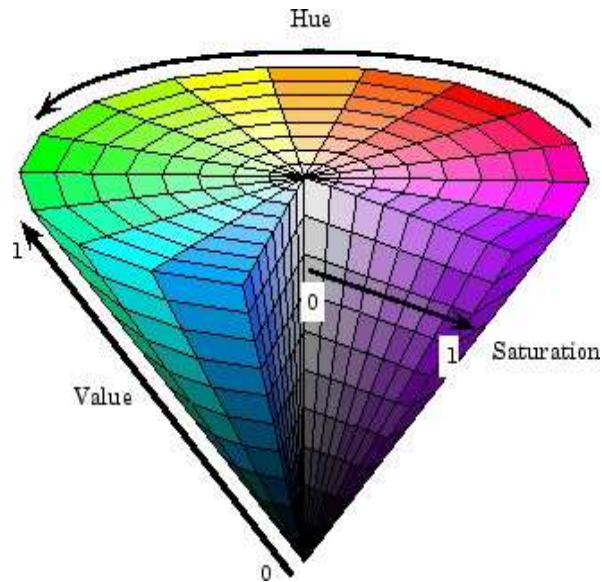
Στο HSI μοντέλο, τα χρώματα αναπαριστώνται από δύο χρωματικούς παράγοντες (Hue & Saturation) και την φωτεινότητα (Intensity). Χρησιμοποιείται για την περιγραφή των χρωμάτων με βάση την ανθρώπινη αντίληψη.

Η μεταβολή της φωτεινότητας (εικόνα 19)



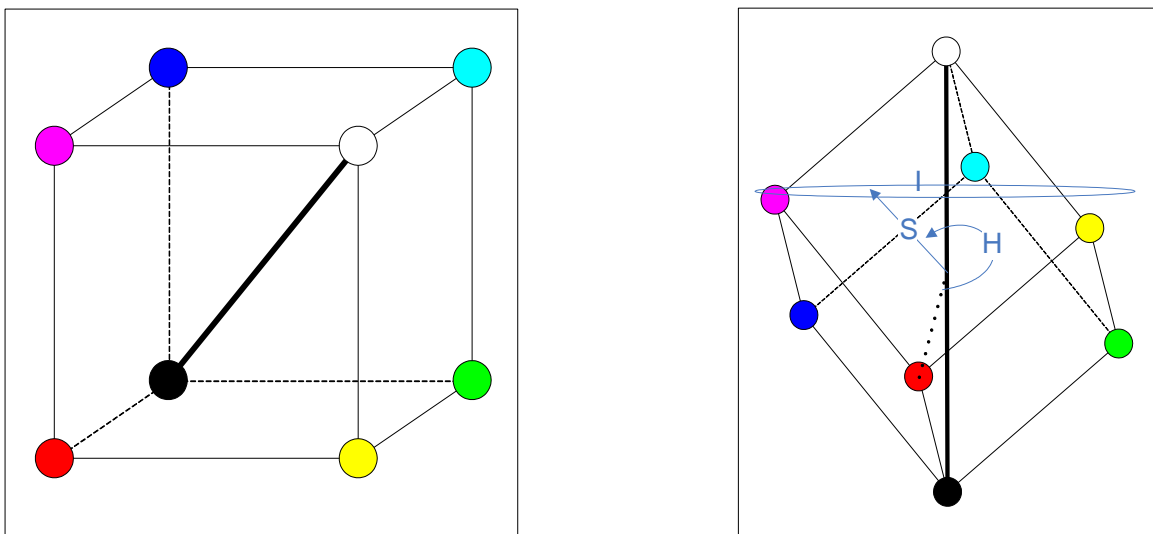
Εικόνα 19 : Φωτεινότητα στο μοντέλο HSI.

Η τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου είναι ο κώνος (Εικόνα 20)



Εικόνα 20 : Τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου HSI.

Μία πρακτική οπτική αναπαράσταση για το HSI σύστημα, επιτυγχάνεται εάν περιστρέψουμε τον RGB κύβο έτσι ώστε στον κάθετο άξονα να βρίσκεται η ευθεία που ενώνει τις γωνίες του μαύρου και του άσπρου (εικόνα 21).



Εικόνα 21 : Αναπαράσταση μοντέλου HIS.



Εικόνα 21 : παράδειγμα ανάλυσης εικόνας στο μοντέλο HIS.

Η πραγματική εικόνα στο μοντέλο αυτό αποτελείται από 3 υπο-εικόνες, μία για κάθε συνιστώσα απόχρωση, καθαρότητα ,ένταση (εικόνα 21).

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα σε γραφικά (computer graphics).

Πλεονεκτήματα

Καλή αποτύπωση χρωμάτων (αντίληψη): Σε κάθε χροιά, *ευρύτατη φωτεινότητα και κορεσμός.*

Μειονεκτήματα

Ευθέως ανάλογη του RGB, οπότε και πάλι εξαρτάται της συσκευής αποτύπωσης.

Μετατροπή από το μοντέλο RGB στο HSI

$$H = 360 \text{ εάνεάν } BB = GG$$

$$I = 13 R G B$$

$$S = \frac{1}{3} \left(\frac{R+G+B}{3} \right) \cos^{-1} \left(\frac{R-G}{R+G+B} \right) \sqrt{1 - \frac{R+G+B}{3}} \sqrt{1 - \frac{R-G}{R+G+B}} \sqrt{1 - \frac{R+G+B}{3}}$$

Αναπαράσταση της χρωματικής αντίληψης

Η αίσθηση του χρώματος οφείλεται στα κωνία του αμφιβληστροειδούς τα οποία είναι τριών ειδών με φάσματα απορρόφησης $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ και $S_3(\lambda)$ στις περιοχές «κίτρινο-πράσινο», «πράσινο» και «μπλε» αντίστοιχα.

- Peaks των $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ και $S_3(\lambda)$: 630nm, 560 nm, 450 nm

Οι αποκρίσεις των κωνίων σε φώς με χρωματικό περιεχόμενο $C(\lambda)$ δίνονται ως:

$$a_i(C) = \int S_i(\lambda) C(\lambda) d\lambda$$

$i = 1, 2, 3$

a_{\min}

Ίδιες φασματικές αποκρίσεις $a_i(C)$ σημαίνουν αντίληψη ίδιου χρώματος (ακόμη κι αν στην πραγματικότητα πρόκειται για διαφορετικό $C(\lambda)$)

Αναπαραγωγή χρώματος

Θεωρούμε τρεις βασικές πηγές φωτός με φασματικό περιεχόμενο $P_k(\lambda)$, $k=1, 2, 3$ και ενέργεια ίση με 1 η κάθε μία. Για να συνθέσουμε ένα χρώμα αναμιγνύουμε τα

$P_k(\lambda)$ με κατάλληλες αναλογίες β_k . Τότε η υπέρθεση που προκύπτει θα γίνεται αντιληπτή ως $C(\lambda)$, δηλαδή

$$C(\lambda) = \sum_{k=1}^3 \beta_k P_k(\lambda) S_i(\lambda) d$$

$$a_{ik} = \int_{\lambda} P_k(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda, i = 1, 2, 3$$

Η απόκριση του i -οστού είδους κωνίου στην φωτεινή πηγή τύπου k είναι:

$$a_{ik} = \int_{\lambda} P_k(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda, i, k = 1, 2, 3$$

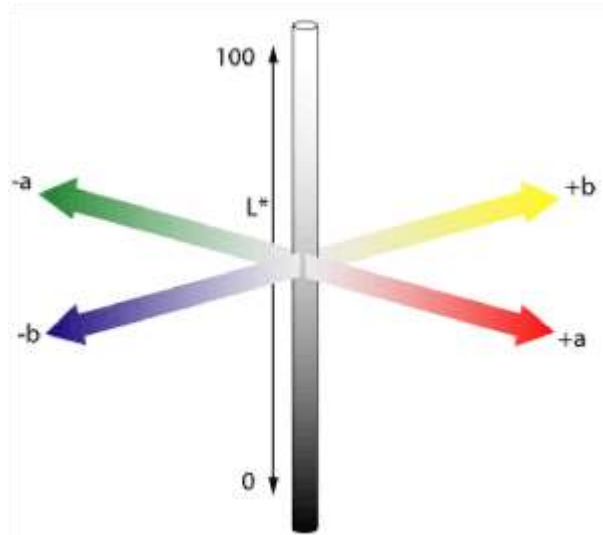
Οπότε προκύπτουν οι γνωστές ως *color matching equations* :

$$\sum_{k=1}^3 a_{ik} \beta_k = C(\lambda) S_i(\lambda) d, \quad i = 1, 2, 3$$

Για δεδομένα $C(\lambda)$, $P_k(\lambda)$ και $S_i(\lambda)$, οι ζητούμενες αναλογίες ανάμιξης β_k (τριχρωματικοί συντελεστές) βρίσκονται με λύση του παραπάνω συστήματος. Για να υπάρχει λύση και να είναι αποδεκτή πρέπει ο πίνακας να είναι αντιστρέψιμος και τα β_k να είναι μη αρνητικά

Το μοντέλο CIE-LAB

Καθορίζονται από τρεις συνιστώσες. **(L) φωτεινότητα**, η οποία κυμαίνεται από 0.0 για το μαύρο μέχρι το 100 για το άσπρο. **(A) η θέση** του χρώματος στον άξονα **πράσινου-κόκκινου**, για αρνητικές και θετικές τιμές, αντίστοιχα. **(B) η θέση** του χρώματος στον άξονα **μπλε-κίτρινου**, για αρνητικές και θετικές τιμές, αντίστοιχα (εικόνα 22)

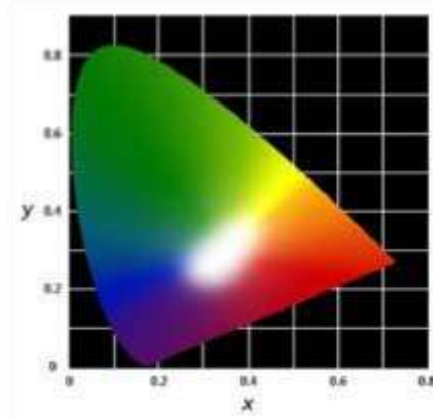


Εικόνα 22 :Χρωματικό μοντέλο CIE –LAB.

Κάθε χρώμα καθορίζεται στον τρισδιάστατο χώρο με συντεταγμένες (X,Y,Z). Το σύνολο των χρωμάτων δημιουργεί έτσι μια κωνική μορφή. Κανονικοποιώντας το χώρο, ορίζουμε το επίπεδο αναφοράς στα σημεία X=1, Y=1, Z=1, έτσι ο χρωματικός χώρος ορίζεται πλέον σε 2 διαστάσεις.

$$x = X / (X+Y+Z) \quad y = Y / (X+Y+Z)$$

Το χρωματικό φάσμα του μοντέλου προσδιορίζεται από την σχέση των μεταβλητών x και y. (σχήμα 7)



Χροιά
όμως)

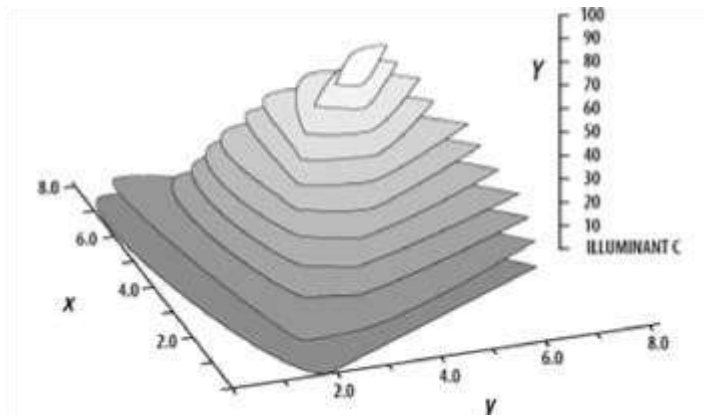
X -

Y -> Κορεσμός

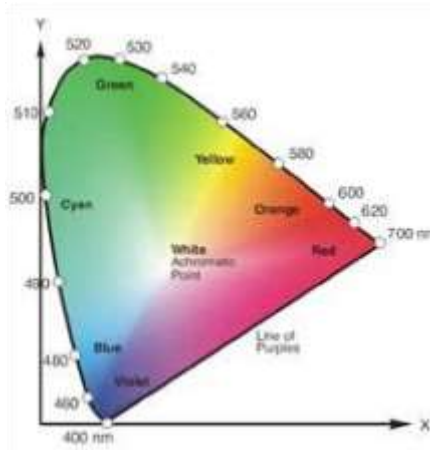
(Συνδυασμός

Σχήμα 7.

Οι σχέσεις φωτεινότητας των χρωμάτων δίνονται με την αλληλεπίδραση και των τριών μεταβλητών (σχήμα 8).

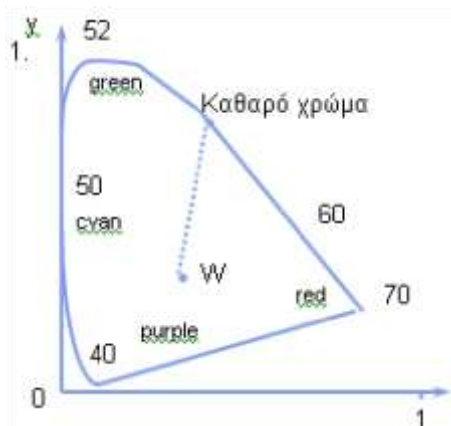


Σχήμα 8.



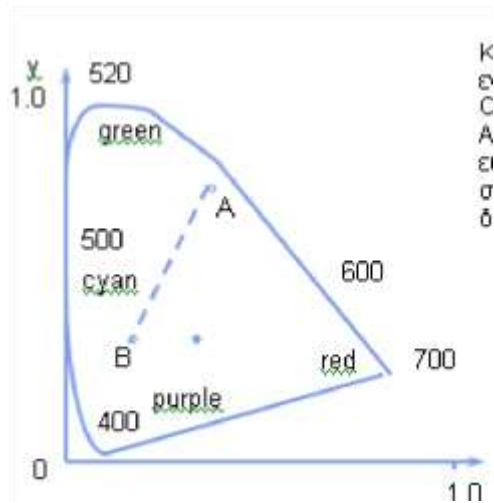
Σχήμα 9.

Χρώματα σε διδιάστατη προβολή . Καθαρά χρώματα στα όρια του «πετάλου» Άσπρο στο κέντρο. Οι άξονες είναι έξω από το «πέταλο»(σχήματα 9 και 10).



Σχήμα 10.

Μετακίνηση από το σημείο W στα όρια του «πετάλου» κάνει το χρώμα πιο κορεσμένο. Αντίθετα μετακίνηση από έξω προς τα μέσα κάνει ένα χρώμα να δείχνει πιο αδύνατο. ΠΡΟΣΟΧΗ!! Η φωτεινότητα δεν αλλοιώνεται (σχήμα 11).



Σχήμα 11.

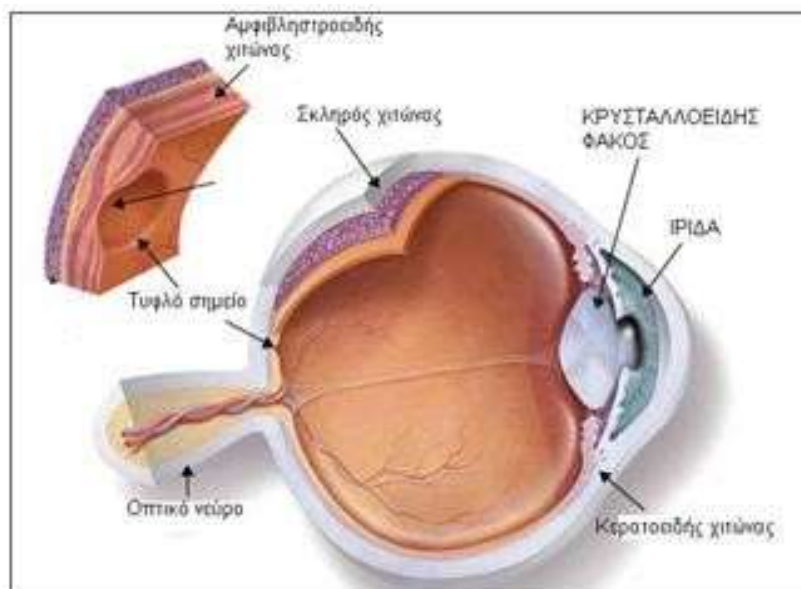
Κίνηση μεταξύ 2 σημείων εντός του «πετάλου». Ο συνδυασμός 2 χρωμάτων A και B, δίνεται από μια ευθεία γραμμή μεταξύ των σημείων A και B στο διάγραμμα του σχήματος .

Το χρωματικό φάσμα του CIE XYZ είναι κατά πολύ μεγαλύτερο του χρωματικού φάσματος του RGB. Η ταξινόμηση των χρωμάτων γίνεται στον δισδιάστατο χώρο x και y, ενώ στον τρισδιάστατο χώρο x y Y δίνονται οι σχέσεις φωτεινότητας των χρωμάτων. Περιγράφει κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό (περίπου 93%) το ορατό χρωματικό φάσμα. Είναι ανεξάρτητο από οποιαδήποτε συσκευή, από οποιαδήποτε πηγή φωτός ή αντικείμενου που εκπέμπει φως.

Κεφάλαιο 2 : Η ανθρώπινη όραση

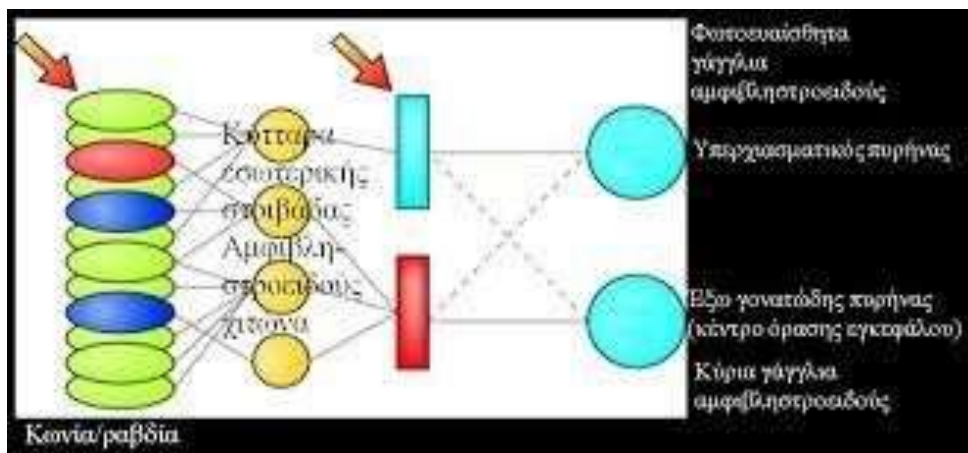
2.1 Λειτουργία

Η **ανθρώπινη όραση** – ίσως η βασικότερη από τις ανθρώπινες αισθήσεις – μας παρέχει το μεγαλύτερο μέρος (85%) πληροφοριών για τον κόσμο που μας περιβάλλει . Ο μηχανισμός που εξυπηρετεί τη διαδικασία αυτή είναι το οφθαλμικό σύστημα δηλαδή ο οφθαλμός (βολβός) , το οπτικό νεύρο και η περιοχή επεξεργασίας των σημάτων στον ανθρώπινο εγκέφαλο (οπτικός φλοιός). Η ανατομία του οφθαλμού καθορίζει σημαντικά την οπτική αντίληψη του ανθρώπου . Είναι σχεδόν σφαιρικός με διάμετρο 2 -2,5 εκατοστά προφυλαγμένος στην οφθαλμική κόγχη του κρανίου μας . Αποτελείται από τρεις ιστούς (χιτώνες) τον ινώδη , τον χοριοειδή και τον αμφιβληστροειδή. Το διάφανο μέρος του ινώδους χιτώνα , ο κερατοειδής, λόγω της κυρτότητας του παρέχει την οπτική ισχύ την οποία ρυθμίζει ο φακός αλλάζοντας το σχήμα του μέσω των μυών που τον περιβάλλουν. Έτσι δημιουργείται μία ανεστραμμένη εικόνα που προβάλλεται στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Η δακτυλιοειδής ίριδα αλλάζει με συσπάσεις το μέγεθός της αφήνοντας το κεντρικό της σημείο (κόρη) ανοιχτό με διάμετρο 2 έω 8 χιλιοστά ανάλογα τις συνθήκες φωτισμού του περιβάλλοντος, ρυθμίζοντας έτσι το επίπεδο της φωτεινότητας των αντικειμένων που βλέπουμε (εικόνα 23)



Εικόνα 23: Τομή οφθαλμού

Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας παραλαμβάνει το οπτικό ερέθισμα ως αντεστραμμένη εικόνα και το μετατρέπει (φωτομεταγωγή) μέσω των φωτοευαίσθητων κυττάρων που διαθέτει σε ηλεκτρικά ερεθίσματα τα οποία μεταβιβάζονται μέσω του οπτικού νεύρου στον εγκέφαλο και συγκεκριμένα κατ' αρχή στον έξω γονατώδη πυρήνα (LGN), στη συνέχεια στο κέντρο της όρασης (V1 πρωτοταγής οπτικός φλοιός) και τέλος σε ανώτερα κέντρα του εγκεφάλου για περαιτέρω επεξεργασία, αναγκαία για την αντίληψη (όπως στο V4 για την αποκωδικοποίηση του χρώματος, της μορφής και του σχήματος των εικόνων και στο V5 για τον προσανατολισμό, την κίνηση και το βάθος πεδίου των εικόνων), (εικόνα 24).



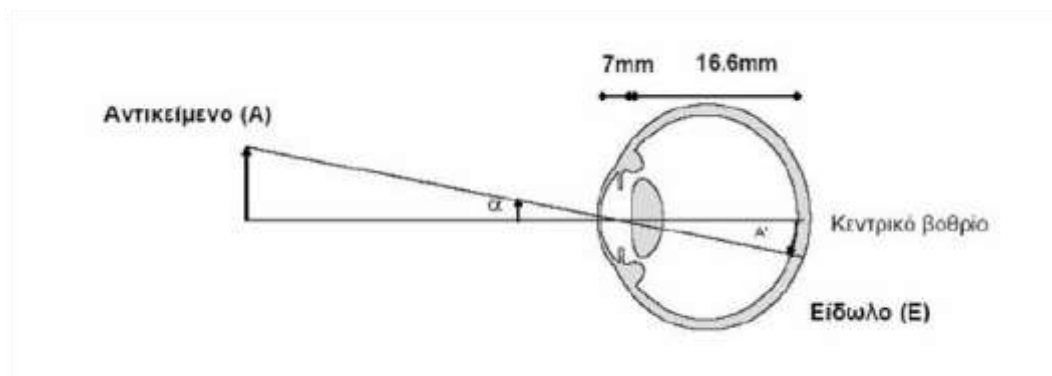
Εικόνα 24: Λειτουργία όρασης..

2.2 Διακριτική ικανότητα

Η ποιότητα του ειδώλου που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή (το φωτοευαίσθητο χιτώνα του οφθαλμού), ορίζεται από την **διακριτική ικανότητα** του οπτικού μας συστήματος και περιορίζεται από ανατομικούς και φυσιολογικούς παράγοντες.. Εξαρτάται από την πιθανή παρουσία οφθαλμικών σφαλμάτων (π.χ. μυωπία, υπερμετρωπία, αστιγματισμός) αλλά επίσης και οπτικών εκτροπών υψηλής τάξης (π.χ σφαιρική εκτροπή, κόμα), από το μέγεθος της κόρης του οφθαλμού (φαινόμενο περίθλασης), από τη χρωματική εκτροπή, τη σκέδαση και από τη σταθερότητα και ακρίβεια της προσαρμοστικής ικανότητας του φακού. Τέλος από τη φυσιολογία των φωτοευαίσθητων κυττάρων του αμφιβληστροειδούς και τη γενικότερη νευρωνική ανατομία αλλά και επεξεργασία στον εγκέφαλο.

Αναλυτικότερα ορίζουμε ως **διακριτική ικανότητα** του ανθρωπίνου οφθαλμού ή αλλιώς οπτική οξύτητα την ικανότητα του οφθαλμού να διακρίνει δύο σημεία στο περιβάλλον του σαν ξεχωριστά . Αντίστοιχα ορίζουμε ως **χωρική διακριτική ικανότητα** του ανθρωπίνου οφθαλμού την ικανότητα αντίληψης , αναγνώρισης και διάκρισης της μικρότερης χωρικής (π.χ γράμματος ή αριθμού σε ένα κείμενο) λεπτομέρειας μίας προσλαμβάνουσας εικόνας του περιβάλλοντός του.

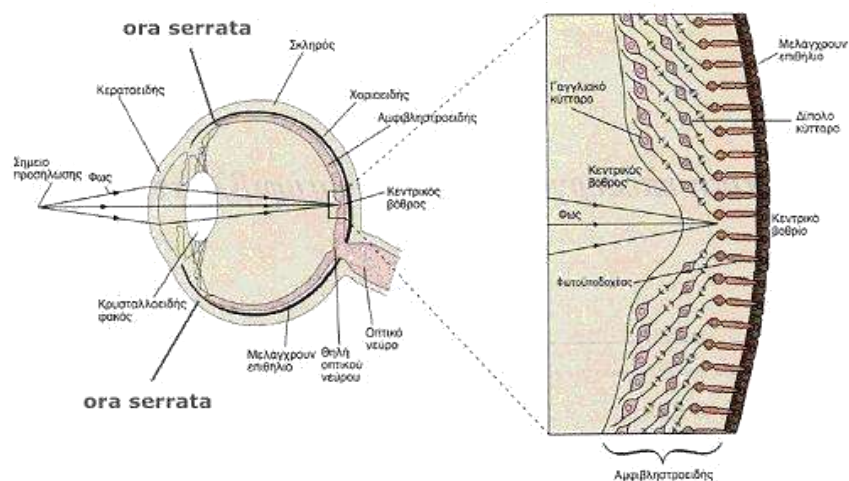
Κατηγοριοποιούμε σε Ανίχνευση (το πιο μικρό μέγεθος σημείου που μπορούμε να αντιληφθούμε) , Αναγνώριση (γράμματα –αριθμοί ,σχέση με την οπτική οξύτητα), Επιλογή (όταν η επιλογή του σημείου εστίασης επηρεάζει την οπτική οξύτητα) , Hyperactivity (όταν η οπτική οξύτητα ξεπερνά τα διαθλαστικά δεδομένα του οφθαλμού καθώς και τα δεδομένα του αμφιβληστροειδούς. Θεωρείται ψυχοφυσική διαδικασία όπου ο εγκέφαλος επεξεργάζεται στοιχεία από όλες τις αισθήσεις με εντυπωσιακά αποτελέσματα π.χ οι χιλιάδες αποχρώσεις που μπορεί να αναγνωρίσει ο άνθρωπος ή οι πληροφορίες από την γραφή Braille για ένα τυφλό άτομο.) Τα βασικά μεγέθη που συνδέονται με τον προσδιορισμό των ανωτέρω είναι η ελάχιστη γωνία ευκρίνειας (MAR – minimum angle of resolution) δηλαδή η μικρότερη γωνία που επιτρέπει να παρατηρούνται ως ξεχωριστά δύο σημεία και η οπτική γωνία (VA – visual angle) η οποία συνδέει το μέγεθος των παρατηρούμενων αντικειμένων με την απόστασή τους από τον οφθαλμό (σχήμα 12).



Σχήμα 12 : Σχηματισμός ειδώλου στον οφθαλμό.

2.3 Ο αμφιβληστροειδής

Διακρίνουμε (εικόνα 25) βασικές περιοχές του αμφιβληστροειδούς με διαφορετική λειτουργικότητα καθώς και δύο είδη φωτοευαίσθητων κυττάρων επιπλέον των ενδιάμεσων νευρώνων (δίπολα κύτταρα, οριζόντια κύτταρα, βραχύινα κύτταρα) και των γαγγλιακών κυττάρων. Η ωχρά κηλίδα (σημείο οξύτερης όρασης) με διάμετρο 5 χιλιοστά ή 17ο του οπτικού πεδίου και μέσα σε αυτή το βοθρίο με διάμετρο 1,5 χιλιοστά ή 5ο του οπτικού πεδίου του οποίου το κεντρικό του σημείο (κεντρικό βοθρίο), 1ο του οπτικού πεδίου, δεν περιέχει καθόλου ραβδία. Οι παραπάνω αυτές περιοχές δεν ευρίσκονται πάνω στον οπτικό άξονα του οφθαλμού αλλά μετατοπισμένες 4ο προς τη μία πλευρά. Αντίστοιχα 10ο από την άλλη πλευρά βρίσκεται η περιοχή του τυφλού σημείου ή οπτικής θηλής (σημείο απόλυτης έλλειψης ευαισθησίας στο φως) με διάμετρο 4,5 χιλιοστά ή 11ο του οπτικού πεδίου, γιατί από εκεί ακριβώς περνά η δέσμη των οπτικών νεύρων του αμφιβληστροειδούς στο δρόμο προς τον εγκέφαλο. Μία ακόμη περιοχή σημασίας είναι το κίτρινο σημείο της ωχράς κηλίδας που προστατεύει τον αμφιβληστροειδή από έκθεση σε φως πολύ μικρού μήκους κύματος. Τα φωτοευαίσθητα κύτταρα ή φωτοϋποδοχείς είναι α) τα ραβδία που αριθμούν περίπου 120 εκατομμύρια κατανεμημένα σε όλη την επιφάνεια του αμφιβληστροειδούς και είναι υπεύθυνα για την όραση σε συνθήκες χαμηλού και έως σκότους φωτισμού και β) τα κωνία που αριθμούν περίπου 7 εκατομμύρια κατανεμημένα μόνο στη περιοχή της ωχράς κηλίδας και είναι υπεύθυνα για την όραση σε συνθήκες κανονικού φωτισμού (ημέρας) και επίσης για την αντίληψη των χρωμάτων αφού είναι τριών επιμέρους ειδών (για το μπλέ, πράσινο, και κόκκινο αντίστοιχα μέρος του φάσματος του φωτός). Τα Δίπολα και οριζόντια κύτταρα αποκαλούνται διπολικά επειδή παρουσιάζουν δύο σημεία σύνδεσης (πόλους). Η μία σύνδεση πραγματοποιείται με το φωτοϋποδοχέα και η άλλη με ένα γαγγλιακό κύτταρο. Ορισμένα δίπολα έρχονται σε επαφή μόνο με κωνία (cone bipolars) και άλλα μόνο με ραβδία (rod bipolars). Αν και ορισμένα κωνιο-δίπολα (κυρίως στο κέντρο του αμφιβληστροειδή) έρχονται σε άμεση επαφή με μόνο ένα κωνίο, είναι πιθανό να δέχονται και έμμεσες πληροφορίες από άλλα κωνία (μέσω των οριζόντιων κυττάρων ή συνάψεων των φωτοϋποδοχέων με άλλους φωτοϋποδοχείς). Σε αντίθεση, κάθε ραβδίο έρχεται σε επαφή με 2 έως 5 ραβδιο-δίπολα,



Εικόνα 25 : Οριζόντια τομή οφθαλμικού βολβού και θέση του αμφιβληστροειδή σε αυτόν (αριστερά), λειτουργικές κατηγορίες νευρώνων (δεξιά).

ενώ κάθε ραβδιο-δίπολο δέχεται πληροφορίες από 30 έως 50 διαφορετικά ραβδία. Αν και τα δίπολα κύτταρα μεταβιβάζουν τις πληροφορίες κατακόρυφα στην οπτική οδό (vertical pathway), τα οριζόντια κύτταρα μεταβιβάζουν τις πληροφορίες πλαγίως (lateral pathway).

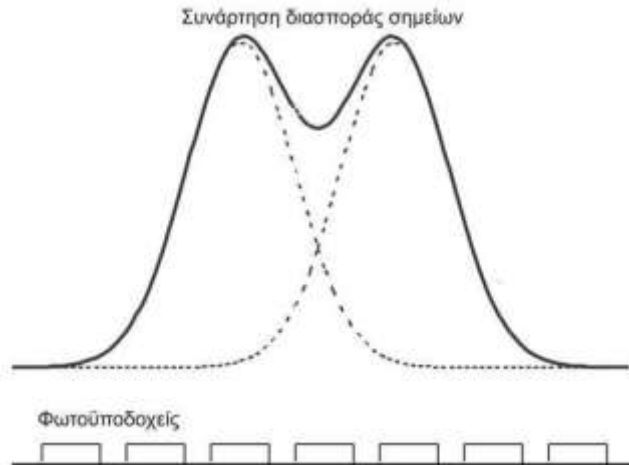
Τα Αμακρίνια ή βραχύνια κύτταρα αποτελούν μια ξεχωριστή ομάδα κυττάρων στον αμφιβληστροειδή. Υπάρχουν πολλοί τύποι αμακρίνιων κυττάρων που διαφέρουν στο μέγεθος, στη μορφολογία και στη λειτουργία. Συχνά διαμορφώνουν διασυνδέσεις μεταξύ των διπολικών και των γαγγλιακών κυττάρων, αλλά και μεταξύ τους, διανέμοντας τις πληροφορίες πλαγίως (όπως τα οριζόντια κύτταρα).

Η τελευταία ομάδα κυττάρων στον αμφιβληστροειδή είναι τα Γαγγλιακά κύτταρα. Σε αντίθεση με τους φωτοϋποδοχείς, οι οποίοι αποκρίνονται στο φως με

βαθμιαίες αλλαγές του δυναμικού μεμβράνης, κάθε γάγγλιο διαβιβάζει τις πληροφορίες στον εγκέφαλο ως σειρές δυναμικών ενέργειας.

Όρια Κωνίων

Η μέγιστη οπτική οξύτητα παρουσιάζεται στο κεντρικό βοθρίο του αμφιβληστροειδή, περιοχή όπου τα κωνία, οι φωτοϋποδοχείς που εξασφαλίζουν την υψηλή διακριτική ικανότητα του οφθαλμού, παρουσιάζουν το μικρότερο μέγεθος, κι επομένως τη μέγιστη πυκνότητα. Σε φωτοπικές συνθήκες φωτισμού, στο κέντρο του αμφιβληστροειδή κάθε κωνίο μεταδίδει τις πληροφορίες σε μόνο ένα γαγγλιακό κύτταρο, με αποτέλεσμα η χωρική κατανομή (η πυκνότητα) του μωσαϊκού των φωτοϋποδοχέων να καθορίζει τα όρια ευκρίνειας της νευρωνικής επεξεργασίας. Αυτό συνεπάγεται ότι, όσο υψηλή και να είναι η ευκρίνεια του οπτικού μας συστήματος, η τελική διακριτική ικανότητα του οφθαλμού περιορίζεται από την μέση απόσταση μεταξύ των κωνίων του κεντρικού βοθρίου. Βεβαίως, γίνεται αντιληπτό ότι όταν δύο παρακείμενες σημειακές φωτεινές πηγές εστιάζονται σε δύο παρακείμενα κωνία σχηματίζουν ένα είδωλο. Επομένως, η διάκριση των δύο ειδώλων ως δύο ξεχωριστά σημεία γίνεται εφικτή μόνο στην περίπτωση ύπαρξης ενός «ανερέθιστου» κωνίου ανάμεσα στα δύο κωνία που ερεθίζονται από φως (γνωστό ως όριο Nyquist) (σχήμα 13).



Σχήμα 13: Παράθεση των δύο παραγόντων που καθορίζουν τα όρια της διακριτικής ικανότητας του οφθαλμού. (πάνω) το αμφιβληστροειδικό είδωλο να παρουσιάζει συνάρτηση διασποράς σημείων με 2 μέγιστα και ένα τοπικό ελάχιστο (σύμφωνα με το κριτήριο του Rayleigh). (κάτω) η διάταξη υποδοχέων με τέτοιον τρόπο, ώστε ανάμεσα στα δύο κωνία όπου εστιάζονται οι σημειακές πηγές να υπάρχει ένα «αναρέθιστο» κωνίο.

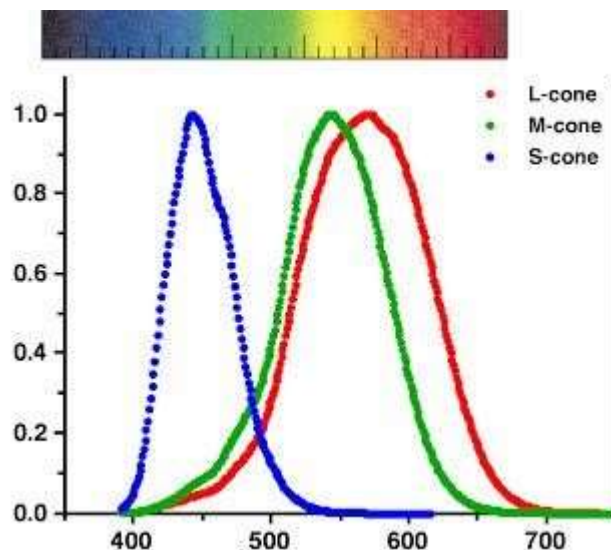
Κεφάλαιο 3: Η αντίληψη της έγχρωμης όρασης

Η αντίληψη της έγχρωμης όρασης καθορίζεται από το μέρος εκείνο του ορατού φάσματος που απορροφάται από τα κωνία καθώς και από μια σειρά βιοχημικών αντιδράσεων στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του οφθαλμού πριν την τελική επεξεργασία από τον εγκέφαλο. Τα φωτόνια του ορατού φάσματος κατά την είσοδό τους στον οφθαλμό υπόκεινται πρώτα σε απορρόφηση και σκέδαση στις οπτικές επιφάνειες, κερατοειδή, φακό, αλλά και από τη χρωστική ουσία της ωχράς κηλίδας που είναι ιδιαίτερα πυκνή στα κωνία του κέντρου της και αποτελούνται από την λουτεΐνη και την ζεαξανθίνη. Η χρωστική αυτή απορροφά σημαντικό μέρος της μπλέ - ιώδους περιοχής του φάσματος, σχεδόν το 30%. Ο φακός επίσης έχει χρωστικές που απορροφούν όλα τα φωτόνια της υπεριώδους περιοχής καθώς και μέρος της ιώδους. Επίσης λόγω της προαναφερθείσης αξονικής χρωματικής εκτροπής που διαθλά περισσότερο τα φωτόνια υψηλής συχνότητας από τα χαμηλής και έτσι δημιουργείται θέμα καλής εστίασεως στον αμφιβληστροειδή φαίνεται ότι αυτό το φίλτράρισμα των φωτονίων υψηλής συχνότητας χρησιμεύει για τη βελτίωση του ειδώλου στον αμφιβληστροειδή αλλά και την προστασία του από θερμική (η ενέργεια των φωτονίων είναι ανάλογη της συχνότητας) και συνεπώς οξειδωτική βλάβη των μορίων του χιτώνα.

3.1 Οι Θεωρίες

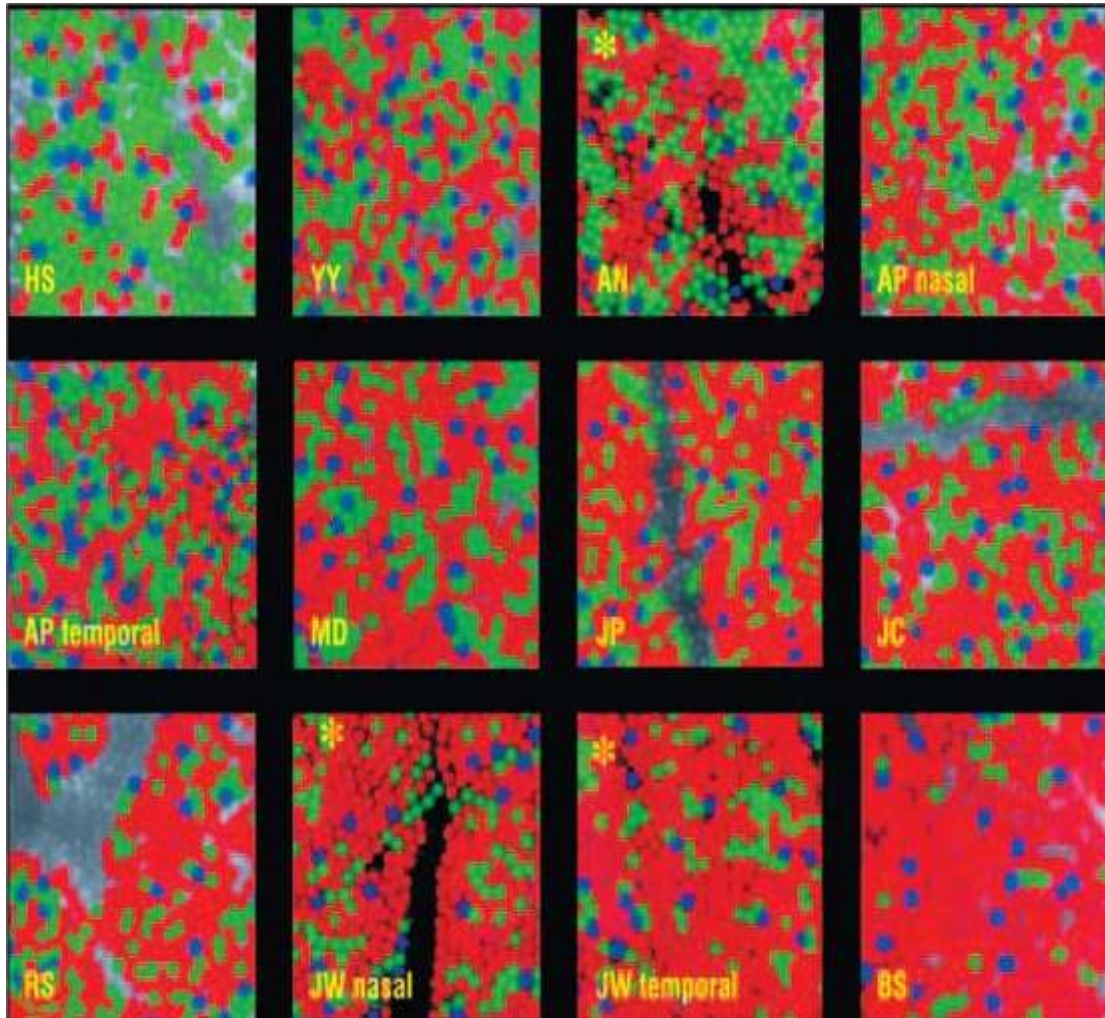
Από τα αρχαία χρόνια υπήρξε προβληματισμός για την αντίληψη του χρώματος, με πρώτο τον Αριστοτέλη ο οποίος θεωρούσε ότι το χρώμα ήταν ιδιότητα των φωτεινών ακτίνων που έστελναν οι θεοί από τον ουρανό στον οφθαλμό του ανθρώπου. Στη συνέχεια ο Νεύτων διαπίστωσε την ανάλυση του ηλιακού λευκού φωτός σε συνεχή σειρά χρωμάτων (φάσμα) χωρίς όμως να έχει τη δυνατότητα ερμηνείας της αντίληψης των από τον οφθαλμό. Το 1801 ο Young προτείνει μία πρώτη σοβαρή θεωρία, την «τριχρωματική» υποστηρίζοντας ότι για την επίτευξη οιασδήποτε απόχρωσης απαιτείται αναλογική ανάμιξη τριών βασικών χρωμάτων. Του κόκκινου, του πράσινου και του μπλέ. Η θεωρία αυτή επεκτάθηκε το 1852 από τον Helmholtz με τη διαπίστωσή του ότι υπάρχουν τρία είδη φυσιολογικών μηχανισμών, υπευθύνων για την αντίληψη όλων των χρωμάτων από τον άνθρωπο αναγνωρίζοντας ταυτόχρονα τη διαφορά ανάμεσα στην προσθετική και αφαιρετική υπέρθεση των χρωμάτων.

Οι τρεις αυτοί μηχανισμοί καθορίζονται από τους τρεις τύπους κωνίων που βρίσκονται στον αμφιβληστροειδή, οι οποίοι αποκρίνονται σε διαφορετικά μήκη κύματος ενός φωτεινού ερεθίσματος. Ο κάθε τύπος κωνίων περιέχει μια οπτική χρωστική (φωτοχρωστική), ευαίσθητη σε διαφορετικό τμήμα του χρωματικού φάσματος, από όπου προκύπτει και η ονομασία τους: τα S-κωνία (ευαίσθητα σε φωτόνια μικρού μήκους κύματος- Short wavelength), τα M-κωνία (ευαίσθητα σε φωτόνια μέσου μήκους κύματος - Medium wavelength) και τα L-κωνία (ευαίσθητα σε φωτόνια μεγάλου μήκους κύματος - Long wavelength). Οι χρωστικές των κωνίων αποτελούνται από μια πρωτεΐνη, την οψίνη, και μια φωτοευαίσθητη ουσία, τη ρετινάλη. Καθεμία από τις τρεις χρωστικές των κωνίων περιέχει διαφορετική οψίνη. Στο σχήμα 14 παριστάνονται οι καμπύλες φασματικής ευαισθησίας των τριών φωτοχρωστικών, οι οποίες καθορίζουν την πιθανότητα απορρόφησης ενός φωτονίου ως συνάρτηση του μήκους κύματός του.



Σχήμα 14 : Φασματικές καμπύλες ευαισθησίας των τριών φωτοχρωστικών .Τα φάσματα απορρόφησης παρουσιάζουν μεγάλο εύρος (οι καμπύλες των L- και M-κωνίων καλύπτουν σχεδόν όλο το ορατό φάσμα) ενώ τα L- κωνία παρουσιάζουν μέγιστο απορρόφησης στο κίτρινο . Γιαυτό προτείνεται να αποφεύγεται η κατηγοριοποίηση σε μπλέ , πράσινα, κόκκινα, κωνία ως μη ακριβής .

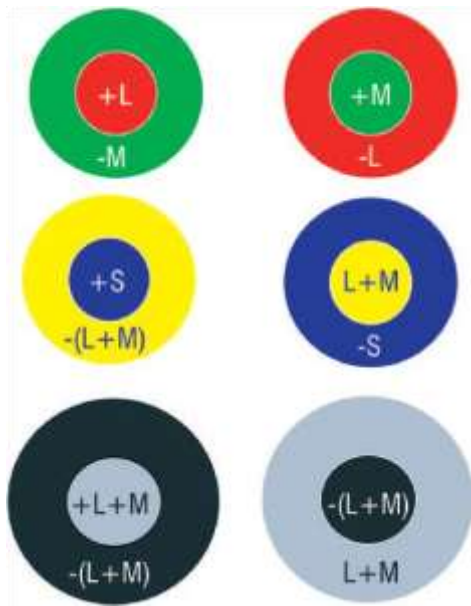
Από τη στιγμή που απορροφηθούν κάποια φωτόνια (και μετατραπούν μέσω μιας σύνθετης φωτοχημικής αντίδρασης σε ηλεκτρική απόκριση), η απόκριση του κωνίου εξαρτάται από τον συνολικό αριθμό των φωτονίων που απορροφήθηκαν και όχι από το μήκος κύματος των απορροφημένων φωτονίων, μια αρχή γνωστή ως univariance.³ Αυτό συνεπάγεται ότι, μια αύξηση του αριθμού των φωτονίων είναι πιθανόν να προκληθεί είτε από αύξηση της έντασης του φωτεινού ερεθίσματος, είτε από αλλαγή του μήκους κύματος, είτε και από τα δύο (π.χ. αύξηση της απόκρισης ενός L-κωνίου σημαίνει ότι το μήκος κύματος του φωτεινού ερεθίσματος πλησίασε την "κορυφή" του φάσματος απορρόφησης του L-κωνίου ή ότι το ερέθισμα αυξήθηκε σε φωτεινότητα ή και τα δύο). Αν και τα φάσματα απορροφητικότητας των φωτοχρωστικών των S, M, και L κωνίων επικαλύπτονται αρκετά, παρουσιάζουν την μέγιστη απορροφητικότητα τους σε διαφορετικές περιοχές του ορατού φάσματος τις 419, 531 και 559 νανόμετρα. Αριθμητικώς τα κωνία M και L ξεπερνούν κατά πολύ τα S. Επίσης, τα S-κωνία απουσιάζουν από το κέντρο του αμφιβληστροειδή (μια κυκλική περιοχή διαμέτρου $\sim 0,34^\circ$), ένα φαινόμενο που αποκαλείται "τριτανοπία της ωχράς" (θα την εξετάσουμε στις διαταραχές της χρωματικής αντίληψης), ενώ στο σύνολό τους δεν ξεπερνούν το 7% του συνολικού αριθμού όλων των κωνίων. Πιστεύεται ότι η απουσία των S-κωνίων οφείλεται σε δύο λόγους: (1) στο γεγονός ότι η καμπύλη φασματικής απορρόφησης τους διαφέρει σημαντικά από αυτές των L- και M-κωνίων με αποτέλεσμα λόγω της χρωματικής εκτροπής τα φωτόνια μικρού μήκους κύματος να εστιάζονται μπροστά και όχι πάνω στον αμφιβληστροειδή, (2) στη χαμηλή χωρική ευκρίνεια των S-κωνίων (περίπου 2,5-5 cells/deg, δηλαδή μόλις 1/10 οπτικής οξύτητας, σε σύγκριση με 25 cells/deg των L-και M-κωνίων), η παρουσία των οποίων στο κεντρικό βοθρίο θα αποτελούσε ανασταλτικό παράγοντα στη διακριτική ικανότητα του οφθαλμού (βλέπε κεφάλαιο 2.2). Μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η, αναπάντεχη για τα προηγούμενα χρόνια, απόκλιση που παρατηρείται στους φυσιολογικούς οφθαλμούς όσον αφορά στην αναλογία L- και M-κωνίων. Κατά μέσον όρο οι φυσιολογικοί οφθαλμοί παρουσιάζουν αναλογία L/M περίπου 2:1, αλλά υπάρχουν οφθαλμοί όπου τα M-κωνία είναι περισσότερα (αναλογία 0,25:1) και άλλοι όπου η αναλογία φτάνει το 20,8 -10 δηλαδή τα L-κωνία αποτελούν το 90% του συνολικού αριθμού κωνίων (Εικόνα 27).



Εικόνα 27 : Εικόνες από κεντρικές περιοχές της ωχράς κηλίδας για διαφόρους οφθαλμούς. Από πάνω αριστερά έως κάτω δεξιά αυξάνεται ο αριθμός των L- κωνίων ενώ ο αριθμός των S- παραμένει σταθερός.

Παρά την αξιοσημείωτη αυτή απόκλιση, η αντίληψη των χρωμάτων είναι φυσιολογική και δεν διαφέρει σημαντικά στους παραπάνω οφθαλμούς. Αυτό εξηγείται από την ύπαρξη ενός δεύτερου σταδίου επεξεργασίας της έγχρωμης όρασης (στα γαγγλιακά κύτταρα και το LGN) όπου επέρχεται κάποια ρύθμιση των αποκρίσεων των κωνίων. Όσον αφορά στα ραβδία, όπως έχουμε ήδη αναφέρει επειδή συμβάλλουν στην όραση μόνο σε επίπεδα χαμηλού φωτός, η επιρροή τους στην αντίληψη του χρώματος είναι σχεδόν μηδαμινή.

Το 1872 ο Hering, διατυπώνει την « **τετραχρωματική θεωρία** » ή « **θεωρία των αντιθέτων χρωμάτων** » ή « **θεωρία χρωματικής ανταγωνιστικότητας** ». Σύμφωνα με αυτή μετά από το στάδιο επεξεργασίας του χρώματος στα κωνία , υπάρχει ένα δεύτερο στάδιο χρωματικής επεξεργασίας στο οποίο οι αποκρίσεις των κωνίων συνδυάζονται ("κωδικοποιώντας" το άθροισμά ή τη διαφορά τους). Αυτή η θεωρία έγινε γνωστή πρώτα ως "θεωρία χρωματικής ανταγωνιστικότητας" γιατί βασίζεται στον ανταγωνισμό που παρουσιάζεται στην αντίληψη μεταξύ κόκκινου-πράσινου, και μπλεκίτρινου χρώματος. **Οι DeValois et al.** ήταν οι πρώτοι που περιέγραψαν κύτταρα στην οπτική οδό ανώτερων θηλαστικών, τα οποία, για παράδειγμα, "αναστέλλονταν" από το κόκκινο και "διεγείρονταν" από το πράσινο φως. Ηλεκτροφυσιολογικές και ψυχοφυσικές μελέτες αργότερα επιβεβαίωσαν τις αρχικές παρατηρήσεις. Στον άνθρωπο και άλλα ανώτερα θηλαστικά έχουν διαπιστωθεί τρεις "παράλληλες οδοί" που μεταβιβάζουν τις οπτικές πληροφορίες από τον αμφιβληστροειδή στο φλοιό μέσω του οπτικού νεύρου. Η κωδικοποίηση στο οπτικό νεύρο είναι πολύ αποτελεσματική, κυρίως επειδή τα ηλεκτρικά σήματα που μεταφέρονται στις οδούς είναι καλά διαχωρισμένα το ένα από το άλλο, όχι μόνο στις φυσιολογικές (και κατ' επέκταση χρωματικές) ιδιότητές τους, αλλά επίσης στο ανατομικό υπόστρωμά τους, δεδομένου ότι περιλαμβάνουν τρεις κατηγορίες αμφιβληστροειδικών γαγγλιακών κυττάρων: **α)** μια κατηγορία μεγάλων σε μέγεθος γαγγλιακών κυττάρων με χονδρούς νευρίτες, που ονομάζονται **parasol** κύτταρα, οι νευράξονες των οποίων προβάλλουν στις 2 κατώτερες στιβάδες του έξω γονατώδη πυρήνα (LGN), τις μεγαλοκυτταρικές (Magnocellular, MC) στιβάδες. Αυτά τα κύτταρα αποτελούν περίπου 10% του συνολικού πληθυσμού των γαγγλιακών κυττάρων και μεταφέρουν κυρίως πληροφορίες για την αντίθεση φωτεινότητας (διάκριση φωτός από το σκοτάδι) αθροίζοντας τις αποκρίσεις των L- και M- κωνίων, με τον εξής τρόπο: τα υποδεκτικά πεδία των MC (αλλά και των parasol) κυττάρων αποτελούνται από δύο ανταγωνιστικές περιοχές (το κέντρο και την περιφέρεια). Η κεντρική περιοχή ενός γαγγλιακού κυττάρου φωτεινού κέντρου, η οποία αποκαλείται +(L+M), διεγείρεται από τις αθροιστικές αποκρίσεις των L και M κωνίων. Η περιφέρειά του, που αποκαλείται -(L+M), αναστέλλεται από τις αποκρίσεις των L και M κωνίων (σχήμα 15).



Σχήμα 15 : Αποκρίσεις κωνίων .

Σε αντίθεση, ένα γαγγλιακό κύτταρο σκοτεινού κέντρου αναστέλλεται $[-(L+M)]$ στο κέντρο του και διεγείρεται $[(L+M)]$ στην περιφέρειά του. Τα κύτταρα MC έχουν υψηλή ευαισθησία στην αντίθεση φωτεινότητας αλλά παρουσιάζουν μηδαμινή χρωματική επιλεκτικότητα.

β) μια κατηγορία μικρών γαγγλιακών κυττάρων με λεπτούς νευρίτες, που ονομάζονται **midget** κύτταρα, τα οποία προβάλλουν στις μικροκυτταρικές (Parvocellular, PC) στιβάδες του LGN. Αυτά τα κύτταρα είναι πολυάριθμα (αποτελούν περίπου το 80% του συνόλου των γαγγλιακών κυττάρων) και ειδικά στο κέντρο της ωχράς (όπου απαιτείται μεγάλη ευκρίνεια) η κεντρική περιοχή του υποδεκτικού τους πεδίου επεξεργάζεται σήματα από ένα L ή ένα M κωνίο. Η δομή των υποδεκτικών τους πεδίων είναι ανταγωνιστική, δηλαδή η περιφέρειά τους επεξεργάζεται σήματα από ανταγωνιστικά κωνία. Ως αποτέλεσμα έχουμε δύο υποκατηγορίες, τα $+L-M$ και τα $L+M$, τα οποία μεταφέρουν πληροφορίες για τον κόκκινο-πράσινο χρωματικό ανταγωνισμό, συγκρίνοντας τη δραστηριότητα των L και M κωνίων. Εντούτοις, έχουν χαμηλή ευαισθησία στην αντίθεση φωτεινότητα σε σχέση με τα parasol / MC κύτταρα. **γ)** μια κατηγορία εξειδικευμένων γαγγλιακών κυττάρων, των **small bistratified** κυττάρων τα οποία ανακαλύφθηκαν πρόσφατα, και αποτελούν μια ξεχωριστή οδό προβάλλοντας στις λεπτές koniocellular (KC) στιβάδες στο LGN (οι οποίες βρίσκονται ανάμεσα από τις

στιβάδες PC, στις μεσοπετάλιες ζώνες). Η κεντρική περιοχή των υποδεκτικών τους πεδίων διεγείρεται από τις αποκρίσεις των S κωνίων ενώ η περιφέρεια αναστέλλεται από συνδυαστικές αποκρίσεις των L και M κωνίων [+S(L+M)] οι οποίες μεταφέρονται στα small bistratified κύτταρα μέσω των διπόλων και ίσως των οριζόντιων κυττάρων. Ως αποτέλεσμα τα S-κωνία μεταφέρουν πληροφορίες σχετικές με τον κίτρινο-μπλε χρωματικό ανταγωνισμό, ενώ παρουσιάζουν πολύ χαμηλή ευαισθησία στην αντίθεση φωτεινότητας. Να σημειωθεί ότι δεν έχει βρεθεί ακόμη κάποιο κύτταρο στη στιβάδα των γαγγλιακών κυττάρων που να παρουσιάζει δομή υποδεκτικού πεδίου -S+(L+M). Οι προβολές από τις τρεις ομάδες στιβάδων του L-GN, την MC, την PC και την KC, σχηματίζουν τρεις ανεξάρτητες οπτικές οδούς που καταλήγουν σε διαφορετικές στιβάδες στον πρωτοταγή οπτικό φλοιό. Οι νευράξονες MC κυττάρων καταλήγουν στη στιβάδα 4Ca και μερικές στη στιβάδα 1. Οι νευράξονες των PC κυττάρων καταλήγουν κυρίως στη στιβάδα 4Cβ, ενώ λίγες ίνες καταλήγουν στις στιβάδες 4A και 6. Τέλος, τα KC κύτταρα προβάλλουν απευθείας στις κηλίδες των επιπολής στιβάδων 2 και 3.

Μπορεί επομένως να διατυπωθεί ότι στα αρχικά στάδια της οπτικής οδού, στον αμφιβληστροειδή και στο LGN λαμβάνει χώρα βασική επεξεργασία για την αντίληψη της έγχρωμης όρασης. Οι χρωματικοί ανταγωνιστικοί μηχανισμοί που περιγράφονται ανωτέρω θέτουν τους σημαντικότερους περιορισμούς για τις βασικές επεξεργασίες του χρώματος όπως είναι η αντίληψη και η αναγνώριση, αλλά ο συσχετισμός των φυσιολογικών χαρακτηριστικών με την αντίληψη των χρωμάτων τους δεν είναι άμεσος. Αυτό, αν συνέβαινε, θα προκαλούσε έκπληξη, επειδή είναι γνωστό ότι στη συνέχεια οι χρωματικές πληροφορίες υπόκεινται σε περαιτέρω επεξεργασία στον οπτικό φλοιό, όπου το σήμα υποβάλλεται σε μετασχηματισμούς σχετικούς με την τελική αντίληψη των χρωμάτων των οπτικών ερεθισμάτων. Η χρωματική ανταγωνιστικότητα που χαρακτηρίζει τα γαγγλιακά κύτταρα και τα κύτταρα του LGN δεν υφίσταται στα κύτταρα του V1. Έχει διαπιστωθεί ότι τα κύτταρα αυτά είναι συντονισμένα (παρουσιάζοντας μικρό εύρος φάσματος απορρόφησης) σε διαφορετικά χρώματα. Ένα απλουστευμένο μοντέλο της χρωματικής επεξεργασίας στις οπτικές οδούς απεικονίζεται στο σχήμα 16.



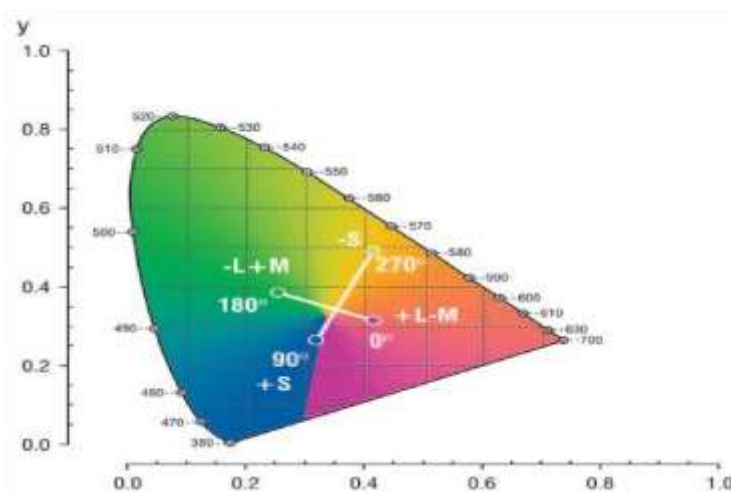
Σχήμα 16 : Χρωματική επεξεργασία στις οπτικές οδούς.

3.2 Γενετική εξέλιξη της έγχρωμης όρασης

Η τριχρωματική μας όραση επιτυγχάνεται από την ύπαρξη δύο υποσυστημάτων, ενός φυλογενετικά πρόσφατου και ενός πολύ παλιότερου. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 14 των φασματικών καμπυλών, η διαφορά της μέγιστης απορροφητικότητας των M- και L-κωνίων είναι πολύ μικρή (περίπου 30 nm) και αυτό πιθανόν οφείλεται στην κοινή τους γενετική προέλευση. Πιστεύεται ότι αυτοί οι δύο τύποι κωνίων εξελίχθηκαν πρόσφατα στην αλυσίδα εξέλιξης του ανθρώπου (περίπου 30-40 εκατομμύρια χρόνια πριν) από έναν κοινό πρόγονο. Τα S-κωνία και τα ραβδία αποσχίστηκαν από τον προγονικό τους υποδοχέα πολύ νωρίτερα. Τα περισσότερα θηλαστικά παρουσιάζουν διχρωματική όραση, παρουσιάζοντας δύο τύπους κωνίων στον αμφιβληστροειδή. Οι σημαντικές λειτουργίες της όρασης, η ανίχνευση της κίνησης και των σχημάτων, βασίζονται σε μια ομάδα κωνίων με μέγιστη φασματική ευαισθησία σε υψηλά μήκη κύματος (500-700nm). Ανάμεσα σε αυτά τα κωνία υπάρχει και ένας δεύτερος πληθυσμός κωνίων με μέγιστη ευαισθησία σε χαμηλά μήκη κύματος. Ως αποτέλεσμα, παρουσιάζουν στοιχειώδη χρωματική αντίληψη, η οποία επιτυγχάνεται με τη σύγκριση των φωτονίων που απορροφώνται από τις δύο κατηγορίες κωνίων. Αυτό το αρχέγονο υποσύστημα παρουσιάζει το δι-κό του μορφολογικό υπόβαθρο στην οπτική οδό: τα οπτικά σήματα μεταφέρονται μέσω των "μπλε-κωνιο-" δίπολων κυττάρων στα small bistratified κύτταρα και από εκεί στα KC στο LGN, καταλήγοντας στις στιβάδες 2 και 3 στον οπτικό φλοιό.

Η εξέλιξη των M- και L-κωνίων έχει αποτελέσει κύριο θέμα έντονης ερευνητικής δραστηριότητας τα τελευταία χρόνια όσον αφορά την εξέλιξή τους. Πιθανολογείται ότι η προέλευσή τους οφείλεται σε μια αντιγραφή της προγονικής οψίνης (δηλ. διπλασιασμό του γονιδίου που βρίσκεται στο X χρωμόσωμα και ήταν υπεύθυνο για την "κωδικοποίηση" του αρχέγονου κωνίου που συναντάται στα θηλαστικά) και σε επακόλουθες μεταλλάξεις με αποτέλεσμα η ομάδα κωνίων με μέγιστη ευαισθησία στα 500 με 700nm να αντικατασταθεί από τα M- και L- κωνία στα ανώτερα θηλαστικά (και στον άνθρωπο). Συνοπτικά να αναφέρουμε ότι τα γονίδια των φωτοχρωστικών τους βρίσκονται στο X χρωμόσωμα και παρουσιάζουν κατά 98% ομοιότητα στο επίπεδο του DNA.

Είναι σίγουρο ότι η εισαγωγή ενός τρίτου τύπου κωνίων προσέφερε ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην εξέλιξη, ενώ παράλληλα οδήγησε σε μια μαζική αναδιοργάνωση των ανώτερων δομών της όρασης (στις οπτικές οδούς και το φλοιό). Αν και υπάρχουν αρκετές θεωρίες σχετικά με τη φύση αυτών των πλεονεκτημάτων, πιστεύεται ότι το κόκκινο/πράσινο σύστημα αρχικά βοήθησε τους προγόνους μας να διακρίνουν τα γινομένα φρούτα (που έχουν κίτρινο χρώμα) μέσα από τα πράσινα φύλλα. Αυτή η θεωρία υποστηρίζεται από την παρατήρηση ότι οι καμπύλες φασματικής ευαισθησίας των M- και L- κωνίων είναι συντονισμένες πολύ κοντά σε φύλλα και φρούτα, αν και έχει επίσης παρατηρηθεί ότι τριχρωματική όραση έχει εξελιχθεί και σε διάφορα είδη που τρέφονται μόνο με φύλλα. Παραθέτουμε πιο κάτω το γνωστό από προηγούμενο κεφάλαιο διάγραμμα του προτύπου CIE 1931 με τους άξονες χρωματικότητας των κωνίων (σχήμα 17).



Σχήμα 17.

Αυτοί οι άξονες χρωματικότητας, όπως προκύπτουν από πρόσφατα ψυχοφυσικά πειράματα, δεν συμπίπτουν με τους μηχανισμούς χρωματικής ανταγωνιστικότητας που είχαν διατυπωθεί αρχικά από τον Hering. Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα 17 , ο χρωματικός άξονας υπεύθυνος για την επεξεργασία μπλέ/κίτρινου χρώματος δεν εκτείνεται μεταξύ αμιγών αποχρώσεων (ο Hering πίστευε ότι το βασικό χρώμα μπλέ ήταν αμιγές, δηλαδή δεν περιείχε καθόλου κόκκινο και πράσινο).

3.3 Διαταραχές στην αντίληψη των χρωμάτων

Αν και η **τριχρωματική** όραση, η παρουσία δηλαδή τριών διαφορετικών τύπων κωνίων με διαφορετικές φωτοχρωστικές ουσίες, αποτελεί τον φυσιολογικό τύπο έγχρωμης όρασης, ένα σημαντικό ποσοστό των ανθρώπων παρουσιάζει κάποιο βαθμό ανεπάρκειας

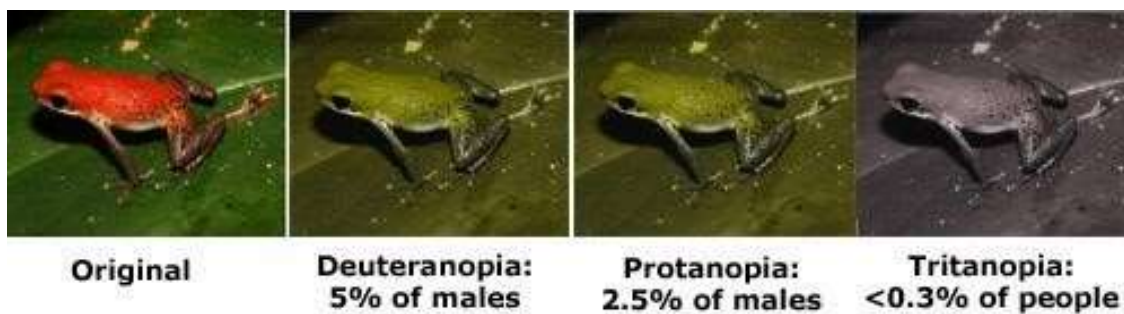
στην αντίληψη των χρωμάτων. Η απώλεια ενός από τους τύπους των κωνίων, όπως εμφανίζεται σε ορισμένες κληρονομικές διαταραχές, μειώνει την αντίληψη έγχρωμης όρασης σε δύο διαστάσεις, οδηγώντας στο **διχρωματισμό**. Η απώλεια δύο τύπων κωνίων οδηγεί στη **μονοχρωματική** όραση, ενώ η απώλεια και των τριών τύπων κωνίων (**ράβδιο-μονοχρωματική** όραση) εξαφανίζει την αντίληψη χρωμάτων και ως κατάληξη η όραση περιορίζεται στη λειτουργία των ραβδίων. Όταν πολύ σπάνια δεν υπάρχουν ραβδία τότε μιλούμε για την **κωνιο-μονοχρωματική όραση**. Υπάρχουν δύο κατηγορίες διαταραχών στην έγχρωμη όραση, **οι συγγενείς και οι επίκτητες**.

Συγγενείς ανωμαλίες

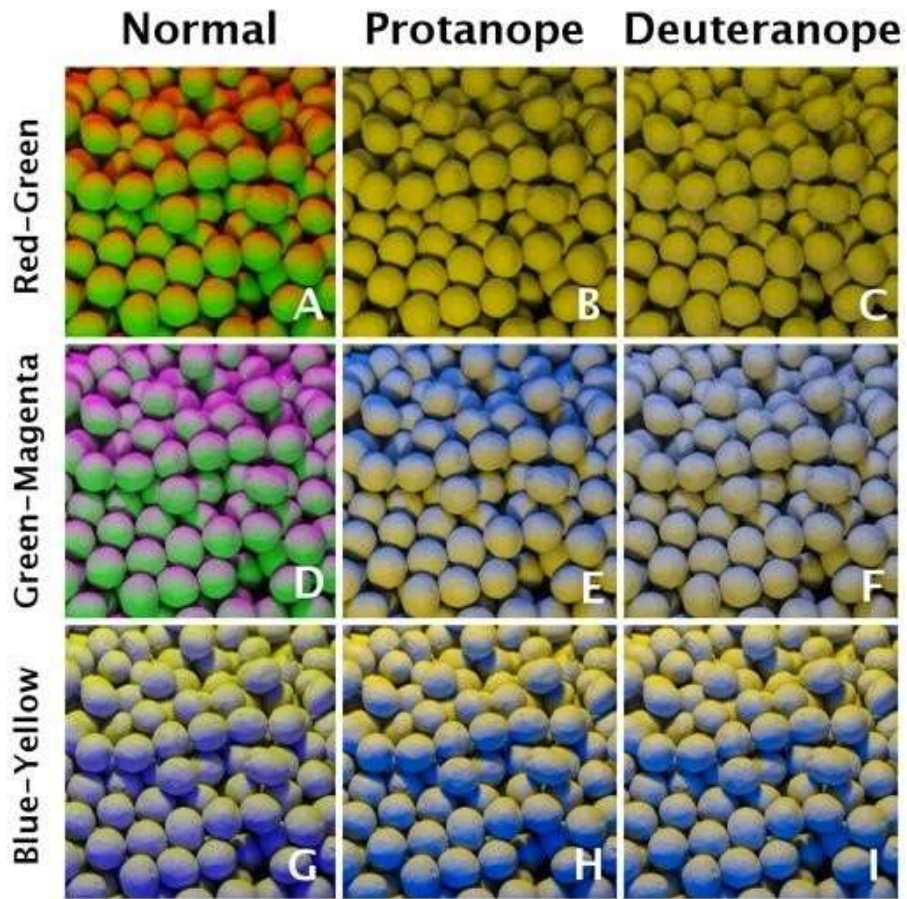
Η προέλευση αυτών των "ανωμαλιών" είναι γενετική, και οφείλεται σε μεταλλάξεις που συμβαίνουν στα φυλοσύνδετα γονίδια (υπεύθυνα για το σχηματισμό της οψίνης) που βρίσκονται στο X-χρωμόσωμα. Για αυτό είναι αναμενόμενο οι συγγενείς "διαταραχές" να εμφανίζονται πολύ συχνότερα στους άνδρες από ό,τι στις γυναίκες. Αυτοί οι τύποι ατελειών προκύπτουν είτε από την έλλειψη μιας φωτοχρωστικής ουσίας, είτε από την παρουσία μιας υβριδικής φωτοχρωστικής ουσίας με διαφορετικό (από το φυσιολογικό) φάσμα απορρόφησης (πιο ήπια μορφή). Είναι αξιοσημείωτη η διαπίστωση ότι 3nm διαφορά στο μέγιστο του φάσματος απορρόφησης μεταξύ των φωτοχρωστικών L/M προκύπτει από διαφορές σε αμινοξέα σε 3 θέσεις. Όταν απουσιάζει τελείως μια χρωστική ουσία (δηλαδή, ένας τύπος κωνίων) η όραση τότε ονομάζεται **διχρωματική (δυσχρωματοψία)**. Όταν απουσιάζει η φωτοχρωστική υπεύθυνη για τα μακρά μήκη κυματος (L) είναι τότε η "ανωμαλία" ονομάζεται **πρωτανοπία**. Όταν το φάσμα απορρόφησης της μακρών κυμάτων χρωστικής ουσίας είναι ανώμαλο ή ανεπαρκές χρησιμοποιείται ο όρος **πρωτανομαλία**. Σε αυτή την περίπτωση το φάσμα απορρόφησης της χρωστικής (L) είναι μετατοπισμένο σε μικρότερα μήκη κύματος, πιο κοντά στην (M). Παρόμοια ορολογία χρησιμοποιείται για τις άλλες δύο κατηγορίες "διαταραχών": **δευτερ-** είναι η ρίζα όταν οι φωτοχρωστικές των κωνίων M είναι ελαττωματικές (μετατοπισμένες σε μεγαλύτερα μήκη κύματος) και **τριταν-** είναι η ρίζα όταν οι φωτοχρωστικές των κωνίων S είναι ελαττωματικές (πολύ πιο σπάνια περίπτωση). Όλες οι κατηγορίες των διαταραχών καθώς επίσης και τα ποσοστά εμφάνισής τους παρουσιάζονται στον πίνακα 1 και στις εικόνες 28,29 και 30.

Όραση	Υποδιαίρεση	Τύποι κωνίων	Ποσοστό % Ανδρικός πληθυσμός	Ποσοστό % Γυναικείος πληθυσμός
Κανονική Τριχρωματική	Καμμία	3	92	99,5
Ανώμαλη Τριχρωματική	Πρωτανωμαλία	3	1	0.02
	Δευτερανωμαλία	3	5	0,40
	Τριτανωμαλία	3	άγνωστο	
Διχρωματική	Πρωτανοπία	2	1	0.02
	Δευτερανοπία	2	1	0.02
	Τριτανοπία	2	0,001	0.001
Μονοχρωματική	Μόνο κωνία	1	Άγνωστο	
	Μόνο ραβδία	1	0.003	0.003

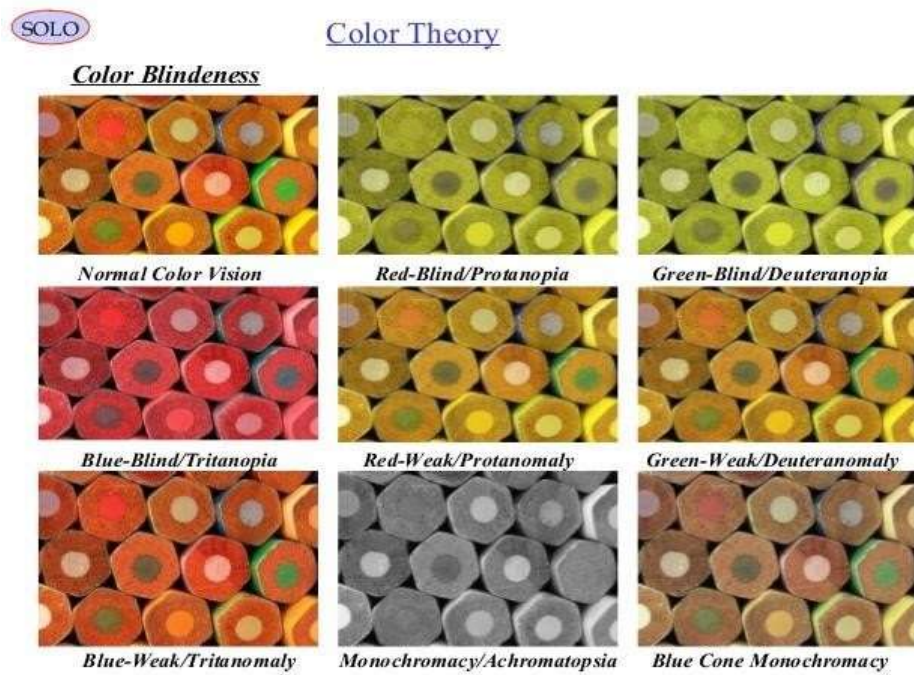
Πίνακας 1.



Εικόνα 28 .



Εικόνα 29.



Εικόνα 30.

Αν και οι επιπτώσεις των διαφορετικών κατηγοριών στην αντίληψη των διαφόρων χρωμάτων διαφέρουν αρκετά μεταξύ των πασχόντων, έχουν γίνει προσπάθειες εξομοίωσης των αντιλαμβανόμενων χρωμάτων που στηρίζονται σε ψυχοφυσικά δεδομένα (εικόνες). Να σημειωθεί ότι η σοβαρότητα των συγγενών διαταραχών δεν μεταβάλλεται με την ηλικία, ενώ σε καμιά περίπτωση δεν επηρεάζεται η οπτική οξύτητα ή άλλες λειτουργίες της όρασης των ασθενών.

Επίκτητες ανωμαλίες

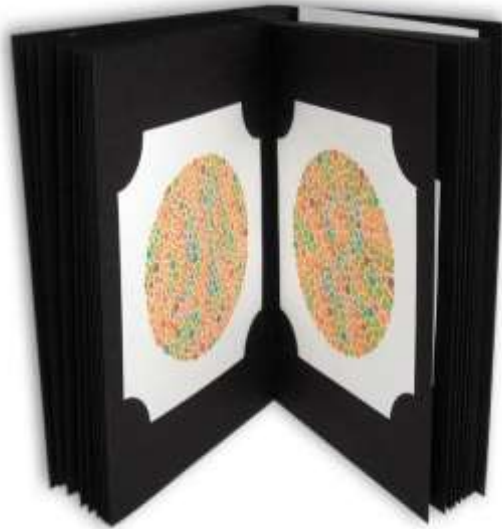
Αυτές εμφανίζονται είτε παροδικά είτε μόνιμα κυρίως λόγω παθολογικών αλλαγών, αλλά μπορεί επίσης να εμφανιστούν ως αποτέλεσμα φυσιολογικών διαδικασιών γήρανσης (π.χ. ο καταρράκτης αλλάζει το φάσμα απορρόφησης του φακού), η να έχουν προκληθεί από φάρμακα. Διαταραχές στην μπλε/κίτρινη οδό είναι πιο συχνές στην παθολογία (π.χ. πυρηνικός καταρράκτης, χοριοαμφιβληστροειδικές φλεγμονές, διαβήτης, ηλικιακή εκφύλιση της ωχράς, οίδημα οπτικής θηλής, οπτικές νευρίτιδες, γλαύκωμα). Οι επίκτητες διαταραχές στην κόκκινη-πράσινη οδό εμφανίζονται σπανιότερα (π.χ. δυστροφίες της ωχράς και παθήσεις του οπτικού νεύρου, όπως νευρίτιδες, ατροφία του οπτικού νεύρου, δυσμορφίες του δίσκου, όγκοι του οπτικού νεύρου ή του χιάσματος) και συνήθως συνδέονται με άλλες προφανέστερες απώλειες της λειτουργίας της όρασης, όπως μειωμένη οπτική οξύτητα, μη φυσιολογικά οπτικά πεδία. Οι επίκτητες διαταραχές μπορεί να εμφανιστούν σε οποιοδήποτε στάδιο της ζωής, μόνον στον ένα ή και στους δύο οφθαλμούς ταυτόχρονα, σε άνδρες ή γυναίκες στο ίδιο ποσοστό και μπορεί να χειροτερέψουν με την πάροδο του χρόνου. Συμπερασματικά, η αχρωματοψία δεν θεραπεύεται. Παρόλα αυτά, η διάγνωσή της από την πολύ μικρή ηλικία είναι πολύ σημαντική αφού κατά τη σχολική ηλικία ένα πολύ μεγάλο μέρος του διδακτικού υλικού βασίζεται στην χρωματική αντίληψη. Γνωρίζοντας το πρόβλημα, γίνεται ευκολότερο στο παιδί να αντιμετωπίσει μαθησιακές δυσκολίες οι οποίες βασίζονται στην αντίληψη των χρωμάτων. Επίσης άτομα που πάσχουν δεν θα πρέπει να χειρίζονται μηχανήματα ή κουμπιά με κόκκινα ή πράσινα χρώματα, όπως επίσης θα πρέπει να βρίσκουν διαφορετικούς τρόπους για να διαχωρίζουν διαφορετικά χρώματα χαπιών, αντικειμένων κ.α. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι υπάρχουν τρόποι που βοηθούν κάποιον να αντιμετωπίσει την αδυναμία του να ξεχωρίσει τα χρώματα. Για

παράδειγμα, κάποιος με αχρωματοψία μπορεί να ξεχωρίσει τα ρούχα του μέσα στην ντουλάπα του βάζοντας ταμπελίτσες ή να βάλει σε συγκεκριμένη θέση τα πράγματά του ανάλογα με το χρώμα τους ώστε να τα βρίσκει εύκολα. Ένα παράδειγμα είναι το κόκκινο χρώμα που γνωρίζουμε όλοι ότι ανάβει στο επάνω μέρος του φωτεινού σηματοδότη ακόμα και αν δεν το αναγνωρίζουμε. Τέλος θα πρέπει να πούμε πως η αχρωματοψία έχει και κάποια «πλεονεκτήματα». Τα άτομα που πάσχουν από αχρωματοψία αναζητούν περιγράμματα προκειμένου να αντισταθμίσουν τη σύγχυση των χρωμάτων, γι' αυτόν τον λόγο μπορούν, για παράδειγμα, να διακρίνουν εύκολα οτιδήποτε ή οποιονδήποτε καμουφλάρεται. Ακόμη τα άτομα αυτά έχουν αυξημένη νυκτερινή όραση σε σχέση με τα άτομα που έχουν φυσιολογική όραση.

Κεφάλαιο 4 : Τεστ Ισιχάρα

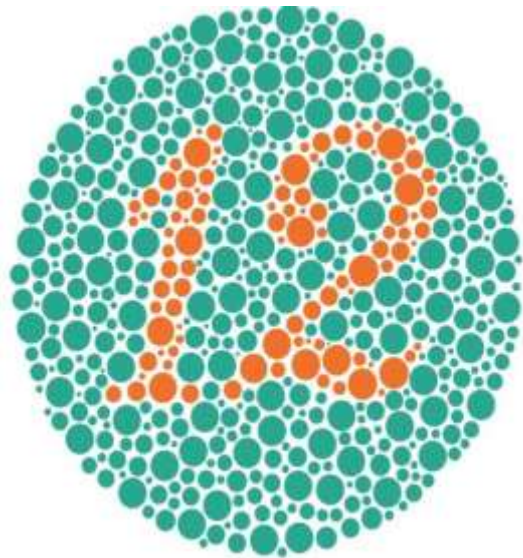
Το τεστ Ισιχάρα είναι ένα διαγνωστικό τεστ της χρωματικής αντίληψης της ανθρώπινης όρασης και κυρίως του κόκκινου και του πράσινου. Πήρε το όνομά του από τον Ιάπωνα

γιατρό Σινόμπου Ισιχάρα (Shinobu Ishihara 1879 -1963), καθηγητή στο πανεπιστήμιο του Τόκιο, ο οποίος πρώτος δημοσίευσε το τεστ αυτό το 1917 (εικόνα 31) .



Εικόνα 31 : Ισιχάρα και τεστ.

Το τεστ αποτελείται από μια σειρά από χρωματιστές πλάκες, καθεμιά από τις οποίες περιέχει ένα κύκλο με κουκίδες που εμφανίζονται με τυχαία επιλογή σε χρώμα και μέγεθος. Οι κουκίδες σχηματίζουν έναν αριθμό, ο οποίος γίνεται ορατός από ανθρώπους με φυσιολογική στα χρώματα όραση, ενώ στους ανθρώπους με κάποια πάθηση ο αριθμός είτε δεν γίνεται εύκολα αντιληπτός, είτε είναι αδύνατον να διακριθεί. Πλήρες αποτελείται από 38 πλάκες, αλλά η ύπαρξη της χρωματικής ανεπάρκειας στην όραση γίνεται συνήθως σαφής μετά από μερικές πλάκες. Η δοκιμασία των πρώτων 24 πλακών δίνει μία πιο ακριβή διάγνωση της σοβαρότητας του προβλήματος (εικόνα 32)



Εικόνα 32 : Τεστ Ισιχάρα και πλάκες ελέγχου.

Οι συνηθισμένες πλάκες περιλαμβάνουν έναν κύκλο με τελείες σε αποχρώσεις του πράσινου και του μπλέ, με εντός του διαφοροποιημένο σχήμα σε αποχρώσεις του καφέ, ή έναν κύκλο από τελείες σε αποχρώσεις του κόκκινου, του πορτοκαλί και του κίτρινου χρώματος με ένα ποσοστό σε αποχρώσεις του πράσινου. Η πρώτη δοκιμή προορίζεται για την αδυναμία διάκρισης του κόκκινου και η δεύτερη του πράσινου χρώματος.

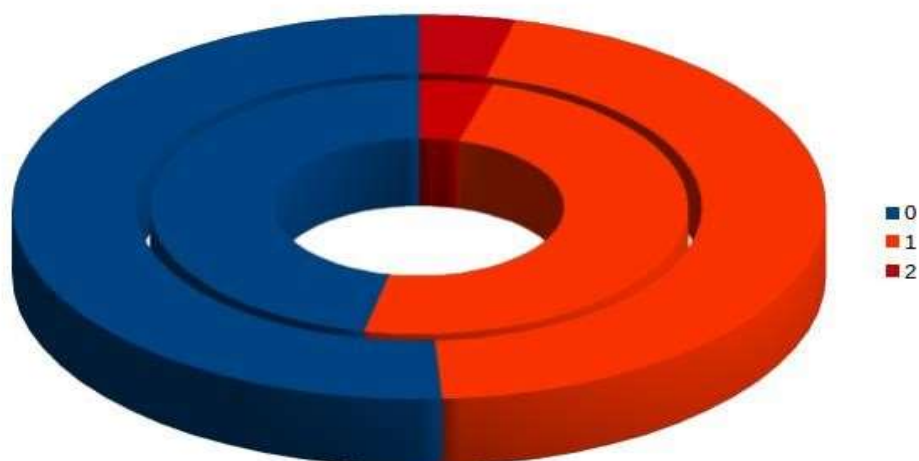
Κεφάλαιο 5 : Έρευνα αξιολόγησης χρωματικού σφάλματος

5.1 Υλικά και μέθοδοι

Η παρακάτω έρευνα συμπεριλαμβάνει ένα δείγμα 98 ατόμων τα οποία εξετάστηκαν για να διαπιστωθεί και να αξιολογηθεί το μέγεθος του χρωματικού σφάλματος. Η έρευνα έγινε μέσω του διαδικτύου χρησιμοποιώντας την εφαρμογή Colblindor (Ishihara 38 Plates CVD Test), την οποία στείλαμε στους εξεταζόμενους από την εφαρμογή του facebook. Το τεστ βρίσκεται στο ακόλουθο λίνκ: <http://www.colorblindness.com/ishihara-38-plates-cvd-test/#prettyPhoto>. Στην έρευνα που πραγματοποιήσαμε συμμετείχαν πενήντα άνδρες και πενήντα γυναίκες ανεξαρτήτου ηλικίας. Ζητήσαμε από τα άτομα να καθίσουν στον Η/Υ ή στο tablet και να κάνουν το τεστ ακολουθώντας τα 38 βήματα, ως το τελικό αποτέλεσμα, τα οποία αποτελούνταν από μια σειρά από χρωματιστές πλάκες. Στο τέλος τα άτομα κατέγραψαν το τελικό αποτέλεσμα και μας το έστειλαν σε μορφή φωτογραφίας. Μαζί με τα αποτελέσματα ρωτήσαμε την ηλικία και το τηλέφωνο ή email των εξεταζόμενων και όλα αυτά τα καταγράψαμε όπως θα φανεί παρακάτω σε ένα σχετικό πίνακα 2.

5.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα

Κατανομή Χρωματικού Σφάλματος κατά Φύλο



Εξωτερικός Δακτύλιος: Άνδρες / Εσωτερικός Δακτύλιος: Γυναίκες

Βαθμός Αχρωματοψίας		Άνδρες		Γυναίκες	
Φυσιολογική	0	27	50.9%	21	46.7%
Δυσχρωματοψία	1	24	45.3%	22	48.9%
Αχρωματοψία	2	2	3.8%	2	4.4%

Ο σκοπός της παραπάνω έρευνας ήταν για να προσδιοριστεί το ποσοστό του χρωματικού σφάλματος κατά φύλο. Τα ευρήματα που προέκυψαν από την μελέτη φαίνονται στο παραπάνω πίνακα, όπου 27 άνδρες (50,9%) εμφάνισαν φυσιολογική στα χρώματα όραση, ενώ 24 άνδρες (45,3%) εμφάνισαν δυσχρωματοψία δηλαδή την κατάσταση κατά την οποία τα άτομα δεν μπορούν να αντιληφθούν πλήρως τα χρώματα. Αχρωματοψία εμφάνισαν μόλις 2 άνδρες (3,8%), δηλαδή αδυναμία στην αντίληψη κάποιων συγκεκριμένων χρωμάτων όπως το κόκκινο και πράσινο ή το μπλε και κίτρινο. Από την άλλη στο γυναικείο φύλο προέκυψε ότι 21 γυναίκες (46,7%) εμφάνισαν φυσιολογική στα χρώματα όραση, ενώ 22 γυναίκες (48,9%) εμφάνισαν δυσχρωματοψία. Μόλις δύο γυναίκες (4,4%) εμφάνισαν αχρωματοψία.

Συμπεραίνοντας, παρατηρούμε ότι τα ποσοστά είναι σχεδόν τα ίδια και στα δύο φύλα. Στο σύνολό τους οι γυναίκες εμφανίζουν λίγο μεγαλύτερα ποσοστά σε σχέση με τους

άνδρες στη περίπτωση της δυσχρωματοψίας που είναι συνήθως κληρονομική, κάτι το οποίο δεν ήταν αναμενόμενο αφού σύμφωνα με τη βιβλιογραφία καταγράφονται μεγαλύτερα ποσοστά για τους άνδρες.

Βιβλιογραφία

1. Optics of the Human Eye. Atschison, Smith, 2003
2. Εισαγωγή στην Οφθαλμολογία και στη Νευροοφθαλμολογία. Κωνσταντίνος

Γ.Ψύλλας. University Studio Press.

3. Νευροφυσιολογία του αμφιβληστροειδή και των οπτικών οδών, Σ.Πλαϊνής – Τσιλιμπάρης – Παλληκάρης, Οφθαλμολογία 19,4 (2007)
4. Αντίληψη της έγχρωμης όρασης, Σ.Πλαϊνής – Ι.Παλληκάρης, Οφθαλμολογικά χρονικά (2006)
5. Σημειώσεις ΠΜΣ «Οπτική & Όραση», Πλαϊνής Σ., Διακριτική ικανότητα ανθρώπινου οφθαλμού – Οπτική οξύτητα.
6. Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, Β. Γαργανουράκης, ΑΤΕΙ Ηρακλείου.

Ιστοσελίδες

http://www.graficnotes.blogspot.gr/2013/02/blog-post_28.html

http://graficnotes.blogspot.gr/2012/01/blog-post_8.html [http://digital-image-](http://digital-image-theory.blogspot.gr/p/6.html)

[theory.blogspot.gr/p/6.html](http://digital-image-theory.blogspot.gr/p/6.html) <http://light.physics.auth.gr/enc/vision.html>

http://www.schools.ac.cy/klimakio/Themata/epistimi/web_Quest_main/webquests/human

[body_web_quest_st/eyes.html](http://www.schools.ac.cy/klimakio/Themata/epistimi/web_Quest_main/webquests/human) <http://optics-optometry.blogspot.gr/2007/08/blog->

[post_31.html](http://optics-optometry.blogspot.gr/2007/08/blog-post_31.html) <http://www.athenseyehospital.gr/gr/1/diataraxes-egxrwmis-orasis-c110.html>