



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ
ΧΡΩΜΑΤΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΦΩΤΟΠΙΚΗΣ
ΟΡΑΣΕΩΣ, ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΕΣΟΠΙΚΗΣ ΟΡΑΣΕΩΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΓΡΗΓΟΡΙΟΥ Ι. ΠΟΛΥΜΕΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΦΡΑΓΚΙΣΚΟΣ ΤΟΠΑΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Προσαρμογή του τυποποιημένου χρωματομετρικού
συστήματος της φωτοπικής οράσεως, στην περιοχή της
μεσοπικής οράσεως**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γρηγορίου Ι. Πολυμερόπουλου

Συμβουλευτική Επιτροπή : Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Στέφανος Ν. Μανιάς

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 13η Μαΐου 2010.

.....
Φ. Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Κουτσοφής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ι. Α. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Γεωργιάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Σ.Ν. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α. Τσαγκρασούλης
Επίκουρος Καθηγητής
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Αθήνα, Μάιος 2010

.....
Γρηγόριος Ι. Πολυμερόπουλος

Διδάκτωρ ΕΜΠ

Copyright Γρηγόριος Πολυμερόπουλος, 2010.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

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

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

Περίληψη

Αντικείμενο της διατριβής είναι η μελέτη της αντίληψης χρώματος της ανθρώπινης όρασης σε χαμηλά επίπεδα φωτισμού. Το αίσθημα της όρασης προκαλείται από την ενεργοποίηση των φωτο-υποδοχέων του ανθρώπινου οφθαλμού, τα κωνία και τα ραβδία. Σε πολύ χαμηλά επίπεδα φωτισμού (υπό το φως των αστερών) ενεργά είναι μόνο τα ραβδία και η απόκριση του ανθρώπινου οφθαλμού περιγράφεται από τη σκοτοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας, οπότε δεν διακρίνονται χρώματα. Σε υψηλά επίπεδα φωτισμού (φως ημέρας) μόνο τα κωνία είναι ενεργοποιημένα και η απόκριση του ανθρώπινου οφθαλμού περιγράφεται από τη φωτοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου, οπότε υπάρχει πλήρης αντίληψη χρωμάτων. Στην ενδιάμεση περιοχή, τη μεσοπική, η όραση οφείλεται στη συνδυασμένη δράση κωνίων και ραβδίων. Ο βαθμός συμμετοχής κωνίων και ραβδίων στην όραση στη περιοχή αυτή εξαρτάται από τα επίπεδα λαμπρότητας. Τα χρώματα γίνονται αντιληπτά σε μεταβλητό βαθμό χρωματικού κορεσμού. Η παρούσα διατριβή έχει σκοπό να ερευνήσει την αντίληψη των χρωμάτων στην μεσοπική όραση. Ο σκοπός επιτυγχάνεται με τρεις επί μέρους στόχους. Ο πρώτος εξετάζει την προσθετικότητα της χρωματικής αντίληψης σε μεσοπικά επίπεδα φωτισμού. Αναπτύσσεται ένα τετραχρωματικό μοντέλο για την περιγραφή των χρωμο-ερεθισμάτων, έγκυρο για κάθε επίπεδο προσαρμογής του οφθαλμού. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή χρωματικών ταυτίσεων με ανθρώπινα υποκείμενα. Ο δεύτερος στόχος της διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου για τη φασματική ευαισθησία στην μεσοπική όραση, που βασίζεται σε πειραματικές τριχρωματικές ταυτίσεις με ανθρώπινα υποκείμενα, ανάλογες με αυτές που γίνονται στην φωτοπική όραση. Η μαθηματική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων οδήγησε στη κατασκευή ενός μοντέλου που περιγράφει την φασματική ευαισθησία στη μεσοπική όραση. Το μοντέλο δίνει παρόμοια αποτελέσματα με άλλα ήδη υπάρχοντα μοντέλα. Ο τρίτος και κυριότερος στόχος της διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου για τη αντίληψη χρώματος στην μεσοπική όραση με χρήση πειραματικών μεθόδων που βασίζονται σε τριχρωματικές ταυτίσεις με ανθρώπινα υποκείμενα, ανάλογες με αυτές που γίνονται στην φωτοπική όραση. Στο τέλος εκτίθενται παραδείγματα, στα οποία φαίνεται η αλλαγή χρωματικότητας και φωτεινότητας φωτεινών πηγών σε διάφορα επίπεδα προσαρμογής του οφθαλμού στην μεσοπική περιοχή οράσεως.

Λέξεις κλειδιά:

Μεσοπική όραση, μεσοπικά μοντέλα, περιφερειακή όραση, χρωματομετρία, συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης, τετραχρωματικό μοντέλο, αντίληψη χρωμάτων.

Abstract

The aim of this dissertation is the study of color perception in human vision in low lighting levels. The sense of vision is provoked by the activation of the photoreceptors of the human eye, cones and rods. At very low lighting levels (under the star light) only rods are active and the spectral response of the human eye is given by the scotopic efficiency function. In that case no colors can be discern. At high lighting levels (daylight) only cones are active and the spectral response of the human eye is given by the photopic luminous efficiency function. In this case there is full color perception. In the intermediate region, which is named the mesopic region, the sense of vision is due to the combined action of both cones and rods. The degree of contribution of cones and rods in this visual region depends on the luminance levels. The colors are perceived in a variable degree of saturation.

The goal of this dissertation is the investigation of the color perception within mesopic range. This goal is fulfilled with three aims in parts. The first aim is the additivity of color perception within mesopic range to be examined. A tetrachromatic color model has been developed for the description of the color stimuli, valid in any adaptation level of the human eye. An experimental apparatus has been designed suitable for color matching used by human subjects. The second aim of this dissertation is a model development describing the spectral sensitivity of the human eye under mesopic conditions. This model is based upon experimental trichromatic matches made by human subjects analogous to those in photopic vision. This model provides comparable results to other existing models. The third aim, which is the most important one, is the development of a mesopic color perception model. This model is based upon both the tetrachromatic model and on trichromatic color matches within mesopic region. In the end some examples are exposed. In these the change of chromaticity and brightness is shown in various levels of light adaptation within mesopic region.

Key words:

Mesopic vision, mesopic models, peripheral vision, colorimetry, color matching function, tetrachromatic model, color perception.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ ολόθερμα τον κ. Φ. Β. Τοπαλή. Η συμβολή του στην εκπόνηση της διατριβής, ήταν καταλυτική. Με καθοδήγησε με υπομονή, με περιέβαλε με εμπιστοσύνη. Η ηθική υποστήριξη που μου παρείχε, με βοήθησε να ολοκληρώσω αυτή την μελέτη. Η υλική υποστήριξη επίσης ήταν αμέριστη. Αγοράστηκαν όργανα υψηλού κόστους, έγιναν εξειδικευμένες κατασκευές. Όλα αυτά δεν μπορεί να μην εκτιμηθούν. Χωρίς αυτά η όλη μελέτη θα ήταν αδύνατη.

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Σ. Ν. Μανιά και τον κ. Ι. Α. Σταθόπουλο, για την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλαν, και την υποστήριξη που μου παρείχαν, ως μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής.

Ευχαριστώ και τα μέλη των Εργαστηρίων Φωτοτεχνίας και Υψηλών Τάσεων, τα οποία δημιουργούν περιβάλλον συναδελφικότητας και αλληλεγγύης στο οποίο εύκολα μπόρεσα να ενταχθώ. Φυσικά όταν χρειαζόταν πάντα μπορούσα να υπολογίζω στην βοήθεια τους. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Ι. Φ. Γκόνο, ο οποίος, με καθοδήγησε σε θέματα οργάνωσης, αναζήτησης βιβλιογραφίας κ.ά. Πολλές ευχαριστίες εκφράζω και στους συνάδελφους μου κ. Ν. Β. Μπισκετζή και κ. Κ. Α. Μπουρούση με τους οποίους η συνεργασία ήταν άριστη και εποικοδομητική.

Τέλος θα πρέπει να ευχαριστήσω και τους φοιτητές που μετείχαν στη πειραματική διαδικασία για την υπομονή και το ενδιαφέρον που επέδειξαν.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Εισαγωγή	1
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	5
2.1. Φυσιολογία	5
2.1.1. Ο οφθαλμός	5
2.1.2. Ψυχο-φυσιολογικά φαινόμενα	9
2.2. Φωτομετρία	14
2.2.1. Γενικά	14
2.2.2. Οι νόμοι του Abney	16
2.2.3. Μετρήσεις της οπτικής ανταπόκρισης	18
2.2.4. Είδη μετρήσεων φασματικής ευαισθησίας	20
2.2.5. Μεσοπικά φωτομετρικά μοντέλα	23
2.3. Χρωματομετρία	27
2.3.1. Γενικά	27
2.3.2. Οι χρωματικές θεωρίες της ανθρώπινης οράσεως	28
2.3.3. Οι νόμοι του Grassmann	31
2.3.4. Αποτυχία της προσθετικότητας	31
2.3.5. Ο τριχρωματικός χώρος	32
2.3.6. Βασικές χρωματομετρικές σχέσεις	32
2.3.7. Φανταστικά χρωμο-ερεθίσματα	33
2.3.8. Χρωματομετρικοί μετασχηματισμοί	34
2.3.9. Ο τυπικός παρατηρητής CIE 1931	34
2.3.10. Ο τυπικός παρατηρητής CIE 1964	39
2.3.11. Θερμοκρασία χρώματος	40
2.3.12. Οι τυποποιημένες φωτεινές πηγές της CIE	41
2.3.13. Ομοιόμορφοι χρωματικοί χώροι της CIE	42
2.3.14. Ελλαττωματική αντίληψη χρωμάτων	45
2.3.15. Οι ελλείψεις του MacAdam	46

2.3.16.	Τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης	50
2.4.	Αναγνώριση χρωμάτων στην μεσοπική όραση	52
3.	Στόχοι της διατριβής	53
4.	Πειραματική διερεύνηση	55
4.1.	Στόχοι της πειραματικής διάταξης	55
4.2.	Διατάξεις που αναπτύχθηκαν	55
4.3.	Μεθοδολογία πειραμάτων χρωματικής ταύτισης με ανθρώπινα υποκείμενα	57
4.4.	Προκαταρκτικά πειράματα τριχρωματικών ταυτίσεων, με στόχο να ερευνηθεί η σταθερότητά τους στην μεσοπική όραση	58
5.	Το τετραχρωματικό μοντέλο	61
5.1.	Η τετραχρωματική προσέγγιση	61
5.2.	Σύγκριση με το σύστημα Trezona	62
5.3.	Ισοδυναμία με το σύστημα Trezona	66
5.4.	Πειράματα τριχρωματικής και τετραχρωματικής ταύτισης με ανθρώπινα υποκείμενα στην μεσοπική όραση, με στόχο ναδειχθεί η σταθερότητα των τετραχρωματικών ταυτίσεων	66
5.5.	Φυσιολογική ερμηνεία των τετραχρωματικών ταυτίσεων	74
5.6.	Μετασχηματισμοί αλλαγής πρωτευόντων	76
5.7.	Γραφική αναπαράσταση των τετραχρωματικών πραγματικών χρωμοερεθισμάτων	78
5.8.	Πρόσημα των τετραχρωματικών συναρτήσεων	86
5.9.	Οι τετραχρωματικές συναρτήσεις ελαχίστης ισχύος	92
6.	Μοντέλο για τον υπολογισμό της μεσοπικής λαμπρότητας, από τριχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης	97

6.1. Τριχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης στην μεσοπική όραση	97
6.2. Θεωρητική θεμελίωση του μοντέλου για τον υπολογισμό της μεσοπικής λαμπρότητας στην μεσοπική όραση	98
6.3. Πειράματα τριχρωματικής ταύτισης με ανθρώπινα υποκείμενα στην μεσοπική όραση με στόχο να προσδιορισθούν οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης	101
6.4. Ανάπτυξη του μοντέλου	104
6.5. Βελτίωση του μοντέλου	110
6.6. Αξιολόγηση του μοντέλου	114
6.6.1. Σύγκριση με άλλα μοντέλα	114
6.6.2. Εύρος χρήσεως του μοντέλου	116
7. Μοντέλο για τον υπολογισμό της μεσοπικής χρωματικότητας, από τριχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης	119
7.1. Γενικά περί μετατροπής ενός τυχαίου χρωμοερεθίσματος από 4-χρωματικό σε 3-χρωματικό	119
7.2. Πειράματα τριχρωματικής ταύτισης με ανθρώπινα υποκείμενα στην μεσοπική όραση με στόχο να προσδιορισθούν οι μεσοπικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης	121
7.3. Υπολογισμός των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης	123
7.4. Αλλαγή πρωτευόντων σε XYZ σε κάποια ισχύ	125
7.5. Ανάπτυξη του τριχρωματικού μοντέλου μεσοπικής χρωματομετρίας	126
7.6. Προσδιορισμός των παραμέτρων a_{yE} , a_{xE} , a_{zE}	129
7.7. Υπολογισμός των μεσοπικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης $x_E(\lambda)$, $y_E(\lambda)$, $z_E(\lambda)$ και των συναρτήσεων χρωματικότητας	133
7.8. Εφαρμογή του μοντέλου μεσοπικής χρωματομετρίας	135

7.9. Παράδειγμα υπολογισμού χρωματομετρικών μεγεθών χρωμο-ερεθισμάτων ύστερα από μεταβολή της ισχύος	136
7.10. Παράδειγμα υπολογισμού χρωματομετρικών μεγεθών ενός χρωμο-ερεθίσματος, που προκύπτει από υπέρθεση δύο χρωμο-ερεθισμάτων	138
7.11. Αξιολόγηση του μοντέλου	139
8. Συμπεράσματα	141
8.1. Ανακεφαλαίωση της διατριβής	141
8.2. Συμβολή της διατριβής	145
8.3. Επέκταση της διατριβής	146
Βιβλιογραφία	147
Παράρτημα	153
Πίνακας σχημάτων	157
Πίνακας πινάκων	162

1. Εισαγωγή

Η ανθρώπινη όραση είναι ένα πολύ πολύπλοκο φαινόμενο υποκειμενικής φύσεως. Μία από τις αιτίες της πολυπλοκότητας αυτής είναι το γεγονός ότι στον οφθαλμό υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη ανιχνευτών φωτός, τα κωνία και τα ραβδία. Ως εκ τούτου τρεις διαφορετικές μορφές οράσεως μπορούν να πιστοποιηθούν:

1. Η **φωτοπική** όραση, όταν η λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο οφθαλμός είναι σε υψηλά επίπεδα. Τα ενεργά στοιχεία είναι κυρίως τα κωνία, τα οποία ευρίσκονται σε μεγάλες συγκεντρώσεις στην ωχρά κηλίδα (εκεί δηλαδή που ο οπτικός άξονας συναντά τον αμφιβληστροειδή), ενώ περιφερειακά μειώνονται γρήγορα. Τέτοιου είδους όραση είναι η συνήθης με το φως της ημέρας. Η αντίληψη των χρωμάτων είναι πλήρης.

2. Η **σκοτοπική** όραση, όταν η λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο οφθαλμός είναι σε χαμηλά επίπεδα. Τα ενεργά στοιχεία είναι τα ραβδία, τα οποία λείπουν από την ωχρά κηλίδα, ενώ υπάρχουν σε πολύ μεγάλες ποσότητες περιφερειακά. Τέτοιου είδους όραση επιτυγχάνεται την νύχτα με το φως των αστέρων. Ο οφθαλμός δεν αντιλαμβάνεται χρώματα.

3. Η **μεσοπική** όραση, όταν τα επίπεδα λαμπρότητας του φωτός είναι μεταξύ των δύο παραπάνω περιπτώσεων. Ενεργά στοιχεία εδώ είναι και τα ραβδία και τα κωνία, σε διαφορετικό όμως βαθμό το κάθε ένα είδος. Τέτοιου είδους όραση είναι συνηθισμένη με το σεληνόφως και με το φως των μικρών αστικών δρόμων. Η αντίληψη των χρωμάτων είναι ελλιπής.

Η παρούσα διατριβή έχει σαν αντικείμενο την μελέτη της αντιλήψεως των χρωμάτων από τον ανθρώπινο οφθαλμό, στην περιοχή της μεσοπικής οράσεως.

Όσον αφορά στην μεσοπική φωτομετρία, ίδια η μεσοπική περιοχή οράσεως άργησε να μελετηθεί. Ήδη από την δεκαετία του 1920 προτάθηκε από την Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού (Commission Internationale de l'Éclairage – CIE) ένα πρότυπο φωτομετρικό σύστημα, το οποίο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην φωτοπική όραση. Γρήγορα όμως έγινε αντιληπτό, ότι αυτό το σύστημα δεν έδινε ακριβή αποτελέσματα στις άλλες περιοχές οράσεως. Αρκετά αργότερα, στην δεκαετία του 1950, προτάθηκε ένα παράλληλο φωτομετρικό σύστημα για την σκοτοπική περιοχή, το οποίο όμως δυστυχώς διαπιστώθηκε, ότι δεν είχε πρακτικά σχεδόν καμία εφαρμογή. Για την μεσοπική περιοχή δεν προτάθηκε κάποιο σύστημα, παρ' όλη την σχετική ανεπάρκεια των δύο άλλων φωτομετρικών συστημάτων, λόγω της πολυπλοκότητας και της πολυπαραμετρικότητας αυτής της οράσεως.

Οι πρώτες μελέτες για την μεσοπική περιοχή έγιναν ήδη το 1958 από την J. A. Kinney. Ακολούθησαν πολλές άλλες. Με όλες τις μετρήσεις που έγιναν, διαπιστώθηκαν δυο

αναπάντεχα γεγονότα:

1. Η ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού δεν είναι σταθερή και δεδομένη, όπως στη φωτοπική και σκοτοπική όραση, αλλά μεταβλητή, εξαρτώμενη από το «πόσο δυνατό είναι το φως».

2. Οι διάφορες ικανότητες του ανθρώπινου οφθαλμού, όπως η αντίληψη των χρωμάτων, η αντίληψη της φωτεινότητας, η οπτική οξύτητα, η αντίληψη της κινήσεως κ.λ.π., δεν έχουν σταθερή σχέση μεταξύ τους, όπως στην φωτοπική και σκοτοπική όραση, αλλά μεταβλητή.

Αυτά τα δύο γεγονότα οφείλονται βεβαίως στην μεταβλητή συνεισφορά των ραβδίων και των κωνίων στην όραση και είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο άργησε τόσο πολύ η μελέτη της μεσοπικής οράσεως, μέχρι το σημείο να μην υπάρχει μέχρι σήμερα ένα τυποποιημένο φωτομετρικό σύστημα για αυτή την περιοχή. Αντ' αυτού χρησιμοποιείται το φωτοπικό σύστημα σε κάθε (μη σκοτοπική) περίπτωση. Δεδομένου ότι οι περιπτώσεις μεσοπικής οράσεως περιλαμβάνουν και τον φωτισμό δρόμων μικρής και μεσαίας κυκλοφορίας, αντιλαμβάνεται κανείς, ότι η τρέχουσα πρακτική δεν δίνει παρά κατά το μάλλον ή ήττον ανακριβή αποτελέσματα, με τεράστιες όμως οικονομικές (και όχι μόνο) συνέπειες.

Έχοντας συνειδητοποιήσει αυτή την έλλειψη, διάφοροι ερευνητές, όπως οι Palmer, Kokoschka, Trezona, Ikeda, Sagawa, Adrian, Lewin, Rea κ.λ.π. πρότειναν κάποια φωτομετρικά μοντέλα για την μεσοπική όραση. Δυστυχώς όμως, το κάθε ένα από αυτά παρουσιάζει ατέλειες για διαφορετικούς λόγους, οι οποίες οφείλονται είτε σε υπεραπλοποιημένες παραδοχές, είτε σε όχι καλά καθορισμένα μετρητικά δεδομένα. Όταν κάποιος θελήσει να εφαρμόσει τα αποτελέσματα αυτών των μοντέλων σε μία μελέτη φωτισμού δρόμου, διαπιστώνει, ότι το κάθε μοντέλο δίνει διαφορετική τιμή, με συνέπεια να μην είναι σίγουρος για το τι πρέπει να εφαρμόσει. Ένας μηχανικός δεν θα μπορούσε σοβαρά να βασιστεί εξ ολοκλήρου σε κάποιο από αυτά τα μοντέλα.

Όσον αφορά ειδικά στην χρωματομετρία, η CIE πρότεινε το 1931 τις λεγόμενες «συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης» των 2° και το 1964 τις αντίστοιχες των 10° οπτικού πεδίου. Με αυτές τις συναρτήσεις είναι δυνατόν να περιγραφεί μονοσήμαντα το χρώμα οποιουδήποτε φωτοερεθίσματος. Κατ' αναλογία με την φωτομετρία, αυτές έχουν ευρύτατες εφαρμογές στην βιομηχανία, αλλά έχουν πλήρη εφαρμογή στην φωτοπική περιοχή οράσεως. Όμως, για την μεσοπική περιοχή είναι ελαττωματικές. Η μόνη αξιόλογη προσπάθεια για ανάπτυξη μεσοπικών «συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης» έγινε από την P. Trezona, με τις «τετραχρωματικές συναρτήσεις» της. Από εκεί και πέρα, τίποτα.

Η παρούσα διατριβή φιλοδοξεί να συμβάλει, κατά το μέτρο του δυνατού, στην κάλυψη αυτού του κενού. Θα επιχειρηθεί να κατασκευασθούν «μεσοπικές συναρτήσεις χρωματικής

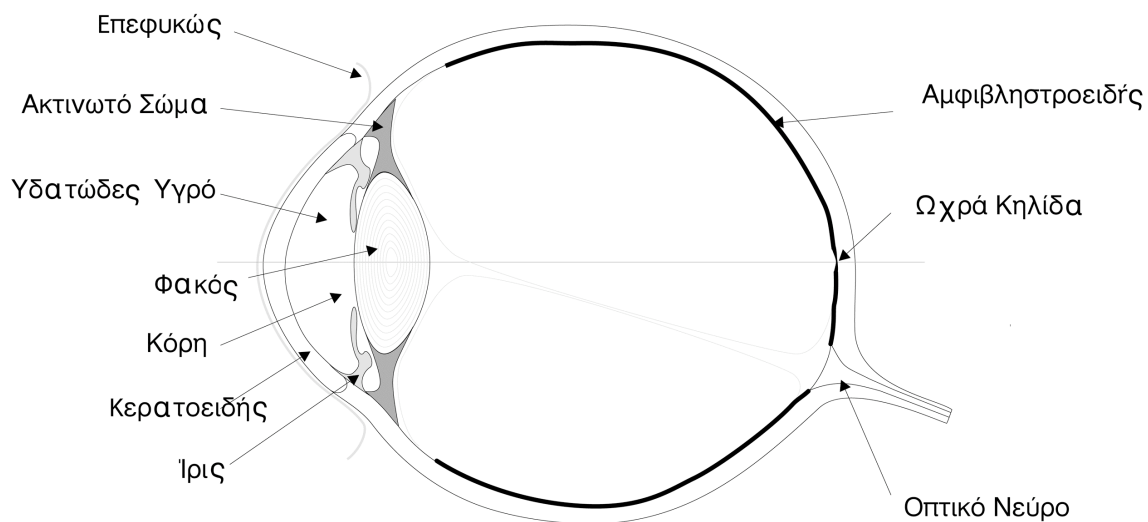
ταύτισης» βάσει της ιδέας των αντίστοιχων τετραχρωματικών της Trezona. Αυτό αναμένεται να τύχει εφαρμογής από τους μηχανικούς, που ασχολούνται με μελέτες φωτισμού, όπου οι συνθήκες οράσεως είναι μεσοπικές. Αυτό θα επιτευχθεί με μία σειρά μετρήσεων με ανθρώπινα υποκείμενα, σε πειραματική διάταξη, που θα κατασκευασθεί επί τούτο. Στην συνέχεια οι τιμές των μετρήσεων θα επεξεργασθούν, με σκοπό να δημιουργηθεί ένα μαθηματικό μοντέλο από αυτές.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1. Φυσιολογία

2.1.1. Ο οφθαλμός

Ο οφθαλμός είναι ένα όργανο αξιοσημείωτης κατασκευής [1]. Είναι κατασκευασμένο από τρία ομόκεντρα στρώματα, που λέγονται **χιτώνες**. Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1. Ο οφθαλμός

Ο **εξωτερικός χιτώνας** ή **ινώδης χιτώνας** χωρίζεται σε δύο διαφορετικά μέρη. Το εμπρόσθιο (το ένα έκτο) είναι ο **κερατοειδής**, ενώ το οπίσθιο (τα πέντε έκτα) είναι ο **σκληρός** (το ασπράδι). Ο κερατοειδής είναι το πιο σημαντικό διαθλαστικό στοιχείο του οφθαλμού (δείκτης διαθλάσεως 1.376), συνεισφέροντας το 70% της διαθλαστικής ισχύος του οφθαλμού (43 διοπτρίες, ενώ ο φακός 20 και ολόκληρος ο οφθαλμός 60). Ο σκληρός αφετέρου είναι αδιαφανής, ανθεκτικός και ινώδης. Μοναδικός σκοπός του είναι να κρατά τον οφθαλμό σε αυτό το σχήμα.

Ο **μέσος χιτώνας** χωρίζεται σε τρία μέρη: το **χοροειδές**, το **ακτινωτό σώμα** και την **ίριδα**. Η κύρια λειτουργία του χοροειδούς είναι η διατροφή των εξωτερικών στρωμάτων του **αμφιβληστροειδούς**. Το ακτινωτό σώμα αλλάζει το σχήμα του φακού για την εστίαση του ειδώλου και παράγει το **υδατώδες υγρό** στο εξωτερικό διαμέρισμα του οφθαλμού. Το Υδατώδες αυτό υγρό βοηθά στην διάθλαση και στο φιλτράρισμα του φωτός. Η ίρις ελέγχει την ποσότητα του φωτός και βοηθά στην αύξηση του βάθους της εστίασεως. Το άνοιγμα που αφήνει η ίριδα λέγεται **κόρη**.

Η διάμετρος της κόρης αλλάζει ανάλογα με τον διάχυτο φωτισμό (κυρίως). Η κόρη συστέλλεται σε δευτερόλεπτα, αλλά διαστέλλεται σε λεπτά. Συστέλλεται δε περισσότερο, όταν υπάρχει μεγαλύτερη μπλε συμμετοχή στο φως.

Η οριζόντια διάμετρος της αλλάζει σε ένα εύρος από 2 mm έως 8 mm, δηλ. η επιφάνειά της γίνεται 16 φορές μεγαλύτερη. Άρα, αλλαγές του ανοίγματος της κόρης αλλάζουν την φωτεινή ροή 16:1. Ο οφθαλμός όμως, έχει ένα εύρος προσαρμογής 10^{10} :1. Αυτό σημαίνει ότι η κόρη παίζει πολύ μικρό ρόλο στην προσαρμογή του οφθαλμού. Πιστεύεται, ότι η λειτουργία της κόρης δεν έχει σαν σκοπό να ρυθμίζει την ποσότητα της φωτεινής ροής που μπαίνει στον οφθαλμό, ώστε να βοηθά στην προσαρμογή, αλλά στην διόρθωση των οπτικών σφαλμάτων του οφθαλμού. Σε ισχυρό φωτισμό, όπου το φως είναι άφθονο, κλείνει η κόρη, για να έχει ο οφθαλμός περισσότερη ευκρίνεια. Σε χαμηλό όμως φωτισμό, όπου πιο σημαντική είναι η αντίχενυση των αντικειμένων, παρά η ευκρίνεια των ειδώλων τους και η ανάλυση της εικόνας, η κόρη ανοίγει, για να δεχθεί ο οφθαλμός περισσότερο φως. Υπάρχουν εμπειρικοί τύποι που περιγράφουν την διάμετρο της κόρης ανάλογα με την λαμπρότητα.

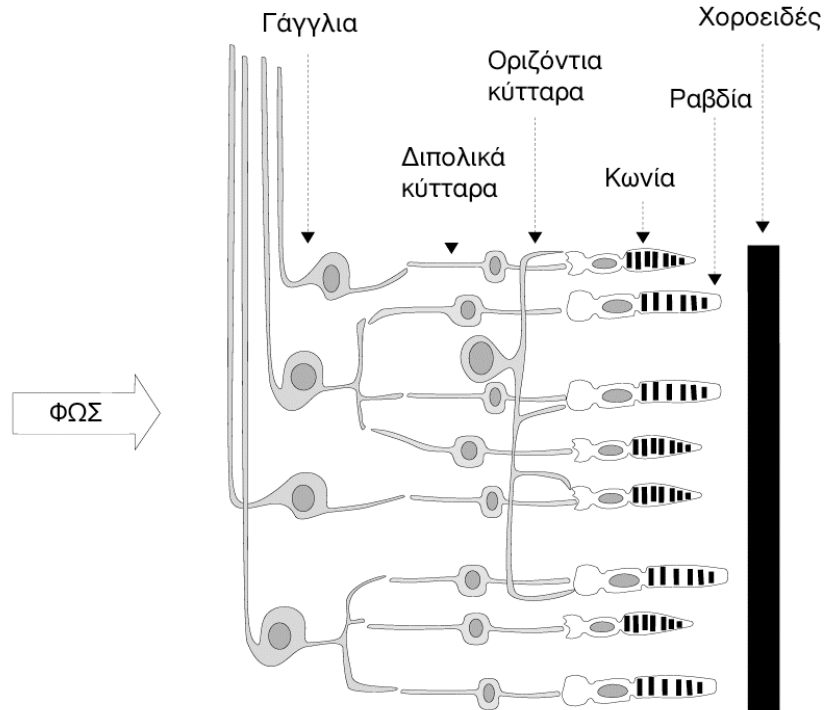
Ο **εσωτερικός ή νευρίνος χιτώνας** διαιρείται στον **αμφιβληστροειδή** και στην **ζήνναιο ζώνη**. Ο νευρίνος χιτώνας είναι προεκβολή του μέρους του εγκεφάλου, που λέγεται **διεγκέφαλον**.

Δύο σημαντικές περιοχές υπάρχουν στον αμφιβληστροειδή χιτώνα: το **τυφλό σημείο** και η **ωχρά κηλίδα**. Το τυφλό σημείο είναι εκεί όπου το **οπτικό νεύρο** καταλήγει. Εκεί δεν υπάρχουν οπτικά κύτταρα. Η ωχρά κηλίδα είναι μία λέπτυνση στον αμφιβληστροειδή 1.5 mm διαμέτρου. Το κεντρικό μέρος της ωχράς κηλίδας (διαμέτρου 0.4 mm) είναι το σημείο της ευκρινέστερης οράσεως και της καλύτερης χρωματικής αντιλήψεως.

Ο **αμφιβληστροειδής** είναι η φωτοευαίσθητη περιοχή του οφθαλμού, που μετατρέπει την φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρικούς παλμούς.

Τα κύτταρα που απαρτίζουν τον αμφιβληστροειδή είναι εξειδικευμένα νευρικά κύτταρα, και έχουν εξελικτική και μορφολογική σχέση με τα εγκεφαλικά κύτταρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μερική προεπεξεργασία των οπτικών σημάτων πριν αυτά αποχωρήσουν από τον οφθαλμό για τον εγκέφαλο.

Ενδιαφέρον χαρακτηριστικό είναι το ότι η κατασκευή του αμφιβληστροειδούς φαίνεται να έχει γίνει «ανάποδα», δηλαδή το φως πρέπει να περάσει πρώτα από την «καλωδίωση» των νευρικών κυττάρων για να φθάσει στα φωτοευαίσθητα κύτταρα, που είναι στο πίσω μέρος του αμφιβληστροειδούς.



Σχήμα 2.2. Οι συνδέσεις των κυττάρων του αμφιβληστροειδή [1].

Τα φωτοευαίσθητα κύτταρα είναι στραμμένα προς το **χοροειδές** (χρώματος μαύρου), το οποίο αυξάνει την αντίθεση εξουδετερώνοντας τις εσωτερικές ανακλάσεις. Οι φωτούποδοχείς είναι συνδεδεμένοι μέσω των **διπολικών** κυττάρων με τα **γάγγλια** (νευρικά κύτταρα).

Ο αμφιβληστροειδής περιέχει επίσης και τα **οριζόντια** κύτταρα, τα οποία συνδέουν μικρές ομάδες φωτούποδοχέων. Όταν ένας φωτούποδοχέας φωτίζεται, οι συναφείς με αυτόν άλλοι φωτούποδοχείς γίνονται από τα οριζόντια κύτταρα λιγότερο ευαίσθητοι, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την αντίθεση. Διάγραμμα του αμφιβληστροειδούς φαίνεται στο σχήμα 2-2.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες φωτούποδοχέων: τα **ραβδία** και τα **κωνία**. Αυτά έχουν παρόμοια κατασκευή: Ένας κεντρικός πυρήνας, πολλά μιτοχόνδρια για να παρέχουν χημική ενέργεια, και μία συστοιχία από δίσκους, που περιέχουν την φωτοευαίσθητη χρωστική.

Τα ραβδία είναι ευαίσθητα σε πολύ χαμηλά επίπεδα φωτισμού, αλλά φθάνουν στην μέγιστη απόδοσή τους σε μέτρια επίπεδα φωτισμού. Από εκεί και πέρα η απόδοσή τους δεν εξαρτάται από τον φωτισμό. Επέρχεται **κορεσμός**. Ο κορεσμός αρχίζει περίπου στα 10 cd/m^2 και ολοκληρώνεται στα 300 cd/m^2 .

Η φωτοευαίσθητη χρωστική στα ραβδία λέγεται **ροδοψίνη** και είναι μία πρωτεΐνη, πού βασίζεται σε μία μορφή βιταμίνης Α. Η απορρόφηση ενός φωτονίου από ένα μόριο ροδοψίνης προκαλεί σε αυτό το μόριο διέγερση. Η αποδιέγερση στη συνέχεια αυτού του μορίου ροδοψίνης προκαλεί ένα καταγισμό χημικών αντιδράσεων, ο οποίος πολλαπλασιάζει

το αρχικό ποσόν ενέργειας του φωτονίου και παράγει ένα νευρικό σήμα. Αντίθετα με την συμπεριφορά του πλείστου των άλλων νευρικών κυττάρων, τα οποία παράγουν σήματα σε ψηφιακή ναι-όχι μορφή, τα φωτοευαίσθητα κύτταρα παράγουν σήματα αναλογικά, εξαρτώμενα από την ένταση του φωτός.

Ραβδία δεν υπάρχουν στην ωχρά κηλίδα. Η πυκνότητά τους αρχίζει να αυξάνεται από μόλις έξω από αυτήν και δεν είναι κυκλικά συμμετρική γύρω από την ωχρά κηλίδα. Οι υψηλότερες πυκνότητες ραβδίων παρατηρούνται κατά μήκος ενός ελλειπτικού δακτυλίου και είναι περίπου 176000 ραβδία/mm². Το συνολικό πλήθος των ραβδίων στον ένα οφθαλμό είναι 10⁸. Η σύνδεσή τους με το οπτικό νεύρο είναι κατά χιλιάδες πάνω στην ίδια νευρική απόληξη. Αυτό το είδος συνδέσεως επιτρέπει μόνο χαμηλής ποιότητας οπτική ευκρίνεια. Αφ' ετέρου όμως τέτοιου είδους συνδέσεις δίδουν μεγαλύτερη ικανότητα αντιλήψεως κινήσεως και μαρμαρυγής (τρεμοπεξίματος). Έτσι εξηγείται το φαινόμενο ότι μπορούμε να δούμε κάτι να τρεμοπαίζει στην άκρη του ματιού μας, και το οποίο εξαφανίζεται όταν στρίβουμε το βλέμμα μας προς τα εκεί. Ομοίως, σε συνθήκες πολύ αμυδρού φωτισμού πιο δύσκολα βλέπουμε ένα αντικείμενο ατενίζοντάς το (όραση με κωνία), παρά κοιτάζοντάς το περιφερειακά, όπου τα πιο ευαίσθητα ραβδία μπορούν να το ανιχνεύσουν.

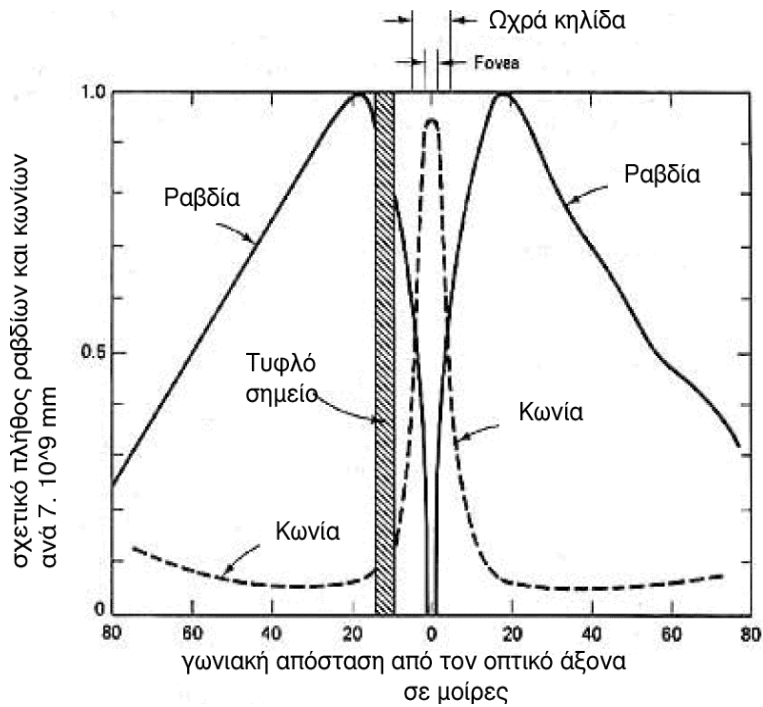
Τα ραβδία δεν αντιλαμβάνονται χρώμα, παρά μόνο μαύρο, άσπρο και αποχρώσεις του γκριζου.

Τα **κωνία** είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητα στον χαμηλό φωτισμό, αλλά μπορούν να ανταποκριθούν σε υψηλά επίπεδα φωτισμού. Δεν υπάρχει γι' αυτά κορεσμός, όπως με τα ραβδία.

Η πυκνότητα κατανομής των κωνίων είναι μέγιστη στην ωχρά κηλίδα (1.6×10^5 κωνία/mm²), και μειώνεται ταχύτατα όσο απομακρυνόμαστε από αυτή. Επίσης, αυτή δεν είναι κυκλικά συμμετρική γύρω από την ωχρά κηλίδα. Υψηλότερες πυκνότητες κωνίων παρατηρούνται στο τεταρτημόριο μεταξύ μύτης και μετώπου. Σχηματικό διάγραμμα της κατανομής των κωνίων και των ραβδίων στον οφθαλμό φαίνεται στο σχήμα 2-3.

Το συνολικό πλήθος των κωνίων στον ένα οφθαλμό είναι 5×10^6 .

Η κατασκευή των κωνίων δεν είναι ομοιόμορφη. Στην ωχρά κηλίδα είναι μακρόστενα και μοιάζουν με τα ραβδία (μήκος /διάμετρος = 60/1). Όσο όμως απομακρυνόμαστε από εκεί, γίνονται βαθμηδόν κοντόχοντρα (μήκος /διάμετρος = 40/7)

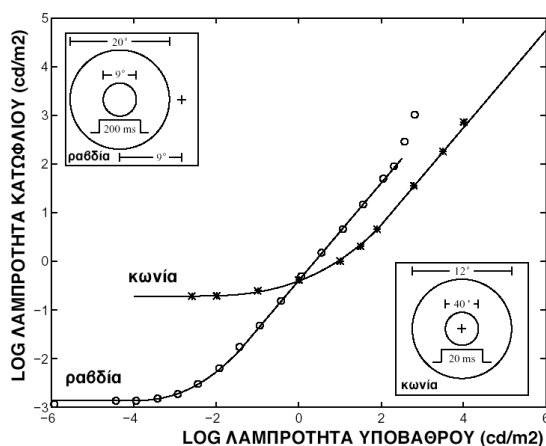


Σχήμα 2-3. Πυκνότητες των φωτο-υποδοχέων συναρτήσει της εκκεντρότητας [6].

2.1.2. Ψυχο-φυσιολογικά φαινόμενα

Μετείκασμα ονομάζεται η συνέχιση της οπτικής αντιλήψεως, όταν το ερέθισμα έχει ήδη εκλείψει. Οφείλεται στην συνέχεια των φωτοχημικών αντιδράσεων, που παράγουν νευρικούς παλμούς. Το μετείκασμα είναι ανάλογο της λαμπρότητας του αντικειμένου. Κατά το μετείκασμα τα αντικείμενα που αντιλαμβανόμαστε μπορεί να έχουν συμπληρωματικά χρώματα.

Προσαρμογή στο φως ονομάζεται το φαινόμενο της (γρήγορης) ανάληψης της οπτικής ευαισθησίας ύστερα από μία σημαντική αύξηση της εντάσεως του φωτός. Στο σχήμα 2-4 φαίνεται η γραφική παράσταση της λαμπρότητας κατωφλίου κωνίων και ραβδίων σαν συνάρτηση της λαμπρότητας υποβάθρου. Αυτό δείχνει ποσοτικά την μεταβολή της προσαρμογής των φωτο-υποδοχέων στο φως.



Σχήμα 2-4. Προσαρμογή στο φως των κωνίων και των ραβδίων [2].

Προσαρμογή στο σκοτάδι ονομάζεται το φαινόμενο της (αργής) ανάληψης της οπτικής ευαισθησίας ύστερα από μία σημαντική μείωση της εντάσεως του φωτός.

Η ικανότητα προσαρμογής ελαττώνεται με την ηλικία. Ο λογάριθμος της εντάσεως κατωφλίου για έναν έφηβο είναι 0.5 ενώ για έναν ηλικιωμένο 80 ετών είναι 3.

Με τον όρο **απόλυτο κατώφλι** εννοείται το ελάχιστο ποσόν ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, που απαιτείται για να ανιχνευθεί σε ποσοστό 50% των περιπτώσεων από έναν παρατηρητή.

Η μέτρηση του απόλυτου κατωφλίου βασίζεται στον προσδιορισμό της **συχνότητας ή πιθανότητας της καμπύλης οράσεως**.

Αν ο αμφιβληστροειδής σε απόλυτο σκοτάδι διεγείρεται από αναλαμπές φωτός και ακολούθως μετράται το ποσοστό των αναλαμπών που έγιναν αντιληπτές σε ένα πλήθος από φωτεινότητες, τότε, έχει βρεθεί, υπάρχει μία φωτεινότητα, κάτω από την οποία, ο παρατηρητής ποτέ δεν βλέπει φως, και κάποια άλλη, πάνω από την οποία, ο παρατηρητής πάντοτε αναφέρει ότι είδε. Μεταξύ αυτών των οριακών φωτεινοτήτων, εύρους περίπου μίας λογαριθμικής μονάδας, ο παρατηρητής αναφέρει πως βλέπει τη αναλαμπή, αλλά όχι πάντοτε.

Το πόσες φορές επί τοις εκατό αναφέρει ότι τη βλέπει εξαρτάται από την φωτεινότητα της αναλαμπής. Στο κάτω όριο αυτού του εύρους φωτεινοτήτων, το ποσοστό των παρατηρούμενων αναλαμπών είναι ελάχιστο, ενώ στο άνω όριο, είναι μέγιστο. Η φωτεινότητα εκείνη, κατά την οποία αναφέρεται ότι, από όλες τις αναλαμπές, έγιναν αντιληπτές μόνο το 50% του πλήθους τους, ορίζεται σαν **απόλυτο οπτικό κατώφλι**.

Η ευαισθησία του οφθαλμού είναι το αντίστροφο του οπτικού κατωφλίου. Όσο μικρότερο είναι το κατώφλι, τόσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία του οφθαλμού.

Το απόλυτο οπτικό κατώφλι δεν είναι σταθερό. Εξαρτάται από πολλές μεταβλητές. Η ανοχή σε κάποια από αυτές μπορεί να επιφέρει αξιοσημείωτες διαφορές στην μέτρηση του

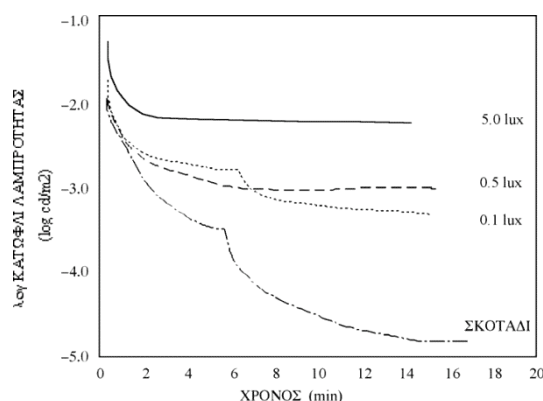
κατώφλιου.

Όταν ο οφθαλμός είναι προσαρμοσμένος σε υψηλά επίπεδα φωτισμού και μετρηθεί το απόλυτο οπτικό κατώφλι, τότε θα ευρεθεί ότι αυτό είναι περίπου 10000 φορές υψηλότερο από ότι θα ήταν, αν μετριοταν το κατώφλι με το οφθαλμό να έχει παραμείνει στο απόλυτο σκοτάδι για 30 ή 40 λεπτά προηγουμένως. Η αλλαγή της ευαισθησίας που συμβαίνει στον οφθαλμό καθώς αυτός παραμείνει στο σκοτάδι, γίνεται πολύ γρήγορα κατά τα πρώτα δύο ή τρία λεπτά, και από το πέμπτο ή έκτο λεπτό γίνεται με αργότερο ρυθμό. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης προσαρμογής, τα κωνία προσαρμόζονται στο σκοτάδι. Κατόπιν, ξεκινά η δεύτερη φάση προσαρμογής, πρώτα με γρήγορους ρυθμούς και ύστερα με αργότερους. Σε αυτή τη φάση η ευαισθησία λαμβάνει μεγάλες τιμές και σχετίζεται με την προσαρμογή των ραβδίων, στα οποία αυξάνεται η συγκέντρωση της ροδοψίνης. Με την ολοκλήρωση και της δεύτερης φάσης προσαρμογής, οι μετρήσεις που λαμβάνονται, αντιστοιχούν στο **απόλυτο τελικό κατώφλι**.

Όταν τα επίπεδα φωτισμού είναι σχετικά υψηλά, τότε η προσαρμογή του οφθαλμού στο σκοτάδι γίνεται σε μία φάση, αντί για δύο. Αυτό εξηγείται από το ότι στην φωτοπική όραση, καθώς και στην μεσοπική όραση κοντά στο φωτοπικό όριο, λειτουργούν και τα κωνία και τα ραβδία (τα οποία είναι κοντά στον κορεσμό), και έτσι το πιο ευαίσθητο σύστημα από τα δύο (τα κωνία) ανιχνεύει το ερέθισμα.

Επίσης, όσο αυξάνονται τα επίπεδα φωτισμού, τόσο η προσαρμογή στο σκοτάδι των κωνίων γίνεται πιο αργά. Άρα ο ρυθμός προσαρμογής των κωνίων στην μεσοπική όραση είναι πιο αργός από ότι στην σκοτοπική.

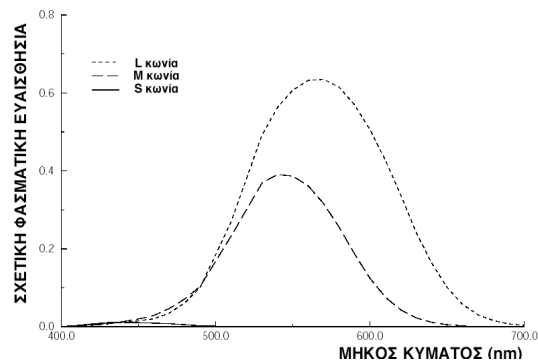
Αυτά όλα φαίνονται στο σχήμα 2-5.



Σχήμα 2-5. Προσαρμογή στο σκοτάδι σε τρία μεσοπικά επίπεδα και ένα σκοτοπικό [3]. Διακρίνεται η μοναδική φάση προσαρμογής στα δύο ανώτερα μεσοπικά επίπεδα.

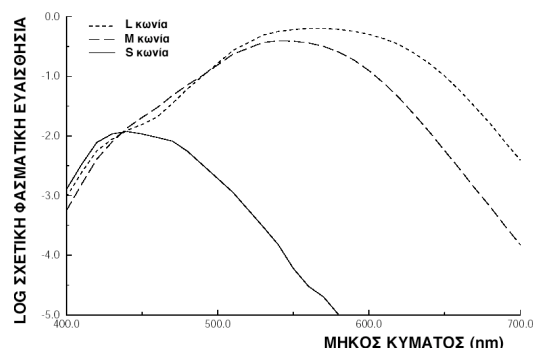
Η αντίληψη των χρωμάτων γίνεται με τη βοήθεια των κωνίων. Υπάρχουν τρία είδη κωνίων, που διαφέρουν ως προς την φωτοευαίσθητη χρωστική που περιέχουν (κυανολαβή, χλωρολαβή και ερυθρολαβή), και ως εκ τούτου στο εύρος των μηκών κύματος του φωτός, στο οποίο είναι ευαίσθητες. Αυτά τα είδη κωνίων είναι γνωστά σαν **S**, **M** και **L** κωνία (μνημονικές συντομογραφίες των Short-μικρό, Medium-μεσαίο και Long-μεγάλο μήκος κύματος). Έχουν μέγιστο ευαισθησίας αντιστοίχως στα 450 nm (ιώδες), 535 nm (πράσινο) και 570 nm (κίτρινο). Οι φασματικές τους ευαισθησίες φαίνονται στο σχήμα 2-6, όπου εμφανίζεται πως τα L και M κωνία παρουσιάζουν σημαντική αλληλοεπικάλυψη. Επίσης τα S έχουν πολύ μικρότερη ευαισθησία.

Μια συνέπεια της αλληλοεπικάλυψης των M και L κωνίων είναι ότι οι ανταποκρίσεις τους για ένα δεδομένο χρώμα έχουν μεγάλη συσχέτιση.



Σχήμα 2-6. Φασματική ευαισθησία των κωνίων [4].

Εξετάζοντάς τα σε λογαριθμικό διάγραμμα στο σχήμα 2-6, διαπιστώνεται ότι και τα τρία είδη έχουν παρόμοια χαμηλή ευαισθησία στην κυανή και ιώδη περιοχή. Σε αυτό μάλιστα το σχήμα 2-7 φαίνεται και η αλληλεπικάλυψη των τριών καμπύλων φασματικής ευαισθησίας.



Σχήμα 2-7. Φασματική ευαισθησία των κωνίων σε λογαριθμικό διάγραμμα [4].

Η ανεξάρτητη λοιπόν διαβίβαση των σημάτων τους στον εγκέφαλο θα ήταν ανεπαρκής για

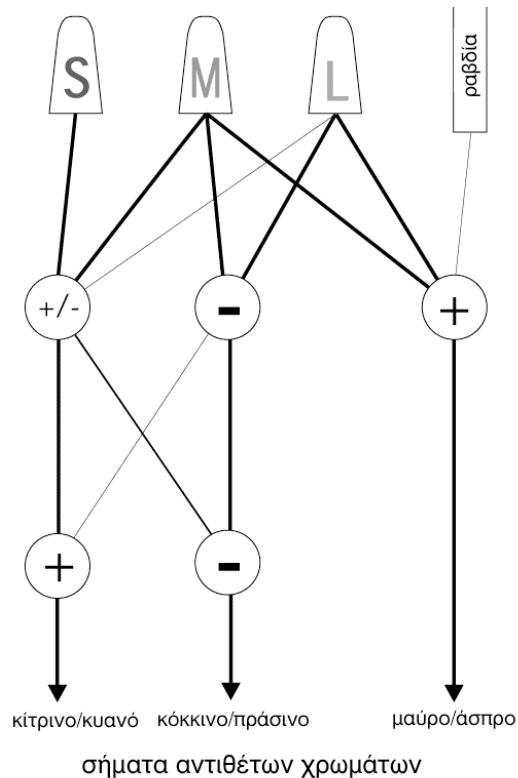
την ακριβή αντίληψη του χρώματος. Το τι στην πράξη συμβαίνει, δεν είναι απόλυτα γνωστό. Παρ' όλα αυτά όμως, οι περισσότεροι ερευνητές συμφωνούν ότι εκτός από τα ανεξάρτητα σήματα, παράγεται και η **διαφορά** των σημάτων των L και M κωνίων. Με αυτόν τον τρόπο παράγεται σήμα που ξεχωρίζει το πορτοκαλί από το κυανοπράσινο.

Επίσης παράγεται και το **άθροισμα** των L και M κωνίων, το οποίο δίνει αντίληψη της φωτεινότητας. Σε αυτό το σήμα προστίθεται και αυτό από τα ραβδία, το οποίο όμως στην φωτοπική περιοχή είναι σταθερό λόγω κορεσμού των ραβδίων. Πάντως, δεν φαίνεται να προστίθεται το σήμα των S κωνίων.

Ένα δεύτερο σήμα **διαφοράς** προκύπτει από τον συνδυασμό (με κατάλληλους συντελεστές) των σημάτων και των τριών ειδών κωνίων S, M και L. Αυτό βοηθά στην διάκριση του πρασινοκίτρινου από το κυανοπορφυρό.

Πιθανότατα στον εγκέφαλο γίνεται και άλλη επεξεργασία των σημάτων, για να παραχθούν τρία ζεύγη **αντιθέτων** χρωμάτων: μαύρο /άσπρο, κόκκινο /πράσινο και κίτρινο /κυανό.

Αυτά τα στάδια επεξεργασίας – διέγερση κωνίων και ραβδίων, αρχικός συνδυασμός και τελικός συνδυασμός – φαίνονται στο σχήμα 2-8. Το πάχος κάθε γραμμής δίδει μία ιδέα του βαθμού συμβολής κάθε παράγοντα.



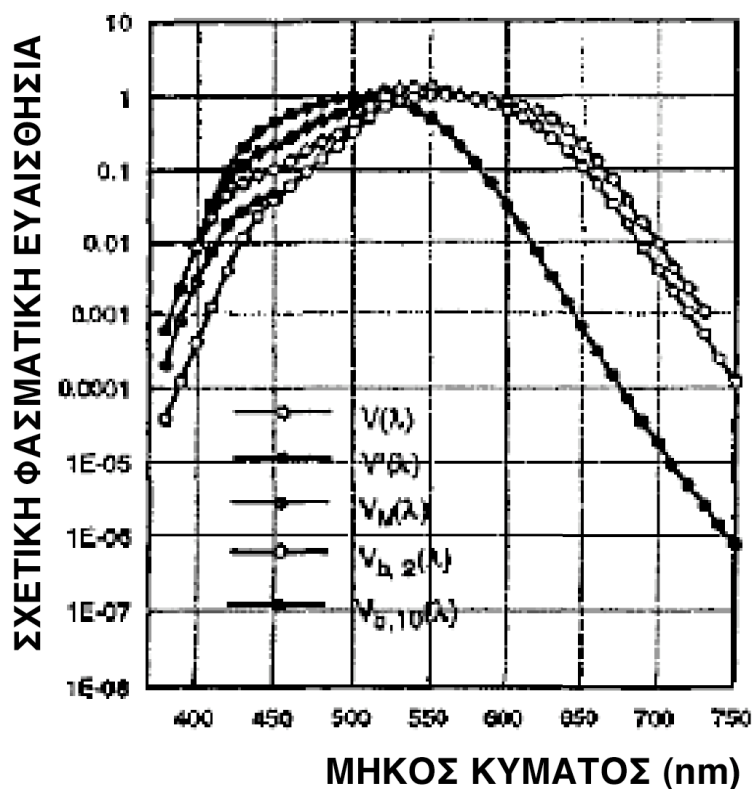
Σχήμα 2-8. Ποιοτικό διάγραμμα επεξεργασίας των ηλεκτρικών σημάτων στον οφθαλμό [4].

2.2. Φωτομετρία

2.2.1. Γενικά

Η αίσθηση της οράσεως δημιουργείται από την λειτουργία των τεσσάρων ειδών φωτοϋποδοχέων του ανθρώπινου οφθαλμού. Η διαφορετική τους απόκριση, όπως και τα διαφορετικά τους κατώφλια ενεργοποίησης και κορεσμού κάνουν την απόκριση του οφθαλμού να εξαρτάται από τα επίπεδα λαμπρότητας. Ανάλογα λοιπόν με τον τρόπο που λειτουργούν τα είδη των φωτοϋποδοχέων χωρίζουμε το εύρος της λαμπρότητας σε τρεις βασικές περιοχές [5].

Α) Την φωτοπική περιοχή για λαμπρότητα μεγαλύτερη από 3 cd/m^2 . Η όραση οφείλεται κατά κύριο λόγο στην διέγερση των κωνίων. Τα ραβδία είναι σε κατάσταση κορεσμού και η συνεισφορά τους μικρή, αλλά παρ' όλα αυτά αρκετή για να προκαλέσει διαφοροποίηση της απόκρισης του οφθαλμού, όταν τα πεδία έχουν μεγάλο εύρος η δεν είναι κεντρικά. Η φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού περιγράφεται από τις καμπύλες $V(\lambda)$ για αχρωματική ταύτιση στις 2° , $V_M(\lambda)$ η βελτιωμένη από τους Judd και V_{0s} στις 2° , $V_{10}(\lambda)$ για αχρωματική ταύτιση στις 10° , $V_{b,2}(\lambda)$ για χρωματική ταύτιση στις 2° και τέλος $V_{b,10}(\lambda)$ για χρωματική ταύτιση στις 10° . Γραφική παράσταση όλων αυτών των φωτοπικών καμπύλων φαίνεται στο σχήμα 2-9.



Σχήμα 2-9. Οι τυποποιημένες φωτοπικές καμπύλες της CIE [6].

Η καμπύλη $V(\lambda)$ δεν είναι εντελώς ακριβής ακόμα και για τις συνθήκες, για τις οποίες κατασκευάστηκε. Στα άκρα του ορατού φάσματος, η φασματική ευαισθησία είναι μεγαλύτερη.

Ο Judd το 1951 [7] πρότεινε μια θεμελιώδη επανεξέταση της $V(\lambda)$, με σκοπό να βελτιώσει την συνάρτηση στα μικρά μήκη κύματος. Διατήρησε τις τιμές της συνάρτησης για μήκη κύματος μεγαλύτερα από τα 460nm και αύξησε τις τιμές στα μικρότερα. Ο Vos το 1978 [8] έκανε περαιτέρω διορθώσεις.

Οι διορθώσεις αυτές έγιναν αποδεκτές από την διεθνή επιτροπή φωτισμού και έτσι κατασκευάστηκε η Judd-Vos modified CIE $V(\lambda)$, η οποία είναι γνωστή και σαν $VM(\lambda)$. Οι διορθώσεις αυτές όμως θεωρείται, ότι συμπληρώνουν την $V(\lambda)$, δεν την αντικαθιστούν.

Από αυτές όλες, οι $V_{b2}(\lambda)$ και $V_{b10}(\lambda)$ δεν στηρίζουν την προθετικότητα. Όσον αφορά στην συνεισφορά των ραβδίων, αυτή για κεντρική όραση 2° είναι μηδενική. Για περιφερειακή όραση είναι μηδενική για λαμπρότητες πάνω από 1000 cd/m^2 . Μέχρι αυτή την λαμπρότητα όμως η συνεισφορά τους είναι σημαντική για το μέγεθος της κόρης, άρα υπολογίσιμη για την αίσθηση της φωτεινότητας. Ο Berman [10] βρήκε ότι για δύο πηγές ίδιας χρωματικότητας και ίδιας λαμπρότητας (στην φωτοπική περιοχή), αυτή που έχει μεγαλύτερη σκοτοπική λαμπρότητα, φαίνεται φωτεινότερη. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για φωτισμό εσωτερικού χώρου.

Β) Την σκοτοπική περιοχή για λαμπρότητα μικρότερη από 10^{-3} cd/m^2 , όπου η όραση οφείλεται αποκλειστικά στην διέγερση των ραβδίων. Τα επίπεδα λαμπρότητας είναι χαμηλότερα από τα κατώφλια ενεργοποίησης των κωνίων. Η φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού περιγράφεται από την καμπύλη $V'(\lambda)$. Η προθετικότητα ισχύει.

Γ) Την μεσοπική περιοχή. Μια μεταβατική περιοχή από το ένα είδος όρασης στο άλλο. Στην μεσοπική περιοχή, στην αίσθηση της όρασης συνεισφέρουν όλα τα είδη φωτοϋποδοχέων του οφθαλμού. Δεν περιγράφεται από κάποια συγκεκριμένη καμπύλη φασματικής ευαισθησίας. Δεν θα μπορούσε μάλιστα να περιγραφεί από ένα ορισμένο είδος καμπύλης, αλλά από ολόκληρη οικογένεια ομοειδών καμπύλων. Υπάρχουν δύο σημαντικά φαινόμενα, τα οποία αποτρέπουν κάποια από τις φωτοπικές καμπύλες φασματικής ευαισθησίας να χρησιμοποιηθούν στην μεσοπική περιοχή. Το ένα είναι ότι τα φωτο-ερεθίσματα υψηλού κορεσμού φαίνονται φωτεινότερα από τα αχρωματικά που έχουν την ίδια λαμπρότητα (luminance). Το δεύτερο είναι το **η μετατόπιση του Purkinje (Purkinje shift)**, δηλαδή ότι σε χαμηλότερα επίπεδα λαμπρότητας τα μικρού μήκους κύματος ερεθίσματα φαίνονται φωτεινότερα από αυτά των μεγάλων μηκών κύματος της ίδιας λαμπρότητας (luminance) [6].

2.2.2. Οι νόμοι του Abney

Έχουν διατυπωθεί οι εξής νόμοι, οι οποίοι ισχύουν για την σκοτοπική όραση και εν πολλοίς για την φωτοπική.

Συμμετρικός: Αν το φωτο-ερέθισμα **A** ταυτίζεται σε λαμπρότητα με το **B**, τότε και το **B** ταυτίζεται σε λαμπρότητα με το **A**.

Μεταβατικός: Αν το φωτο-ερέθισμα **A** ταυτίζεται σε λαμπρότητα με το **B**, και το **B** με το **Γ**, τότε αναγκαστικά και το **A** ταυτίζεται οπτικά με το **Γ**.

Αναλογικός: Αν το φωτο-ερέθισμα **A** ταυτίζεται σε λαμπρότητα με το **B**, τότε αν πολλαπλασιάσουν και τα δύο φωτο-ερεθίσματα επί τον ίδιο θετικό αριθμό α , το $\alpha\mathbf{A}$ θα ταυτίζεται οπτικά με το $\alpha\mathbf{B}$.

Προσθετικός: Αν το φωτο-ερέθισμα **A** ταυτίζεται σε λαμπρότητα με το **B**, και το φωτο-ερέθισμα **Γ** με το **Γ**, τότε και το φωτο-ερέθισμα **A+Γ** ταυτίζεται σε λαμπρότητα με το **B+Δ**.

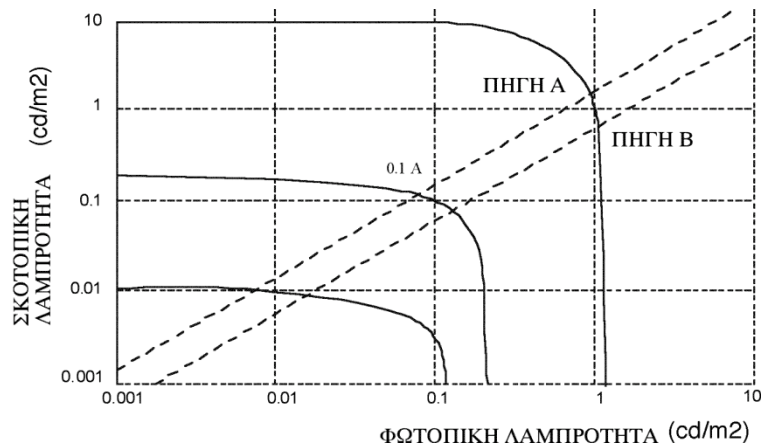
Οι νόμοι του Abney της προσθετικότητας και της αναλογικότητας δεν ισχύουν στην μεσοπική όραση. Στην φωτοπική όραση γενικά ισχύουν, εκτός και αν πρόκειται για φωτο-ερεθίσματα υψηλού κορεσμού.

Ο νόμος της αναλογικότητας δεν ισχύει στην μεσοπική περιοχή εκτός από την περίπτωση όπου η πηγή έχει τον λόγο S/P σταθερό (S = σκοτοπική λαμπρότητα, P = φωτοπική λαμπρότητα). Αυτό μπορούμε να το αποδείξουμε κάνοντας ένα γράφημα, όπου ο x άξονας παριστά την φωτοπική λαμπρότητα και ο y την σκοτοπική. Ο λόγος S/P εξαρτάται μόνο από σχετική φασματική κατανομή και όχι από τις απόλυτες τιμές. Έτσι, πηγές με την ίδια σχετική φασματική κατανομή αλλά διαφορετικών επιπέδων λαμπρότητας θα παριστάνονται σαν ευθείες γραμμές διαφόρων κλίσεων:

$$S_A = k_A P, \quad S_B = k_B P$$

Όπου k_A, k_B οι λόγοι S/P των φασματικών κατανομών των πηγών **A, B**

Σε λογαριθμική κλίμακα όπως στο σχήμα 2-10, δυο πηγές με διαφορετικές φασματικές κατανομές θα είναι ευθείες γραμμές που έχουν κλίση 1, μετατοπισμένες κατά τον λόγο k_A / k_B . Στο σχήμα 2-10 η σταθερά αναλογίας έχει ληφθεί 0.1 και έχουμε σχεδιάσει **A, 0.1 A, B, 0.1 B**.



Σχήμα 2-10. Δεν ισχύει η αναλογικότητα στην μεσοπική περιοχή οράσεως [10].

Για να αποδείξουμε ότι ο νόμος της αναλογικότητας δεν ισχύει, αρκεί να σχεδιάσουμε τις καμπύλες ίσης οπτικής απόκρισης. Δηλαδή τις καμπύλες σταθερής ισοδύναμης λαμπρότητας L_{eq} στο επίπεδο S, P στο σχήμα 2-10. Στην φωτοπική περιοχή οι πηγές ταυτίζονται οπτικά αν έχουν ίδια φωτοπική λαμπρότητα ($L=L_{eq}$). Άρα οι καμπύλες σταθερής L_{eq} θα είναι κατακόρυφες γραμμές. Αντίθετα στην σκοτοπική περιοχή οι πηγές θα ταυτίζονται οπτικά αν έχουν την ίδια σκοτοπική λαμπρότητα. Άρα οι καμπύλες σταθερής L_{eq} θα είναι οριζόντιες γραμμές.

Πειραματικά δεδομένα έχουν δείξει ότι η μετάβαση από την φωτοπική στην σκοτοπική όραση γίνεται βαθμιαία. Άρα οι καμπύλες σταθερής L_{eq} θα μεταβάλλονται βαθμιαία από οριζόντιες σε κατακόρυφες. Στο σχήμα 2-10 έχουν σχεδιασθεί τρεις καμπύλες διαφορετικών L_{eq} .

Η μέση κλίση της καμπύλης L_{eq} ανάμεσα στα σημεία τομής της με τις πηγές **A** και **B** θα είναι:

$$\frac{\Delta L_{eq}}{\Delta p} = \frac{S_A - S_B}{P_A - P_B}$$

Μια αναλογική μεταβολή στην ισχύ των δυο πηγών δεν θα αλλάξει την μέση κλίση, γιατί όλοι οι παράγοντες της παραπάνω εξίσωσης θα πολλαπλασιαστούν με τον ίδιο παράγοντα. Αυτό σημαίνει ότι η κλίση της καμπύλης L_{eq} θα πρέπει να είναι σταθερή σε όλο το επίπεδο S/P. Η μεσοπική περιοχή όμως είναι η περιοχή όπου η καμπύλη L_{eq} αλλάζει κλίση και από οριζόντια γίνεται κατακόρυφη. Άρα η L_{eq} δεν μπορεί να ικανοποιήσει τον νόμο της αναλογικότητας στην μεσοπική περιοχή.

Για να δείξουμε ότι ο νόμος της προσθετικότητας δεν ισχύει στην μεσοπική περιοχή, αρκεί να θεωρήσουμε ότι $\Gamma = \chi\mathbf{A}$ και $\Delta = y\mathbf{B}$ όπου Γ και Δ δυο πηγές ισοδύναμες στη μεσοπική η σκοτοπική περιοχή, $V(\Gamma) = V(\Delta)$. Εάν οι δυο πηγές δεν έχουν τον ίδιο λόγο S/P τότε όπως

συζητήθηκε παραπάνω $\chi \neq y$. Οπότε $\mathbf{A} + \mathbf{\Gamma} = \mathbf{A} (1 + \chi)$ και $\mathbf{B} + \mathbf{\Delta} = (1 + y)$ και $V[(\mathbf{A} (1 + \chi))] \neq V[(1 + y)]$, άρα ο νόμος της προσθετικότητας δεν ισχύει στην μεσοπική περιοχή [10].

2.2.3. Μετρήσεις της οπτικής ανταπόκρισης

Οι μετρήσεις της οπτικής ανταπόκρισης μπορούν να γίνουν με αρκετούς τρόπους, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι:

1) Μέθοδος της ρύθμισης

Σύμφωνα με αυτή ο παρατηρητής, ανιχνεύει ένα οπτικό ερέθισμα είτε αυξάνοντας την φωτεινότητα του ερεθίσματος μέχρι αυτό να γίνει μόλις ορατό ή μειώνοντας την φωτεινότητα μέχρι μόλις να εξαφανισθεί. Η μέθοδος αυτή πάσχει από τα σφάλματα του εθισμού και της προήγησης, αλλά είναι χρήσιμη στο να κάνει κανείς μια πρώτη εκτίμηση του κατωφλιού, το οποίο μπορεί να προσδιορισθεί και με άλλες πιο σύνθετες μεθόδους.

2) Μέθοδος των ορίων

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την παρουσίαση ενός ερεθίσματος, του οποίου η φωτεινότητα είναι αρκετά πάνω από το κατώφλι και την οποία μειώνουμε με μικρά βήματα μέχρι ο παρατηρητής, να μην μπορεί να ανιχνεύσει το ερέθισμα. Η μέθοδος αυτή λέγεται μέθοδος φθίνοντων ορίων. Μέθοδος αυξανόμενων ορίων λέγεται η μέθοδος, κατά την οποία το ερέθισμα έχει φωτεινότητα αρκετά κάτω από το κατώφλι και στην συνέχεια την αυξάνουμε με μικρά βήματα μέχρι το ερέθισμα να γίνει μόλις ορατό. Το κατώφλι ορίζεται σαν ο μέσος όρος των σημείων, που παρατηρήθηκε σε αρκετές μετρήσεις αύξοντος και φθίνοντος ορίου. Και η μέθοδος αυτή πάσχει από τα ίδια σφάλματα εθισμού και προήγησης.

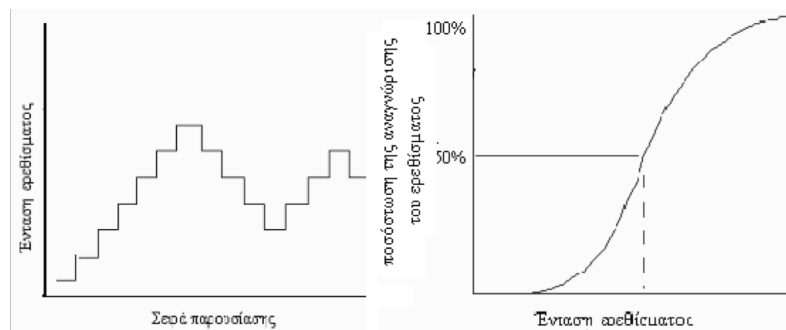
3) Μέθοδος κλίμακας (προσαρμοσμένη μέθοδος των ορίων)

Σε αυτή χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και τα αύξοντα και τα φθίνοντα όρια. Στην μέθοδο αυτή η φωτεινότητα του ερεθίσματος αυξάνει βαθμιαία μέχρι αυτό να γίνει μόλις ορατό, σημειώνεται η τιμή, και στην συνέχεια η φωτεινότητα μειώνεται πάλι βαθμιαία, έως ότου να σταματήσει να είναι ορατό. Το κατώφλι πάλι ορίζεται σαν ο μέσος όρος πολλών τέτοιων μετρήσεων. Και η μέθοδος αυτή υποφέρει από εθισμό και προήγηση.

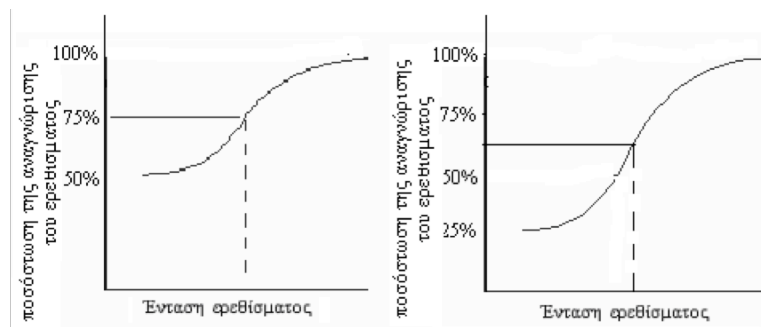
4) Μέθοδος σταθερού ερεθίσματος

Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην επαναλαμβανόμενη παρουσίαση οπτικών ερεθισμάτων κατά τυχαίο τρόπο και με κλιμακούμενη φωτεινότητα [11]. Κάποια ερεθίσματα μεγάλης

φωτεινότητας θα αναγνωρίζονται πάντα ενώ κάποια άλλα πολύ χαμηλής φωτεινότητας ποτέ. Η ποσόστωση της αναγνώρισης του ερεθίσματος καθορίζεται σαν συνάρτηση της φωτεινότητας και η γραφική της παράσταση ονομάζεται ψυχομετρική καμπύλη. Οι ψυχοφυσικές διαδικασίες, που χρησιμοποιούνται για να ελαχιστοποιήσουν τα σφάλματα κατά τον προσδιορισμό κατώφλιού, ζητώντας από το υποκείμενο να απαντήσει σε ερωτήσεις, είναι οι παρακάτω:



Σχήμα 2-11. Ψυχομετρική καμπύλη με τη διαδικασία ναι-όχι [11].



Σχήμα 2-12. Ψυχομετρική καμπύλη με τη διαδικασία 2AFC (αριστερά) και με τη διαδικασία 4AFC (δεξιά) [11].

α) Διαδικασία NAI-OXI, ερωτάται ο παρατηρητής για την ανίχνευση ή την μη ανίχνευση του ερεθίσματος. Η σωστή απάντηση μπορεί να κυμαίνεται από 0-100%. Το σχήμα 2-11 παρουσιάζει τη ψυχομετρική καμπύλη σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, που ονομάζεται. Το κατώφλι ορίζεται σαν το σημείο όπου η αναγνώριση είναι 50%.

β) Διαδικασία υποχρεωτικής επιλογής (alternative forced choice =AFC), όπου ο παρατηρητής υποχρεώνεται να διαλέξει ανάμεσα από εναλλακτικές επιλογές μια από τις οποίες περιέχει το ερέθισμα. Αν οι εναλλακτικές επιλογές είναι 2 τότε η μέθοδος ονομάζεται 2AFC ενώ αν είναι 4 ονομάζεται 4AFC. Η ποσόστωση για την οποία λαμβάνεται το κατώφλι είναι 75% για την 2AFC και 62.5% για την 4AFC. Στο σχήμα 2-12 παρουσιάζεται η ψυχομετρική καμπύλη σύμφωνα με τη διαδικασία 2AFC.

5) Προσαρμοσμένες ψυχοφυσικές μέθοδοι

Στις μεθόδους αυτές το ερέθισμα παρουσιάζεται στον παρατηρητή. Εάν αυτός ανιχνεύσει το ερέθισμα τρεις φορές, η φωτεινότητα του ερεθίσματος μειώνεται κατά ένα βήμα. Όταν το ερέθισμα δεν ανιχνευθεί, τότε αυξάνεται η φωτεινότητα του κατά ένα βήμα. Το μέγεθος του βήματος μεταβολής τόσο κατά την αύξηση, όσο και κατά την μείωση παραμένει το ίδιο. Η διαδικασία σταματά, όταν ληφθούν τιμές για μια λεπτομερή περιοχή της φωτεινότητας του ερεθίσματος. Ως κατώφλι υπολογίζεται η μέση τιμή των επιπέδων φωτεινότητας.

Η επιλογή του μεγέθους του βήματος είναι σημαντικός παράγοντας. Εάν το βήμα είναι πολύ μικρό οι διαφορές στην φωτεινότητα είναι δυσδιάκριτες, ενώ εάν το βήμα είναι μεγάλο το κατώφλι δεν καθορίζεται με ακρίβεια. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, όπως για παράδειγμα η μέθοδος παραμετρικού προσδιορισμού με διαδοχικό έλεγχο (parameter estimation by sequential testing) PEST. Στην μέθοδο αυτή η πειραματική διαδικασία ξεκινά με μεγάλα βήματα, τα οποία στην πορεία μειώνονται μέχρι να καθορισθεί το κατώφλι με το μικρότερο δυνατό βήμα.

2.2.4. Είδη μετρήσεων φασματικής ευαισθησίας

Βήμα προς βήμα ταύτιση φωτεινότητας (Step-by-step brightness matching).

Γίνεται ταύτιση φωτεινότητας σε διμερές πεδίο, όπου το ένα ήμισυ δέχεται το δοκιμαστικό φωτο-ερέθισμα, ενώ το άλλο ήμισυ το αναφοράς. Αν η διαφορά τους είναι λίγα nm τότε η καμπύλη που παράγεται μοιάζει με την $V(\lambda)$. Αν όμως η διαφορά τους είναι πολλά nm τότε η καμπύλη που παράγεται μοιάζει με την $V_b(\lambda)$. Η προθετικότητα δεν ισχύει [12-13].

Ετεροχρωματική φωτομέτρηση μαρμαρυγής (flicker photometry – HFP).

Αυτή είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος. Πρόκειται για ταχεία εναλλαγή του προς εξέταση φωτο-ερεθίσματος με το φωτο-ερέθισμα αναφοράς. Αυξομειώνεται η ένταση του προς εξέταση, μέχρι ο παρατηρητής αντιληφθεί την ελάχιστη μαρμαρυγή. Η καμπύλη που παράγεται μοιάζει με την $V(\lambda)$. Η προθετικότητα ισχύει για σχετικά χαμηλές φωτοπικές λαμπρότητες, ενώ δεν ισχύει για υψηλές [14].

Άμεση ταύτιση ετεροχρωματικής φωτεινότητας (Direct heterochromatic brightness matching – HBM).

Ο παρατηρητής συγκρίνει δύο φωτο-ερεθίσματα και ρυθμίζει την ένταση ενός από αυτά (του υπό μέτρηση) ώστε να επιτύχει ταύτιση φωτεινότητας. Η καμπύλη που παράγεται μοιάζει με

την $V_b(\lambda)$. Πρέπει να σημειωθεί, ότι αυτή η μέθοδος δίνει αποτελέσματα που μπορεί να διαφέρουν πολύ από παρατηρητή σε παρατηρητή [15].

Απόλυτα κατώφλια (Absolute thresholds).

Μετράται η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται ώστε ένα φωτο-ερέθισμα μόλις να γίνει αντιληπτό. Αυτό το ερέθισμα μπορεί να γίνει είτε στην ωχρά κηλίδα, είτε περιφερειακά. Για να μπορεί να παραχθεί κάποια φωτοπική καμπύλη, πρέπει το ερέθισμα να είναι ακριβώς στο κέντρο του οπτικού πεδίου και σε μέγεθος όχι μεγαλύτερο από 1° , ώστε να μην διεγείρονται ραβδία. Η φωτοπική καμπύλη που παράγεται μοιάζει περισσότερο με την $V_b(\lambda)$ [16].

Σχετικά κατώφλια (Increment thresholds).

Μοιάζει με την προηγούμενη, με την διαφορά ότι υπάρχει φωτεινό και όχι σκοτεινό υπόβαθρο. Η καμπύλη που παράγεται μοιάζει με την $V_b(\lambda)$ [17].

Ελάχιστη διάκριση συνόρου (Minimally distinct border).

Μοιάζει με την βαθμηδόν ταύτιση και γίνεται και αυτή σε διμερές πεδίο. Εδώ ο παρατηρητής μεταβάλλει την ένταση της προς εξέταση ακτινοβολίας, ώστε η μεταξύ των δύο μερών διαχωριστική γραμμή να είναι ελάχιστα αντιληπτή. Η καμπύλη που παράγεται μοιάζει με την $V(\lambda)$ [18].

Οπτική οξύτητα (Visual acuity).

Ελέγχεται η οπτική οξύτητα (με την βοήθεια δακτυλίων του Landolt, γραμμάτων του Snellen, πλέγματα κ.λ.π.) με φωτεινό υπόβαθρο του οποίου το κυρίαρχο μήκος κύματος αλλάζει. Η καμπύλη που παράγεται μοιάζει με την $V(\lambda)$.

Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται σταθερής οξύτητας φωτεινοί στόχοι σε φωτεινό υπόβαθρο. Οι ακτινοβολίες στόχων και υποβάθρου διαφέρουν κατά μερικά μήκη κύματος. Η φωτεινή ροή του υποβάθρου μεταβάλλεται μέχρις ότου οι στόχοι να γίνουν αδιάκριτοι. Αυτή η φωτεινή ροή κατόπιν εκφράζεται σαν συνάρτηση του λ και κανονικοποιείται.

Η μέτρηση επιτυγχάνεται [32] με την αναγνώριση ιδιαιτέρων χαρακτηριστικών του στόχου, όπως τα γράμματα του Snellen. Αυτά τα γράμματα είναι έτσι κατασκευασμένα, ώστε το μέγεθος της κρίσιμης λεπτομέρειας (όπως π.χ. κάποιο άνοιγμα) να είναι $1/5$ του όλου ύψους, σχήμα 2.3. Με την βοήθεια των γραμμάτων του Snellen, προσδιορίζεται η οπτική οξύτητα του παρατηρητή, με μέτρο την σειρά των μικρότερων γραμμάτων που μπορεί να διακρίνει, από μία σειρά γραμμών στις οποίες το μέγεθος των γραμμάτων είναι μειούμενου. Η οπτική

οξύτητα (OO) με την ορολογία του Snellen ορίζεται ως:

$$OO = \Delta' / \Delta$$

όπου Δ' είναι η απόσταση οράσεως (συνήθως 6 μέτρα) και Δ η απόσταση στην οποία κάθε γράμμα της γραμμής αυτής φαίνεται υπό γωνία 5 λεπτών της μοίρας, σχήματα 2-13 και 2-14.



Σχήμα 2-13. Σχήματα Snellen.



Σχήμα 2-14. Καθορισμός αποστάσεων και οπτικών πεδίων [19].

Κρίσιμη συχνότητα μαρμαρυγής (Critical flicker frequency – CFF).

Εναλλάσσεται το προς μέτρηση φωτο-ερέθισμα με σκοτάδι ίσου χρόνου. Με σταθερή την συχνότητα εναλλαγής, ρυθμίζεται η ένταση του φωτο-ερεθίσματος, ώστε να παρατηρείται η ελάχιστη μαρμαρυγή. Η καμπύλη που παράγεται μοιάζει με την $V(\lambda)$ [12], [20-21]

Χρωματομετρική (Colorimetry).

Με πειράματα χρωματικής ταύτισης. Ακολουθούνται δύο στάδια. Στο πρώτο γίνεται μέτρηση των λαμπροτήτων (luminance) των πρωτευόντων χρωμο-ερεθισμάτων, και στο δεύτερο οι λαμπρότητες των πρωτευόντων που απαιτούνται για κάθε χρωματική ταύτιση, προστίθενται μαζί. Όταν γίνουν ταυτίσεις για όλο το ισοενεργειακό φάσμα, τότε παράγονται συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης. Τότε προστίθεται η λαμπρότητα αυτών των τριών συναρτήσεων. Το αποτέλεσμα είναι καμπύλη φασματικής ευαισθησίας, που να μοιάζει με την $V(\lambda)$. Εδώ προϋποτίθεται ότι ισχύει η προσθετικότητα.

Χρόνος αντιδράσεως (Reaction time).

Μέσα σε φωτεινό υπόβαθρο παρουσιάζεται ξαφνικά ένα ισχυρότερο φωτο-ερέθισμα και ο

παρατηρητής προσπαθεί αμέσως να πατήσει ένα κουμπί. Μετράται ο χρόνος αντιδράσεως, για διάφορα φωτο-ερεθίσματα. Το αποτέλεσμα είναι καμπύλη φασματικής ευαισθησίας, που να μοιάζει με την $V(\lambda)$.

Άλλες μέθοδοι.

Διάμετρος κόρης (Pupil diameter). Ηλεκτρο-φυσιολογική (Electrophysiological measures) [22]. Οπτική οξύτητα (Visual acuity). Χρόνος εύρεσης (Search time). Γι' αυτές όμως τις μεθόδους δεν είναι ακόμα γνωστό αν ισχύει η προσθετικότητα.

2.2.5. Μεσοπικά φωτομετρικά μοντέλα

Τα υπάρχοντα μεσοπικά φωτομετρικά μοντέλα μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την μέθοδο που έχει χρησιμοποιηθεί: Η μία κατηγορία περιλαμβάνει τα βασισμένα σε μη προσθετικές μεθόδους (Adrian, Palmer, Ikeda κ.ά., Sagawa κ.ά., Kokoschka, Trezona) και η δεύτερη τα βασισμένα σε προσθετικές (Rea κ.ά., MOVE, Viikari κ.ά., Walkey κ.ά.).

Μοντέλο βασισμένο σε ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας (W. ADRIAN)

Ο Adrian [23-25] θεώρησε ότι στην μεσοπική περιοχή πρέπει να υπάρχει μια οικογένεια καμπύλων φασματικής ευαισθησίας VQ_e , κάθε μια από τις οποίες θα είναι ομόλογη των $V(\lambda)$ και $V'(\lambda)$. Το ποια θα πρέπει να εφαρμοσθεί κάθε φορά εξαρτάται από την λαμπρότητα και από το πλάτος του οπτικού πεδίου. Όπως δε για την φωτοπική όραση ορίζεται η λαμπρότητα, έτσι και για την μεσοπική θα πρέπει να ορισθεί η «ισοδύναμη λαμπρότητα» L_{eq} .

$$L_{eq} = K_m (L_{eq}) \int L_e VQ_e(\lambda) d\lambda$$

Όπου L_e η φασματική πυκνότητα της ακτινοβολίας, $K_m (L_{eq})$ ανάλογο του K_m της φωτοπικής, με την διαφορά ότι στην μεσοπική εξαρτάται από την ισοδύναμη λαμπρότητα και παίρνει τιμές μεταξύ 683 και 1700 lm/W. Στην φωτοπική όραση πρέπει η VQ_e να γίνεται $V(\lambda)$, ενώ στην σκοτοπική $V'(\lambda)$.

Ο Adrian παρέλαβε πειραματικές καμπύλες που είχαν παραχθεί με ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας από την Kinney και τον Kokoschka για διάφορα ανοίγματα οπτικού πεδίου και προσπάθησε να τις προσεγγίσει με παραβολές (σε λογαριθμική κλίμακα).

$$\log(VQ) = A(\lambda - H)^2$$

Ύστερα από ανάλυση κατέλεξε στο αποτέλεσμα:

$$A = J \sqrt{1 + \left(\frac{\log L + K}{T} \right)^2} - M + N e^{10 \log L}$$

$$H = \frac{P}{Q + (\log L + R)^2} + S$$

όπου: J, K, T, M, N, P, Q, R, S παράμετροι εξαρτώμενες μόνο από το εύρος του οπτικού πεδίου.

Για έλεγχο του μοντέλου ο Adrian το συσχέτισε με την σχετική ευαισθησία αντιθέσεως, με την οπτική οξύτητα και με το μέγεθος της κόρης και διαπίστωσε ότι υπάρχει συνέπεια μεταξύ του μοντέλου αυτού και αυτών των οπτικών δραστηριοτήτων.

Μοντέλο βασισμένο σε ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας (PALMER).

Ο Palmer [23], [26-27] χρησιμοποίησε τα πειραματικά του δεδομένα, από ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας. Με δύο τύπους προσδιόρισε την μεσοπική ισοδύναμη λαμπρότητα συναρτήσει των $V_{10}(\lambda) = P$ και $V'(\lambda) = S$.

$$L(S, P) = \frac{MS + P^2}{M + P}$$

$$L(S, P) = \sqrt{MS + P} + M/2 - \sqrt{M(\sqrt{MS + P} + M/4)}$$

Η ισχύς των δύο ανωτέρω τύπων βασίζεται στην παραδοχή ότι τα τρία είδη κωνίων συμπεριφέρονται στην μεσοπική περιοχή, όπως και στην φωτοπική, το οποίο είναι αμφίβολο. Επιπροσθέτως, παραβλέπει την διαφορετική αλληλεπίδραση των κωνίων και των ραβδίων στην μεσοπική όραση.

Μοντέλο βασισμένο σε ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας (IKEDA και SHIMOZONO)

Κατ' αρχήν αυτό το μοντέλο βασίζεται στις μετρήσεις φασματικής ευαισθησίας με την μέθοδο της απ' ευθείας ετεροχρωματικής ταύτισης του Ikeda.

Κατά τον Ikeda είναι σαφές [23], [28] ότι η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας μεταβάλλεται κατά τρόπο συνεχή αλλά πεπλεγμένο, καθώς ο φωτισμός του αμφιβληστροειδή μεταβάλλεται από την φωτοπική στην σκοτοπική περιοχή. Εφαρμόστηκε λοιπόν στα πειραματικά δεδομένα η μέθοδος του κύριου παράγοντα (principle factor method), ώστε να προσδιορισθεί ο αριθμός των παραγόντων, που θα πρέπει να συνεισφέρουν στην παραγωγή των καμπύλων. Βρέθηκε λοιπόν ότι δύο πρέπει να είναι οι παράγοντες αυτοί. Έτσι, θεωρήθηκε ότι η θεωρητική

καμπύλη φασματικής ευαισθησίας δίνεται από την σχέση

$$\log S_T(\lambda) = a \log S_R(\lambda) + (1-a) \log S_C(\lambda)$$

Ο συντελεστής a εξαρτάται από τα επίπεδα της λαμπρότητας, $S_R(\lambda)$ η φασματική ευαισθησία των ραβδίων παρόμοια με την $V'(\lambda)$ και $S_C(\lambda)$ η φασματική ευαισθησία των κωνίων. Το πρόβλημα που προσπαθεί να επιλύσει αυτό το μοντέλο είναι η έλλειψη προσθετικότητας στην μεσοπική περιοχή. Αυτή οφείλεται όχι μόνο στην αλληλεπίδραση των κωνίων, όπως στην φωτοπική, αλλά και στην αλληλεπίδραση κωνίων – ραβδίων.

Μοντέλο βασισμένο σε ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας (SAGAWA και TAKEICHI)

Το μοντέλο [23], [29-30] αυτό βασίζεται στις μετρήσεις φασματικής ευαισθησίας με την μέθοδο της απ' ευθείας ετεροχρωματικής ταύτισης του Sagawa. Ξεκινά με την παραδοχή (όπως και του Ikeda) ότι η θεωρητική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας δίνεται από την σχέση

$$\log V_m(\lambda) = a \log V_s(\lambda) + (1-a) \log V_p(\lambda)$$

όπου $V_m(\lambda)$, $V_s(\lambda)$, $V_p(\lambda)$ οι μεσοπική, σκοτοπική και φωτοπική καμπύλες φασματικής ευαισθησίας για την φωτεινότητα, κανονικοποιημένες στα 570 nm. Η διαφορά σε σχέση με το μοντέλο του Ikeda είναι ότι εδώ χρησιμοποιούνται οι καμπύλες φασματικής ευαισθησίας για φωτεινότητα και όχι από φωτομέτρηση μαρμαρυγής.

Τετραχρωματικό μοντέλο βασισμένο σε ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας (KOKOSCHKA)

Αυτό το μοντέλο [23], [31] βασίζεται στις μετρήσεις φασματικής ευαισθησίας με την μέθοδο της απ' ευθείας ετεροχρωματικής ταύτισης του Kokoschka. Αυτό είναι ένα γραμμικό μοντέλο που προσπαθεί να περιγράψει την μεσοπική λαμπρότητα με την βοήθεια τεσσάρων εμπειρικών καμπύλων, οι οποίες αντιστοιχούν στις φασματικές αποκρίσεις των κωνίων και ραβδίων.

$$L_{eq,a} = (X_{10}/Y_{10} F_x + F_y + Z_{10}/Y_{10} F_z + L'/L_{10} F_s)L_{10}$$

Όπου F_x , F_y , F_z , F_s είναι συναρτήσεις εξαρτώμενες από τα επίπεδα λαμπρότητας, για τις οποίες ο Kokoschka έδωσε τις τιμές, L_{10} η λαμπρότητα με βάση την $y_{10}(\lambda)$, L' η λαμπρότητα με βάση την $V'(\lambda)$ και X_{10} , Y_{10} , Z_{10} , οι τριχρωματικές τιμές CIE για 10° . Η $L_{eq,a}$ είναι το αχρωματικό τμήμα της ισοδύναμης λαμπρότητας. Η ισοδύναμη λαμπρότητα τότε θα υπολογισθεί

$$L_{eq} = L_{eq,a} f_c$$

$$\text{όπου } f_c = 1 + (f_{c,p} - 1) (0.6 + 0.2 \log L)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι εφ' όσον οι συναρτήσεις F εξαρτώνται από την λαμπρότητα και συγχρόνως η L_{eq} εξαρτάται από τις F , υπάρχει μία κυκλικότητα, η οποία αίρεται με επαναληπτική μέθοδο.

Τετραχρωματικό μοντέλο βασισμένο σε ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας (TREZONA)

Αυτό το μοντέλο [23], [32] μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλα τα επίπεδα λαμπρότητας, από τα φωτοπικά μέχρι τα σκοτοπικά. Βασίζεται στις εξής αρχές. Τα τέσσερα είδη φωτοϋποδοχέων πρέπει να μελετώνται ξεχωριστά. Τα τρία είδη κωνίων δεν δρουν πάντοτε με τον ίδιο τρόπο μεταξύ τους. Οι φασματικές απορροφήσεις τους είναι ανεξάρτητες από την λαμπρότητα. Ο νόμος της προσθετικότητας (του Abney) δεν ισχύει πάντοτε.

Η Trezona έκανε μετρήσεις με ταύτιση φωτεινότητας για διάφορα φωτο-ερεθίσματα μονοχρωματικά και μη σε όλα τα επίπεδα λαμπροτήτων. Το φωτο-ερέθισμα αναφοράς ήταν μονοχρωματικό 588 nm. Τα αποτελέσματα αποτυπώθηκαν σε διπλο-λογαριθμικό διάγραμμα επιφανειακή πυκνότητα ακτινοβολίας αμφιβληστροειδή για το δοκιμαστικό φωτο-ερέθισμα συναρτήσει του υπό εξέταση φωτο-ερεθίσματος ($E_{test} - E_{ref}$) εκφρασμένα σε ραδιομετρικά Td. Εκεί φαίνεται η προσθετικότητα της σκοτοπικής περιοχής και η περιορισμένη προσθετικότητα της φωτοπικής. Οι καμπύλες προσεγγίστηκαν με την βοήθεια της συναρτήσεως υπερβολική εφαπτομένη ($\tanh x$) αφού πρώτα παραμετροποιήθηκαν.

Μοντέλο βασισμένο σε χρόνους αντιδράσεως (HE, REA, BIERMAN, και BULLOUGH)

Το μοντέλο αυτό [30], [33-34] έχει προκύψει από τις μετρήσεις των ερευνητών αυτών στον χρόνο αντιδράσεως στην μεσοπική όραση, όταν το φως προέρχεται από λαμπτήρα ατμών νατρίου υψηλής πίεσεως (HPS) και μεταλλικών αλογονιδίων (MH).

Ξεκινάμε με τις εξής υποθέσεις

- 1) Η μεσοπική φασματική ευαισθησία είναι ένας διατεταγμένος και κανονικός συνδυασμός των φασματικών αποκρίσεων των κωνίων και των ραβδίων.
- 2) Η φασματική απόκριση των κωνίων περιγράφεται από την $V_{10}(\lambda)$.
- 3) Οι νόμοι του Abney ισχύουν στην μεσοπική όραση.
- 4) Η μεσοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας του οφθαλμού $V_m(\lambda)$ μπορεί να εκφραστεί σαν γραμμικός συνδυασμός των $V_{10}(\lambda)$ και $V'(\lambda)$.

Το μοντέλο περιγράφεται από την σχέση

$$V_m(\lambda) = k_1(L) [x(L) V_{10}(\lambda) + (1 - x(L)) V'(\lambda)]$$

Όπου $x(L)$ είναι μια μεταβλητή μεταξύ 0 και 1, και $k_1(L)$ είναι μια σταθερά κανονικοποίησης.

Μοντέλο βασισμένο σε χρόνους αντιδράσεως, οπτική οξύτητα και ανίχνευση αχρωματικού κατωφλίου (MOVE)

Το μοντέλο αυτό [35] έχει προκύψει από μια Ευρωπαϊκή σύμπραξη. Βασίζεται σε πειράματα που έγιναν σε διάφορα ευρωπαϊκά εργαστήρια, πάνω σε χρόνους αντιδράσεως, οπτικής οξύτητας και ανίχνευσης αχρωματικού κατωφλίου. Όλες αυτές οι μέθοδοι είναι προσθετικές. Από τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων τους προέκυψε το μοντέλο για τις μεσοπικές καμπύλες φασματικής ευαισθησίας, που περιγράφεται από την σχέση:

$$M(x) V_{\text{mes}}(\lambda) = xV(\lambda) + (1-x) V'(\lambda)$$

όπου: $V_{\text{mes}}(\lambda)$ η μεσοπική σχετική φασματική ευαισθησία και $M(x)$ μια συνάρτηση κανονικοποίησης. Η μεταβλητή x είναι συνάρτηση της φωτοπικής και σκοτοπικής λαμπρότητας, στην οποία προσαρμόζεται ο οφθαλμός.

Άλλα μοντέλα είναι: το τροποποιημένο MOVE, που προτάθηκε από τον Viikari κ.ά. [36], στο οποίο τα φωτοπικά και σκοτοπικά όρια των φωτο-ερεθισμάτων εξαρτώνται από το ίδιο το φωτο-ερέθισμα, και τα δύο μοντέλα των Walkey, Harlow και Barbur [37], που και αυτά βασίζονται σε οπτική οξύτητα και χρόνους αντιδράσεως.

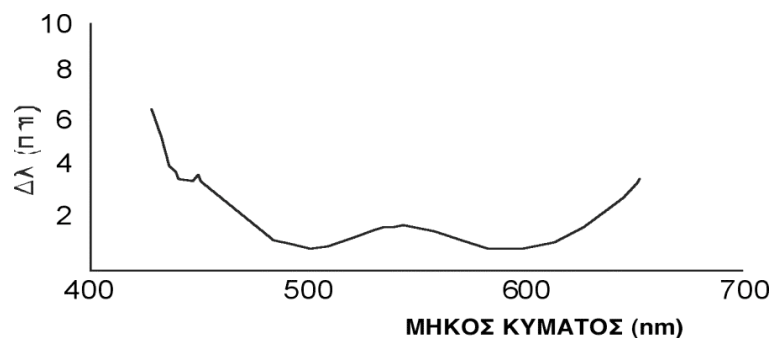
2.3. Χρωματομετρία

2.3.1. Γενικά

Η χρωματική αντίληψη είναι μια καθαρά υποκειμενική διαδικασία που έχει μικρή σχέση με τα φυσικά χαρακτηριστικά της φωτεινής ακτινοβολίας.

Η αντίληψη του χρώματος ενός αντικειμένου εξαρτάται από ένα πλήθος παραμέτρων, όπως π.χ. την φασματική κατανομή της φωτεινής ακτινοβολίας που έρχεται από αυτό, την φασματική κατανομή της φωτεινής ακτινοβολίας που έρχεται από τα γειτονικά αντικείμενα, και την κατάσταση προσαρμογής του παρατηρητή, πριν ακριβώς δει αυτό το αντικείμενο. Ένα αξιοσημείωτο, αν και όχι πλήρως κατανοητό φαινόμενο, το οποίο είναι χαρακτηριστικό στην όραση των χρωμάτων, είναι η **χρωματική συνέπεια**. Δηλ. το να φαίνεται ένα αντικείμενο πως έχει το ίδιο σχεδόν χρώμα, ακόμα κι αν αλλάξει αρκετά η φασματική σύνθεση του φωτός που πέφτει πάνω του. Π.χ. ένα πορτοκάλι φαίνεται να έχει πορτοκαλί χρώμα, είτε φωτίζεται από το άπλετο ηλιακό φως το μεσημέρι, είτε από διάχυτο φως όταν υπάρχει βαριά συννεφιά, είτε από λάμπα πυρακτώσεως.

Η φασματική σύνθεση του φωτός που έρχεται από το αντικείμενο είναι ο πιο σημαντικός παράγων. Στις μονοχρωματικές ακτινοβολίες αποδίδονται χρώματα, που ονομάζονται φασματικά. Έτσι ακτινοβολία μήκους κύματος 430 nm αναγνωρίζεται σαν ιώδης, 460 nm κυανή, 520 nm πράσινη, 575 nm κίτρινη, 600 nm πορτοκαλί και 650 nm ερυθρή. Ενδιάμεσες τιμές μήκους κύματος δίνουν ενδιάμεσα χρώματα. Το πόσο εύκολα μπορεί να διακριθεί η διαφορά στο χρώμα μεταξύ δύο ακτινοβολιών διαφορετικού μήκους κύματος, εξαρτάται και από την περιοχή του ορατού φάσματος στην οποία ευρίσκονται. Έτσι, σε μήκη κύματος περίπου 500 nm ένας κανονικός παρατηρητής μπορεί να διακρίνει διαφορά στο χρώμα μεταξύ δύο ακτινοβολιών με διαφορά στο μήκος κύματος 1 nm. Στην περιοχή του ιώδους όμως, ακόμα και διαφορά 6 nm δεν γίνεται αντιληπτή. Το παρακάτω σχήμα 2-15 δείχνει την ελάχιστη διαφορά μήκους κύματος για να γίνει αντιληπτή η διαφορά στο χρώμα δύο ακτινοβολιών, σε σχέση με το μήκος κύματος.



Σχήμα 2-15. Η διαφορά κατωφλίου αντιληπτικότητας διαφοράς μήκους κύματος, συναρτήσει του μήκους κύματος [38].

Όσο μεγαλώνει η ηλικία ενός ανθρώπου, τόσο ο φακός του οφθαλμού σιγά-σιγά κιτρινίζει. Αυτό σημαίνει βαθμιαία ελάττωση της ευαισθησίας στο ιώδες και κυανό μέρος του φάσματος. Λόγω όμως της χρωματικής συνέπειας (χρωματική προσαρμογή) αυτό δεν γίνεται αισθητό από τον παρατηρητή στην καθημερινή του ζωή. Σε ανθρώπους ηλικίας εβδομήντα ή ογδόντα ετών μπορεί η απορρόφηση να φθάσει μέχρι τα 550 nm, ο δε φακός τους μπορεί να έχει γίνει βαθύ κίτρινο-πορτοκαλί στο χρώμα.

2.3.2. Οι χρωματικές θεωρίες της ανθρώπινης όρασης

Δύο θεωρίες έχουν προταθεί για να εξηγήσουν την ανθρώπινη χρωματική όραση: Η **τριχρωματική θεωρία**, και αυτή των **αντιθέτων χρωμάτων**.

Κατά την **τριχρωματική θεωρία**, σχεδόν οποιοδήποτε χρώμα, μπορεί να αναπαραχθεί με την

μείξη τριών άλλων «πρωτευόντων» χρωμάτων. Αυτό δείχνει ότι η αναλυτική ικανότητα του οφθαλμού να διακρίνει τα επιμέρους χρώματα είναι χαμηλή, σε αντίθεση με το αυτί π.χ. που μπορεί να διακρίνει ένα όργανο σε μία ορχήστρα.

Το αρχικό χρώμα μπορεί να έχει την ίδια φασματική σύνθεση με το χρώμα που προέκυψε από την μείξη των τριών «πρωτευόντων» χρωμάτων. Τότε λέμε πως έχουμε **ισομερική σύνθεση**. Είναι δυνατόν όμως το αρχικό χρώμα να έχει διαφορετική φασματική κατανομή από το μίγμα των τριών, παρ' όλο που μας φαίνεται να έχει ακριβώς το ίδιο χρώμα. Τότε λέμε πως έχουμε **μεταμερική σύνθεση**.

Σαν τρία «πρωτεύοντα» χρώματα συχνά επιλέγονται μονοχρωματικές ακτινοβολίες 700 nm (πορφυρένυθο), 546.1 nm (κιτρινοπράσινο) και 435.8 nm (κυανοϊώδες). Το κιτρινοπράσινο και το κυανοϊώδες λαμβάνονται από τις γραμμές εκπομπής των ατμών υδραργύρου, ενώ το πορφυρένυθο είναι σε μία περιοχή του φάσματος, όπου σχετικά μεγάλες διαφορές μήκους κύματος δίνουν μικρές διαφορές χρώματος. Έτσι μειώνεται ο κίνδυνος εσφαλμένης βαθμονομήσεως.

Σχεδόν σε κάθε χρώμα λοιπόν, αντιστοιχούν τρεις τιμές των «βασικών» χρωμάτων, τα οποία το συνθέτουν. Αυτές οι τιμές δείχνουν την ενέργεια της ακτινοβολίας κάθε μιας των «βασικών» χρωμάτων. Το μοντέλο αυτό αδυνατεί να συνθέσει όλα τα χρώματα. Για κάποια χρώματα παρατηρείται μία από τις τιμές των βασικών να είναι *αρνητική*. Αυτό έχει την έννοια ότι κάποιο από τα «βασικά» χρώματα θα έπρεπε να αφαιρεθεί, αν ήταν δυνατόν, και όχι να προστεθεί.

Μία σημαντική ιδιότητα είναι η **προσθετικότητα (νόμος του Grassmann)**. Κατά την ανάμιξη δύο ακτινοβολιών γνωστής συνθέσεως από τα «πρωτεύοντα», είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε την τιμή των «πρωτευόντων» χρωμάτων που θα συνθέτουν το τελικό μίγμα. Αυτό ισχύει ακόμη και αν έχουμε αρνητικές τιμές των «βασικών» χρωμάτων.

Η τριχρωματική θεωρία δεν μπορεί όμως να εξηγήσει, πώς γίνεται καμιά φορά η σύνθεση δύο διαφορετικών χρωμάτων (πράσινο και ερυθρό) να δώσει ένα τρίτο χρώμα (κίτρινο), ή ακόμα και να εξαλείψει τα χρώματα (κίτρινο και κυανό) και το τελικό φως να φαίνεται λευκό. Αυτά τα εξηγεί η **θεωρία των αντιθέτων χρωμάτων**.

Ορισμένα επίλεκτα ζεύγη χρωμάτων, όπως τα ερυθρό - πράσινο και κίτρινο - κυανό φαίνονται να αλληλοαναιρούνται. Ανάμειξη αυτών των χρωμάτων δεν δίνει χρώματα τα οποία να είναι μίγματα των αρχικών. Π.χ. μίξη ερυθρού φωτός με πράσινο φως θα δώσει κίτρινο, ενώ μίξη κυανού με κίτρινο θα δώσει λευκό. Έτσι μερικά χρώματα φαίνονται να αλληλοαποκλείονται. Δεν υπάρχει χρώμα που να περιγράφεται σαν ερυθρωπό - πράσινο, ή κιτρινωπό - κυανό.

Για πολλές (όχι όλες) φωτεινές ακτινοβολίες κάποιου μήκους κύματος, υπάρχει κάποιο άλλο μήκος κύματος, των οποίων η μεταμερική σύνθεση να δίνει λευκό. Αυτά τα δύο μήκη κύματος ονομάζονται **συμπληρωματικά**. **Λευκό** δε, ονομάζεται μοναδικά εκείνο το φως που έχει προκύψει μεταμερικά από την μίξη των τριών «πρωτεύοντων» χρωμάτων σε ίσες ενέργειες.

Σήμερα θεωρείται ότι και οι δύο θεωρίες ισχύουν [39]. Αυτό οφείλεται στην χρωματική επεξεργασία, που γίνεται από τα κωνία και τα γάγγλια στον αμφιβληστροειδή, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τα σήματα από τα L και M κωνία φθάνουν στα **γάγγλια αντιθέσεως χρώματος ερυθρού - πράσινου**, για τον διαχωρισμό αυτών των δύο χρωμάτων. Σήματα επίσης από τα ίδια κωνία φθάνουν σε άλλα κύτταρα, όπου γίνεται πρόσθεση των δύο σημάτων, για να δώσει κίτρινο σήμα. Αυτό το σήμα, όπως και σήματα από τα S κωνία φθάνουν στα **γάγγλια αντιθέσεως χρώματος κίτρινου - κυανού**, όπου διαχωρίζονται αυτά τα δύο χρώματα. Επίσης υπάρχουν γάγγλια, τα οποία συγκρίνουν το χρώμα του αντικειμένου, με αυτό του άμεσου περιβάλλοντός του. Αυτά είναι τα **κύτταρα διπλής αντιθέσεως**. Το αποτέλεσμα της λειτουργίας τους είναι το εξής: έστω π.χ. μία περιοχή που φωτίζεται από μονοχρωματική ακτινοβολία 585 nm. Αυτή μπορεί να φανεί με αισθητά διαφορετικό χρώμα, ανάλογα με τις επιφάνειες που την περιβάλλουν. Έτσι αυτό το σημείο μπορεί να φαίνεται πράσινο, όταν τα γειτονικά σημεία φωτίζονται με φως 650 nm, ή ερυθρό, όταν φωτίζονται με 540 nm. Όταν οι επιφάνειες που το περιβάλλουν φωτίζονται με το ίδιο μήκος κύματος αλλά με ένταση 0.7 λογαριθμικές μονάδες μεγαλύτερη, τότε φαίνεται γκριζό. αν το περιβάλλον φωτίζεται με ένταση 2 λογαριθμικές μονάδες μεγαλύτερη, τότε το υπό εξέταση σημείο φαίνεται μαύρο. Επίσης, αν το περιβάλλον φωτίζεται με φως 570 nm αλλά με ένταση 1 λογαριθμική μονάδα μεγαλύτερη, το σημείο μας θα φαίνεται καφέ.

Έρευνες από τους Chichilnisky & Wandell (1999) [40] έδειξαν ότι αν προσπαθήσουμε να εκφράσουμε τα ζεύγη των αντιθέτων χρωμάτων σαν γραμμική συνάρτηση των ανταποκρίσεων των κωνίων, δηλ. π.χ.

$RG = aL + bM + cS + d$ RG: μία τιμή στον άξονα ερυθρό - πράσινο

$YB = eL + fM + gS + h$ RG: μία τιμή στον άξονα κυανό - κίτρινο

όπου a, b, c, d, e, f, g, h σταθερές

θα διαπιστώσουμε ότι αυτό είναι αδύνατον. Ακόμη, τα ζεύγη αυτά των αντιθέτων χρωμάτων δεν είναι ούτε γραμμικός συνδυασμός των διαφορών, μεταξύ των σημάτων από τα κωνία και κάποιου ουδέτερου σημείου. Επίσης παίζει ρόλο φυσικά και το χρώμα του υποβάθρου.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι στην ωχρά κηλίδα του οφθαλμού και σε έκταση στο κέντρο 1/8 της μοίρας, δεν υπάρχουν S κωνία. Αυτό σημαίνει ότι, αν και δεν γίνεται εύκολα

αντιληπτό, στα πολύ μικρά αντικείμενα, που τα κοιτάζουμε κατ' ευθείαν, δυσκολευόμαστε να αντιληφθούμε το κυανό χρώμα.

2.3.3. Οι νόμοι του Grassmann

Συμμετρικός: Αν το φωτο-ερέθισμα A μοιάζει με το B τότε και το B μοιάζει με το A.

Μεταβατικός: Αν το A μοιάζει με το B και το B μοιάζει με το Γ τότε το A μοιάζει με το Γ.

Αναλογικός: Αν το A μοιάζει με το B, τότε και το aA μοιάζει με το aB .

Προσθετικός: Αν το A μοιάζει με το B και το Γ μοιάζει με το Δ, τότε το $(A+Γ)$ μοιάζει με το $(B+Δ)$, αλλά και το $(A+Δ)$ μοιάζει με το $(B+Γ)$.

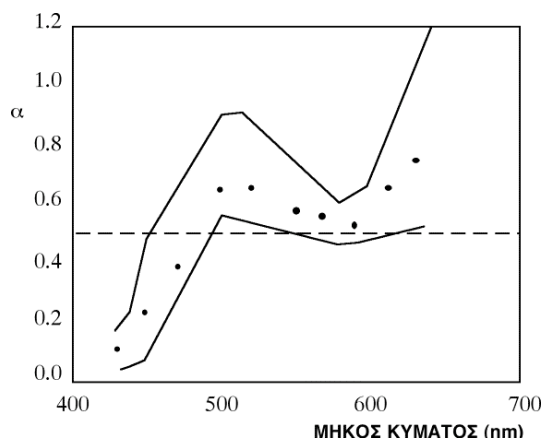
2.3.4. Αποτυχία της προσθετικότητας

Έστω ότι σε ένα διμερές πεδίο γίνεται ταύτιση φωτεινότητας ενός έγχρωμου ερεθίσματος C_1 με ένα λευκό W . Στην συνέχεια, ενός άλλου C_2 εγχρώμου με το ίδιο λευκό. Προφανώς και το C_1 ταυτίζεται στην φωτεινότητα με το C_2 . Αν σε ένα μέρος του οπτικού πεδίου βάλουμε τα C_1 και C_2 συγχρόνως και στο άλλο βάλουμε $2W$, τότε γενικά αυτά τα δύο μέρη δεν θα έχουν την ίδια φωτεινότητα.

Ο Guth έκανε το σχετικό πείραμα χρησιμοποιώντας σαν έγχρωμο ερέθισμα μονοχρωματική ακτινοβολία $C(\lambda)$. Στο διμερές πεδίο έβαλε το λευκό (2800°) W στο ένα ήμισυ και στο άλλο το $C(\lambda)$ μεταβλητής εντάσεως και $0.5 W$ και έκανε ταύτιση φωτεινότητας.

$$[aC(\lambda) + 0.5W] \stackrel{\phi}{=} W$$

Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2-16. Προφανώς ισχύει η προσθετικότητα μόνον όταν $a=0$. Αυτές τις τιμές τις παίρνει για $\lambda=580\text{nm}$ και $\lambda=490\text{nm}$. Παρατηρούμε ότι για $\lambda < 480\text{ nm}$ είναι $a < 0.5$, ενώ για $\lambda > 480\text{ nm}$ είναι $a > 0.5$. Έχουμε λοιπόν δύο ειδών παραβίασης της προσθετικότητας: **Ακυρωτικού** τύπου $a > 0.5$ και **ενισχυτικού** τύπου $a < 0.5$.



Σχήμα 2-16. Τα αποτελέσματα του ελέγχου της προθετικότητας, κατά τον Guth [3].

2.3.5. Ο τριχρωματικός χώρος

Ένα οποιοδήποτε χρωμο-ερέθισμα μπορεί να ταυτιστεί με τον γραμμικό συνδυασμό τριών αυθαιρέτων χρωμο-ερεθισμάτων **R**, **G**, **B**.

$$\mathbf{Q} = R_Q \mathbf{R} + G_Q \mathbf{G} + B_Q \mathbf{B}$$

Τα βαθμωτά μεγέθη R_Q , G_Q , B_Q ονομάζονται **τριχρωματικές τιμές (tristimulus values)** του **Q**. Αυτά μπορεί να είναι θετικά ή και αρνητικά τα δύο από αυτά.

Τα **R**, **G**, **B** καθορίζουν ένα χώρο τον tristimulus χώρο. Σε αυτό το **Q** παρουσιάζεται σαν ένα (R_Q, G_Q, B_Q) διάνυσμα. Στις πρακτικές εφαρμογές πιο βολικό είναι να θεωρούμε τις προβολές αυτών στο μοναδιαίο επίπεδο

$$R + G + B = 1$$

Οι αναπαραστάσεις των **Q** σε αυτόν, χάνουν το μήκος του διανύσματος. Άξονες συντεταγμένων σε αυτό το μοναδιαίο επίπεδο είναι οι ευθείες τομής του επιπέδου αυτού με τα τρία επίπεδα που ορίζονται από τα διανύσματα των τριών πρωτευόντων ερεθισμάτων (primary stimuli). Αυτές οι τρεις γραμμές ορίζουν ένα τρίγωνο στο μοναδιαίο επίπεδο, το οποίο τρίγωνο ορίζει το διάγραμμα χρωματικότητας.

Αρχικά το τρίγωνο αυτό αναπαριστάτο σαν ισόπλευρο και ονομαζόταν χρωματικό τρίγωνο του Maxwell. Τώρα αναπαριστάται σαν ορθογώνιο με κάθετους άξονες τα **R** και **G**.

2.3.6. Βασικές χρωματομετρικές σχέσεις

Για κάθε μονοχρωματική πηγή πρέπει να ισχύει:

$$\mathbf{Q}_\lambda = R_\lambda \mathbf{R} + G_\lambda \mathbf{G} + B_\lambda \mathbf{B}$$

Τα R_λ , G_λ , B_λ ονομάζονται φασματικές τριχρωματικές γραμμές (spectral tristimulus values).

Ειδικής σημασίας είναι όταν το **Q** έχει μοναδιαία ισχύ για κάθε μήκος κύματος λ . Τέτοιο

χρωμο-ερέθισμα ονομάζεται **ισοενεργειακό (equal energy stimulus)**. Η σχέση για χρωματική ταύτιση κάθε χρωματικής συνιστώσας E_λ του ισοενεργειακού E είναι:

$$E_\lambda = \bar{r}(\lambda)\mathbf{R} + \bar{g}(\lambda)\mathbf{G} + \bar{b}(\lambda)\mathbf{B}$$

Τα $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ λέγονται **συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης (color matching functions CMF)**.

Προβολή των CMF στο μοναδιαίο επίπεδο δίνουν:

$$r(\lambda) = \bar{r}(\lambda)/\Sigma(\lambda)$$

$$g(\lambda) = \bar{g}(\lambda)/\Sigma(\lambda)$$

$$b(\lambda) = \bar{b}(\lambda)/\Sigma(\lambda)$$

όπου $\Sigma(\lambda) = \bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)$ με $r(\lambda) + g(\lambda) + b(\lambda) = 1$.

Για χρωμο-ερέθισμα συνεχούς φάσματος Q οι τιμές R_Q , G_Q , B_Q δίδονται από τις σχέσεις

$$R_Q = \int P_\lambda \bar{r}(\lambda) d\lambda$$

$$G_Q = \int P_\lambda \bar{g}(\lambda) d\lambda$$

$$B_Q = \int P_\lambda \bar{b}(\lambda) d\lambda$$

Για να έχουμε μεταμετρική ταύτιση δύο χρωμο-ερεθισμάτων Q_1 , Q_2 πρέπει:

$$R_{Q1} = R_{Q2}, \quad G_{Q1} = G_{Q2}, \quad B_{Q1} = B_{Q2}.$$

2.3.7. Φανταστικά χρωμο-ερεθίσματα

Αν και στον χρωματικό χώρο, κάθε χρωμο-ερέθισμα αναπαριστάται με τρεις tristimulus values, δεν σημαίνει ότι κάθε τριάδα χρωματομετρικών συντεταγμένων αναπαριστά κάποιο χρωμο-ερέθισμα. Αυτά τα ανύπαρκτα χρωμο-ερεθίσματα ονομάζονται φανταστικά (imaginary). Δεχόμαστε ότι και αυτά υπακούουν στους νόμους του Gassmann.

Σε αυτά μπαίνει ένας περιορισμός «η πρόσθεση δύο χρωμο-ερεθισμάτων δεν μπορεί να δώσει το μηδενικό (null) χρωμο-ερέθισμα», δηλ. αυτό με τις τρεις συντεταγμένες του μηδέν. Τα πραγματικά χρωμο-ερεθίσματα βρίσκονται όλα στον ένα από τους δύο υποχώρους που χωρίζονται από ένα επίπεδο που περνά από την αρχή των αξόνων, αλλά όχι στο ίδιο το επίπεδο. Αυτό σημαίνει ότι αν η τριάδα (R,G,B) παριστάνει ένα πραγματικό χρωμο-ερέθισμα, τότε η τριάδα (-R,-G,-B) δεν επιτρέπεται να παριστάνει ένα φανταστικό.

Μια σημαντική ιδιότητα του διαγράμματος χρωματικότητας είναι ότι το σημείο που παριστά το αθροιστικό μίγμα δύο χρωμο-ερεθισμάτων βρίσκεται στην ευθεία γραμμή που περνά από τα δύο σημεία, που παριστούν τα δύο συστατικά του μίγματος.

Οι μονάδες κάθε συνόλου ανεξάρτητων πρωτευόντων χρωμο-ερεθισμάτων πάντοτε μπορούν

να επιλεγθούν έτσι ώστε το άθροισμα R+G+B των tristimulus values κάθε ενός χρωμο-ερεθίσματος, να είναι θετικό. Με τέτοιες μονάδες, όλα τα σημεία που παριστούν πραγματικά χρωμο-ερεθίσματα, βρίσκονται στο εσωτερικό του φασματικού τόπου και της πορφυρής γραμμής.

2.3.8. Χρωματομετρικοί μετασχηματισμοί

Έστω τρία πρωτεύοντα χρωμο-ερεθίσματα \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} , τα οποία είναι γραμμικώς ανεξάρτητα. Μερικές φορές είναι δυνατόν να αντικαταστήσουμε τα πρωτεύοντα χρωμο-ερεθίσματα με μια άλλη τριάδα \mathbf{R}' , \mathbf{G}' , \mathbf{B}' , τότε ισχύει:

$$\mathbf{R}' = a_{11}\mathbf{R} + a_{21}\mathbf{G} + a_{31}\mathbf{B}$$

$$\mathbf{G}' = a_{12}\mathbf{R} + a_{22}\mathbf{G} + a_{32}\mathbf{B}$$

$$\mathbf{B}' = a_{13}\mathbf{R} + a_{23}\mathbf{G} + a_{33}\mathbf{B}$$

Λόγω της γραμμικής ανεξαρτησίας, ο πίνακας $\mathbf{A}^*=(a_{ij})$ πρέπει $|\mathbf{A}^*| \neq 0$. Αποδεικνύεται ότι:

$$\mathbf{R}' = b_{11}\mathbf{R} + b_{12}\mathbf{G} + b_{13}\mathbf{B}$$

$$\mathbf{G}' = b_{21}\mathbf{R} + b_{22}\mathbf{G} + b_{23}\mathbf{B}$$

$$\mathbf{B}' = b_{31}\mathbf{R} + b_{32}\mathbf{G} + b_{33}\mathbf{B}$$

Ο πίνακας (b_{ij}) είναι ο ανάστροφο-αντίστροφος του \mathbf{A}^* . Τελικά λαμβάνουμε:

$$r' = \frac{\beta_{11}r + \beta_{12}r + \beta_{13}}{\beta_{31}r + \beta_{32}r + \beta_{33}} \quad \text{και} \quad g' = \frac{\beta_{21}r + \beta_{22}r + \beta_{23}}{\beta_{31}r + \beta_{32}r + \beta_{33}}$$

$$\text{με} \quad \beta_{11} = b_{11} - b_{13}, \beta_{12} = b_{12} - b_{13}, \beta_{13} = b_{13}, \beta_{21} = b_{21} - b_{23}, \beta_{22} = b_{22} - b_{23},$$

$$\beta_{23} = b_{23}, \beta_{31} = (b_{11} - b_{13}) + (b_{21} - b_{23}) + (b_{31} - b_{33}),$$

$$\beta_{32} = (b_{12} - b_{13}) + (b_{22} - b_{23}) + (b_{32} - b_{33}), \beta_{33} = b_{13} + b_{23} + b_{33}.$$

2.3.9. Ο τυπικός παρατηρητής CIE 1931

Δύο χρωμοερεθίσματα διαφορετικής συνθέσεως είναι δυνατόν άλλοτε να φαίνονται ίδια και άλλοτε να φαίνονται διαφορετικά. Εξαρτάται από τις συνθήκες παρατηρήσεως (άνοιγμα οπτικού πεδίου, κατάσταση προσαρμογής στο φως, εκκεντρότητα κλπ.). Γι αυτό τον λόγο, για την θέσπιση στην πράξη χρωματικών συναρτήσεων, χρειάζονται δύο προϋποθέσεις:

1) Οι συγκρίσεις των δύο χρωμοερεθισμάτων πρέπει να γίνονται σε διμερές πεδίο 2^0 , σε κεντρικόν ατενισμό με σκοτεινό υπόβαθρο και σε φωτοπικά επίπεδα λαμπρότητας. Είναι αναγκαίο τα πρωτεύοντα χρωμοερεθίσματα να είναι μονοχρωματικά. Η δε ανάμιξή τους να γίνεται σε ολοκληρώνουσα σφαίρα. Αυτή η προϋπόθεση είναι αναγκαία για να μην υπάρχει

συνεισφορά των ραβδίων.

2) Οι μονάδες ενέργειας των τριών πρωτευόντων να ληφθούν έτσι ώστε η ανάμιξη και των τριών να δίνει ένα χρώμα μεταμερικά ίδιο με το ισοενεργειακό λευκό, δηλ. με το χρωμοερέθισμα που θα προκύψει με την ανάμιξη ακτινοβολιών όλων των μήκων κύματος του ορατού φωτός σε ίσες ενέργειες.

Είναι σημαντικό να τονιστεί, ότι η μη συνεισφορά των ραβδίων εξασφαλίζει την ισχύ των νόμων του Grassman και μάλιστα του αναλογικού και του προσθετικού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι δυνατή η χρήση των ολοκληρωμάτων των προηγούμενων παραγράφων, για τον υπολογισμό των χρωματικών συντεταγμένων κάποιου χρωμο-ερεθίσματος. Άρα σε τελική ανάλυση, μπορεί να υπάρξει μια μαθηματικά εκφρασμένη χρωματική θεωρία. Η προσθετικότητα των χρωματικών εξισώσεων έχει ελεγχθεί από τον Blottlau και την Trezona [41] και βρέθηκε ότι πράγματι ισχύει κατά προσέγγιση. Πρέπει όμως να αναφερθεί, ότι κρινόμενη αυστηρά, έχει τεθεί υπό αμφισβήτηση από κάποιους ερευνητές [42-49].

Μία από τις πρώτες βασικές έρευνες στο θέμα έκανε ο W.D. Wright, ο οποίος χρησιμοποίησε μονοχρωματικές ακτινοβολίες 700 nm ερυθρό (R), 546.1 nm πράσινο (G) και 435.8 nm κυανό (B). Το ερυθρό παρήχθη από μονοχρωματικό φίλτρο, ενώ τα άλλα δύο από τις γραμμές εκπομπής του υδραργύρου. Θεωρώντας 1 cd/m² την λαμπρότητα του ερυθρού σαν μονάδα μετρήσεως του ερυθρού, έπρεπε να έχει 4.5907 cd/m² του πρασίνου και 0.0601 cd/m² του κυανού, για να πετύχει μεταμερική ταύτιση με το ισοενεργειακό λευκό, λαμπρότητας 5.6508 cd/m². Αυτές τις τρεις λαμπρότητες τις ονόμασε μονάδες μετρήσεως. Έτσι:

Ερυθρό	1.0000	cd/m ² =	1 νέα μονάδα R
Πράσινο	4.5907	cd/m ² =	1 νέα μονάδα G
Κυανό	0.0601	cd/m ² =	1 νέα μονάδα B

Με αυτές μονάδες ο λόγος των ισχύων τους να είναι 72.1:1.4:1.0. Αυτή η επιλογή θέτει το σημείο E του ισοενεργειακού φάσματος στην θέση $r_E = g_E = 0.333$. [37]

Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$.

Η CIE πρότεινε το 1931 τρία άλλα πρωτεύοντα χρωμο-ερεθίσματα, τα οποία ονόμασε **X**, **Y** και **Z**, βασισμένα στα αποτελέσματα των W.D. Wright και J. Guild. Κάθε μήκος κύματος μονοχρωματικής ακτινοβολίας μπορεί να παραχθεί από αυτά αν αναμιχθούν σε κατάλληλα ποσοστά. Το ποσοστό αυτό για κάθε ένα από τα **X**, **Y** και **Z** εξαρτάται φυσικά από το μήκος κύματος. Ορίζονται λοιπόν συναρτήσεις (του μήκους κύματος), κάθε μία από τις οποίες δίνει το ποσοστό του χρώματος αναφοράς που απαιτείται, για την μεταμερική αναπαραγωγή του χρώματος κάθε μήκους κύματος μονοχρωματικής πηγής.

Θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι τα τρία αυτά χρώματα αναφοράς **X**, **Y**, **Z** είναι φανταστικά χρωμο-ερεθίσματα. Προσεγγιστικά μόνο μπορούμε να πούμε, ότι είναι υπερτονισμένα χρωματικά και αντιστοιχούν το **Y** στο χρώμα μήκους κύματος 520 nm και το **Z** στο 477 nm.

Τα **X**, **Y**, **Z** επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι εξής προϋποθέσεις:

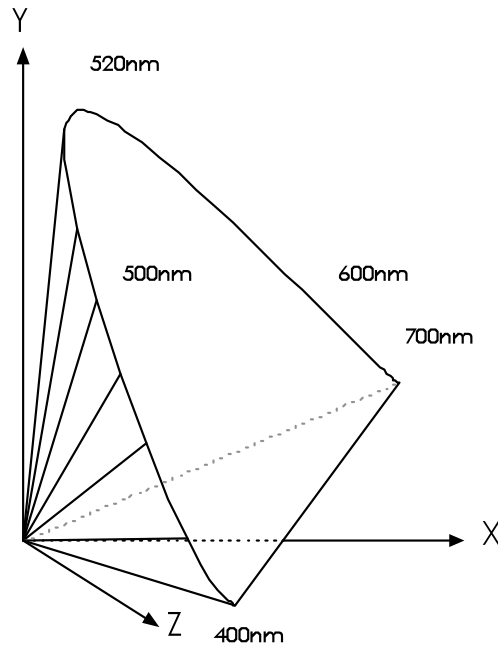
- 1) να μην υπάρχουν αρνητικές τιμές ενέργειας κατά την σύνθεση οποιοδήποτε χρώματος. Άρα όλα τα πραγματικά χρωμο-ερεθίσματα κατά την αναπαράστασή τους σε (x, y) χρωματικό διάγραμμα πρέπει να περικλείονται στο τρίγωνο **X**, **Y**, **Z**. Στο τρίγωνο αυτό, οι πλευρές **XY** και **YZ** πρέπει να εφάπτονται στον φασματικό τόπο, ώστε αυτό το τρίγωνο να έχει όσο το δυνατόν την μικρότερη επιφάνεια και τα σχηματιζόμενα φανταστικά χρωμο-ερεθίσματα να είναι όσο το δυνατόν λιγότερα.
- 2) η συνάρτηση να ταυτίζεται με την $V(\lambda)$, να δίνει δηλ. την λαμπρότητα
- 3) οι άλλες δύο συναρτήσεις και να έχουν μηδενική τιμή λαμπρότητας. Η ευθεία λοιπόν **XZ** στο χρωματικό διάγραμμα (x, y) , είναι γραμμή μηδενικής λαμπρότητας. Ονομάζεται **άλυχνος** (alychne). Αυτή συμπίπτει με το ευθύγραμμο τμήμα του φασματικού τόπου. Άρα η μόνη της δίνει ολόκληρη την πληροφορία για την λαμπρότητα του χρώματος.
- 4) το κυρίαρχο μήκος κύματος του **Z** να πλησιάζει κατά το δυνατόν σε εκείνη την μονοχρωματική ακτινοβολία, που παράγει το ψυχολογικό αίσθημα του καθαρού κυανού, το οποίο δεν είναι ούτε ερυθρωπό, ούτε πρασινωπό.
- 5) στο παραγόμενο χρωματικό διάγραμμα (x, y) όλα τα σημεία του φασματικού τόπου να ισαπέχουν κατά το δυνατόν από το ισοενεργειακό σημείο. Αυτό βέβαια δεν μπορεί να τηρηθεί απόλυτα.
- 6) οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης πρέπει να κανονικοποιηθούν έτσι, ώστε τα εμβαδά των επιφανειών κάτω από αυτές να είναι ίσα, όταν ο οριζόντιος άξονας μετριέται σε μονάδες μήκους κύματος.

Αυτές οι παραδοχές στον ορισμό έγιναν με τον όρο ο παρατηρητής να κοιτάζει κεντρικά και σε άνοιγμα πεδίου 2 μοιρών αφ' ενός, ώστε το είδωλο του έγχρωμου αντικειμένου να σχηματίζεται στην ωχρά κηλίδα, και αφ' ετέρου για φως σχεδόν λευκό. Ο όρος του ανοίγματος πεδίου εύκολα ικανοποιείται στην πράξη. Συμβαίνει, όταν κοιτάζουμε ένα αντικείμενο, χωρίς να δίνουμε προσοχή στην περιφερειακή όραση.

Αν το φως δεν είναι μονοχρωματικό αλλά περιγράφεται από μία φασματική κατανομή $L_e(\lambda)$, τότε τα ποσοστά των τριών χρωμάτων αναφοράς **X**, **Y**, **Z** υπολογίζονται μαθηματικά:

$$X = \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \quad Y = \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \quad Z = \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda$$

Όλες οι δυνατές τιμές των X , Y , Z μπορούν να παρασταθούν σε ένα τρισδιάστατο διάγραμμα, και θα βρίσκονται στο θετικό οκτατημόριο, μέσα σε ένα κωνοειδές στερεό με κορυφή την αρχή των αξόνων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-17.



Σχήμα 2-18. Το επίπεδο $X+Y+Z = 1$

Ας παρατηρήσουμε πως οι τρεις άξονες δεν είναι μέσα στον κώνο. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως ελέχθη, τα X , Y , Z δεν είναι πραγματικά χρώματα. Το μαύρο, που αντιστοιχεί σε έλλειψη χρώματος και λαμπρότητας, είναι στην αρχή των αξόνων. Η καμπύλη συνοριακή επιφάνεια του κώνου παριστάνει τις τριχρωματικές τιμές των καθαρά μονοχρωματικών φασματικά χρωμάτων. Αυτά έχουν και τον μέγιστο κορεσμό. Αυτή η καμπύλη συνοριακή επιφάνεια είναι ο **φασματικός τόπος (spectral locus)**. Η ευθεία γραμμή που ενώνει τα άκρα του γεωμετρικού τόπου του φάσματος δεν αντιστοιχεί σε φασματικές γραμμές, αλλά είναι χρώματα (πορφυρό) που προκύπτουν από την μίξη ερυθρού με ιώδες.

Όταν σε ένα χρώμα αυξάνεται η λαμπρότητα, τότε η ενέργεια που απαιτείται από κάθε ένα από τα χρώματα αναφοράς X , Y , Z αυξάνεται για να αναπαράγει μεταμερικά το υπό εξέταση χρώμα, έτσι ώστε η αναλογία $X:Y:Z$ να παραμένει σταθερή. Στο τρισδιάστατο διάγραμμα το σημείο που παριστάνει το χρώμα κάθε φορά βρίσκεται σε μία επιβατική ακτίνα από την αρχή των αξόνων και καθώς αυξάνεται η λαμπρότητα, απομακρύνεται από αυτό.

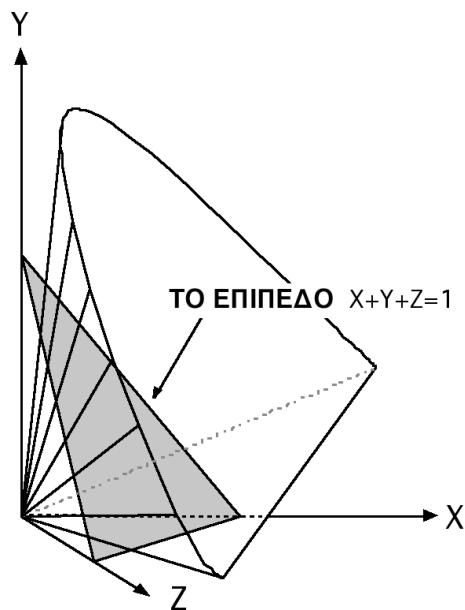
Πολλές φορές είναι χρήσιμο να εξετάζουμε ένα συγκεκριμένο χρώμα, ανεξάρτητα από την λαμπρότητά του. Για να γίνει αυτό, κάνουμε κανονικοποίηση των τιμών X , Y , Z .

$$x = X / (X + Y + Z)$$

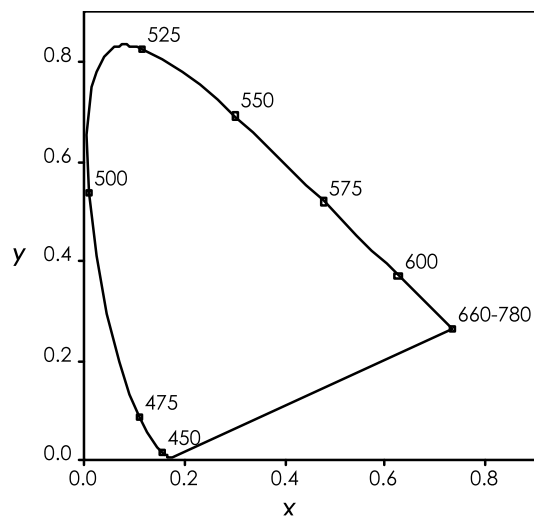
$$y = Y / (X + Y + Z)$$

$$z = Z / (X + Y + Z)$$

Προφανώς, ισχύει πάντοτε $x + y + z = 1$. Άρα μπορούμε να καταργήσουμε την z συντεταγμένη, σαν εξαρτώμενη από τις άλλες δύο και να παράγουμε ένα διδιάστατο διάγραμμα $x - y$. Αυτό είναι ισοδύναμο με το να προβάλουμε το XYZ κωνοειδές στερεό στο επίπεδο $X + Y + Z = 1$. Αυτά φαίνονται στα σχήματα 2-19 και 2-20.



Σχήμα 2-19. Η προβολή του χρωματικού διαγράμματος στο επίπεδο $X+Y+Z = 1$



Σχήμα 2-20. Το χρωματικό διάγραμμα στο επίπεδο $X+Y+Z = 1$

Κάποιες φορές οι τιμές (x, y) συνοδεύονται και από μία τιμή Y , για να μπορούμε να

ξαναπάρουμε πάλι τα (X, Y, Z).

2.3.10. Ο τυπικός παρατηρητής CIE 1964

Το χρωματομετρικό σύστημα CIE 1931 των 2° είναι εύχρηστο και πρακτικό. Έχει όμως ένα σοβαρό μειονέκτημα. Το οπτικό πεδίο είναι υπερβολικά μικρό. Δεν είναι παρά το 4% του ολικού πεδίου. Στην καθημερινή ζωή αυτό δεν μπορεί να είναι ικανοποιητικό. Το 1964 η CIE πρότεινε ένα άλλο χρωματομετρικό σύστημα βασισμένο στα δεδομένα των Stiles και Burch και της Speranskaya για οπτικό πεδίο 10° .

Το σύστημα των 10° CIE 1964 είναι κατ' ουσίαν διαφορετικό από το CIE 1931 των 2° κατά το ότι υπάρχει και συνεισφορά των ραβδίων. Ένα χαρακτηριστικό των δεδομένων των 10° , που είναι άγνωστο σε αυτά των 2° , είναι ότι γίνεται μια ταύτιση περιφερειακά στον κυκλικό δακτύλιο $2^\circ - 10^\circ$ ενώ συγχρόνως παρατηρείται μια κεντρική 2° ασυμφωνία. Αυτό όμως συμβαίνει για κάποια μόνο χρωμο-ερεθίσματα και πάλι όχι για όλους τους παρατηρητές. Το φαινόμενο είναι γνωστό σαν η **κηλίδα του Maxwell**. Αυτό βέβαια οφείλεται στην συνεισφορά των ραβδίων [50-51]. Λόγω ακριβώς αυτής της συνεισφοράς παύει να ισχύει η προσθετικότητα (οι δύο τελευταίοι νόμοι του Grassman). Για να είναι όμως χρήσιμο και πρακτικά εφαρμόσιμο πρέπει να ισχύει η προσθετικότητα. Αυτό μπορεί να γίνει κάτω από προϋποθέσεις:

- 1) Να χρησιμοποιηθούν υψηλά επίπεδα λαμπρότητας, ώστε να επιτυγχάνεται κορεσμός των ραβδίων.
- 2) Να χρησιμοποιείται κίτρινο πρωτεύον χρωμο-ερέθισμα αντί για πράσινο, γιατί έχει μικρότερη σκοτοπική συνιστώσα.
- 3) Να προστίθενται ίσες ποσότητες πράσινου και στα δύο μέρη του πεδίου, για να ανυψώσει το σκοτοπικό επίπεδο.
- 4) Να επεκτείνεται (extrapolation) το χρωματικό διάγραμμα από το ισοενεργειακό λευκό στην ευθεία που ενώνει τα 580 nm με τα 650 nm. [41]

Σήμερα αποδεχόμαστε ότι ισχύει η γραμμικότητα και στην περίπτωση των 10° .

Αυτό το σύστημα έχει μια άλλη διαφορά από αυτό των 2° . Στο CIE 1931 οι CMF βρέθηκαν ανεξάρτητα από την $V_2(\lambda)$, οπότε η ταυτίστηκε με την $V_2(\lambda)$ και η άλυσχος προσδιορίστηκε από το χρωματικό διάγραμμα (r, g). Στο CIE 1964 η διαδικασία είναι η αντίστροφη: η προέκυψε από τις CMF $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ μαζί με φωτομέτρηση μαρμαρυγής των R, G, B.

Οι διαφορές συνοψίζονται στα εξής: [52]

- 1) Η δεν ήταν σίγουρο ότι ταυτιζόταν με την $V_{10}(\lambda)$.

- 2) Η άλυχνος δεν είναι ευθεία αλλά επίπεδο OXY στον τριχρωματικό χώρο.
- 3) Υπάρχει ένα επίπεδο το OXY πάνω στο οποίο κείνται τα μεγάλα μήκη κύματος.
- 4) Υπάρχει ένα επίπεδο το OZY στο οποίο κείται η εφαπτομένη στο σημείο 498 nm.

Σύμφωνα με την Τρεζονα αυτές οι διαφορές ορίζουν μια διαφορετική χρωματομετρία από αυτήν της CIE 1931, και κάθε φορά πρέπει να αναφέρεται ονομαστικά. Ενδεικτικά αναφέρεται η διαφορά $K_{m2} = 683.00 \text{ lm/W}$ αντί για $K_{m10} = 683.56 \text{ lm/W}$.

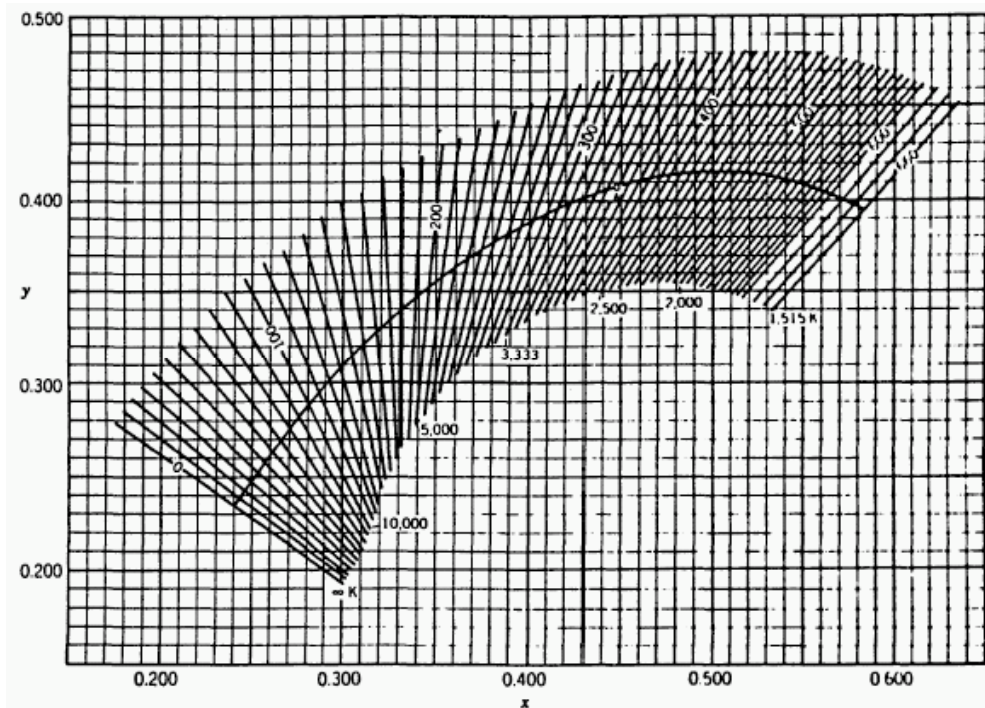
Στην καθημερινή πρακτική αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται καταχρηστικά χωρίς περιορισμούς.

2.3.11. Θερμοκρασία χρώματος

Θερμοκρασία από κατανομή (Distribution temperature) μιας πηγής ορίζεται η απόλυτη θερμοκρασία (Κέλβιν) του μέλανος σώματος, του οποίου η φασματική κατανομή σε κάθε μήκος κύματος είναι ανάλογη με αυτή της υπό θεώρηση πηγής.

Θερμοκρασία χρώματος (Color temperature) μιας πηγής ορίζεται σαν η απόλυτη θερμοκρασία του μέλανος σώματος, το οποίο έχει τις ίδιες χρωματικές συντεταγμένες με την πηγή.

Συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος (Correlated color temperature) εισήχθη όταν η χρωματικότητα μιας πηγής δεν είναι ακριβώς η ίδια με την χρωματικότητα ενός μέλανος σώματος. Ορίζεται σαν την χρωματικότητα του μέλανος σώματος που μοιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο, στην ίδια φωτεινότητα (brightness) και κάτω από τις ίδιες συνθήκες οράσεως. Οι ισοθερμοκρασιακές γραμμές είναι μικρές ευθείες γραμμές, που τέμνουν κάθετα τον τόπο του Planck στο ομοιόμορφο διάγραμμα CIE 1960.



Σχήμα 2-21: Οι συσχετισμένες θερμοκρασίες χρώματος σε διάγραμμα συντεταγμένων χρωματικότητας xy .

2.3.12. Οι τυποποιημένες φωτεινές πηγές της CIE

Αν και το λευκό φως, σύμφωνα με τα παραπάνω, ορίζεται μαθηματικά ακριβώς, είναι δύσκολο να παραχθεί τεχνητά. Γι' αυτό η CIE [53] καθόρισε κάποιες τυπικές φωτεινές πηγές, οι οποίες χρησιμεύουν σαν πρότυπα.

Η πηγή C. Αποτελείται από δύο μέρη.

1. πηγή νήματος πυρακτώσεως βολφραμίου, το οποίο παράγει πορτοκαλί φως και ονομάζεται ιδιαιτέρως πηγή A.
2. ένα φίλτρο, που αποτελείται από ένα διαφανές δοχείο με κυανό υγρό, του οποίου η χημική σύνθεση καθορίζεται από την CIE.

Ισοδυναμεί με μέσο φως ημέρας χρωματικής θερμοκρασίας 4874°K

Η πηγή C, αν και είναι κατάλληλη για εργαστηριακή χρήση, είναι τελείως ακατάλληλη για μεγάλες εγκαταστάσεις. Το φίλτρο δε, επειδή απορροφά και τις εγγύς υπεριώδεις ακτίνες, κάνει την πηγή ακατάλληλη και για φθορίζοντα υλικά.

Η σειρά των πηγών D. Αυτά είναι θεωρητικά μέλαν σώμα σε διάφορες θερμοκρασίες. Έτσι έχουμε το D_{65} στους 6500°K , το D_{50} στους 5000°K κ.λ.π..

Στην πράξη οι λάμπες φθορισμού πλησιάζουν το D₆₅, ενώ οι οικιακές λάμπες πυρακτώσεως μοιάζουν με την πηγή C.

Οι χρωματικές συντεταγμένες (x_D, y_D) της πηγής D δίνονται από τους τύπους (συναρτήσεις της θερμοκρασίας

Για 4000° K ≤ T_C ≤ 7000° K

$$x_D = -4.6070 \frac{10^9}{T_c^3} + 2.9678 \frac{10^6}{T_c^2} + 0.09911 \frac{10^3}{T_c} + 0.244063$$

Για 7000° K ≤ T_C ≤ 7000° K

$$x_D = -2.0064 \frac{10^9}{T_c^3} + 1.9018 \frac{10^6}{T_c^2} + 0.24748 \frac{10^3}{T_c} + 0.237040$$

και
$$y_D = -3.00x_D^2 + 2.870x_D - 0.275$$

Οι φασματικές κατανομές των πηγών D υπολογίζονται προσεγγιστικά με τον γραμμικό συνδυασμό μιας μέσης και δύο βοηθητικών κατανομών.

2.3.13. Ομοιόμορφοι χρωματικοί χώροι της CIE

Δεδομένου ότι ο προσδιορισμός της διαφοράς δύο χρωμο-ερεθισμάτων εμπεριέχει μια ασάφεια, η CIE [54] προτείνει την χρήση δύο ομοιόμορφων χρωματικών χώρων.

Ο χώρος CIE L*u*v* (1976)

Αυτός ο χώρος παράγεται με την σχεδίαση σε ορθογώνιες συντεταγμένες των ποσοτήτων L*, u*, v* που προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$L^* = 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

$$u^* = 13 L^* (u' - u'_n)$$

$$v^* = 13 L^* (v' - v'_n)$$

με τον περιορισμό Y/Y_n > 0.01. Για τιμές Y/Y_n ≤ 0.008856 χρησιμοποιείται η σχέση: L*_n = 903.0 Y/Y_n. Στα παραπάνω οι μεταβλητές υπολογίζονται ως εξής:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, \quad u'_n = \frac{4X_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n}$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}, \quad v'_n = \frac{9Y_n}{X_n + 15Y_n + 3Z_n}$$

Οι τιμές με τον δείκτη n είναι οι τιμές που λαμβάνονται σαν το χρωμο-ερέθισμα ενός λευκού αντικειμένου. Συνήθως σαν λευκό λαμβάνεται το χρωμο-ερέθισμα μιας πηγής A ή D₆₅, όταν ανακλάται από ένα τέλειο διαχύτη. Αυτά είναι οι τριχρωματικές τιμές με Y_n=100. Η ποσότητα L* ονομάζεται **lightness**.

Η διαφορά χρώματος μεταξύ δύο χρωμο-ερεθισμάτων δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta E^*_{uv} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2}$$

Χρώματα με ΔE_{uv}^* λιγότερο του τρία, δύσκολα ξεχωρίζονται. Για σταθερό L* το (u', v') χρωματικό διάγραμμα είναι ένας προβολικός μετασχηματισμός του CIE1931 (x, y) διαγράμματος. Ευθείες γραμμές στο (x, y) διάγραμμα παραμένουν ευθείες στο (u', v') διάγραμμα.

Στον τρισδιάστατο χώρο το διάγραμμά του παριστάνει κωνοειδές από εξομαλισμένα δισδιάστατα χρωματικά διαγράμματα και με κορυφή την αρχή των αξόνων. Δεδομένου ότι τα φασματικά χρώματα σχηματίζουν βρόγχους γύρω από την αρχή των αξόνων, είναι δυνατόν να ορίσουμε μία **γωνία αποχρώσεως (hue angle)** h_{uv}, η οποία να αντιπροσωπεύει κάθε απόχρωση με μία αριθμητική τιμή. Ο θετικός u* άξονας ορίζεται σαν 0° και οι γωνίες μετρώνται αντίθετα από τους δείκτες του ρολογιού.

$$h_{uv} = \arctan (v^* / u^*)$$

Η ποσότητα

$$C^*_{uv} = [(u^*)^2 + (v^*)^2]^{1/2}$$

σχετίζεται με τον χρωματισμό (chroma), και η ποσότητα

$$S^*_{uv} = C^*_{uv}/L^*$$

σχετίζεται με τον κορεσμό (saturation). Σε μια σειρά χρωμο-ερεθισμάτων σταθερής χρωματικότητας αλλά μεταβλητής λαμπρότητας το S*_{uv} παραμένει σταθερό.

Το μοντέλο CIELUV 1976, επειδή είναι πιο εύχρηστο από το XYZ CIE 1931, προτιμάται στην χρήση του από τις βιομηχανίες των φωτογραφικών φιλμ και των τηλεοράσεων.

Ο χώρος CIE L*a*b* (1976)

Αυτός ο χώρος παράγεται με την σχεδίαση σε ορθογώνιες συντεταγμένες των ποσοτήτων L^* , a^* , b^* που προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$L^* = 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 [(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}]$$

$$b^* = 200 [(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]$$

με τον περιορισμό $X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n, > 0.01$.

Αν δεν ισχύει αυτός ο περιορισμός, ισχύουν άλλοι τύποι.

$$L^*_m = 903.3 (Y/Y_n) \text{ για } (Y/Y_n) \leq 0.008856$$

$$\text{Και } a^*_m = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)], \quad b^*_m = 200 [f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)]$$

Όπου:

$$f(X/X_n) = (X/X_n)^{1/3} \quad (X/X_n) > 0.008856$$

$$f(X/X_n) = 7.787 (X/X_n) + 16/116 \quad (X/X_n) \leq 0.008856$$

$$f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3} \quad (Y/Y_n) > 0.008856$$

$$f(Y/Y_n) = 7.787 (Y/Y_n) + 16/116 \quad (Y/Y_n) \leq 0.008856$$

$$f(Z/Z_n) = (Z/Z_n)^{1/3} \quad (Z/Z_n) > 0.008856$$

$$f(Z/Z_n) = 7.787 (Z/Z_n) + 16/116 \quad (Z/Z_n) \leq 0.008856$$

Η διαφορά χρώματος μεταξύ δύο χρωμο-ερεθισμάτων δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

Το L^* του CIELAB είναι το ίδιο με το L^* του CIELUV. Όμως, οι συντεταγμένες (u^* , v^*) δεν συνδέονται με απλούς τύπους με τα (a^* , b^*). Για σταθερό L^* οι ευθείες γραμμές του (x , y) ή του CIELUV (1976) γίνονται γενικά καμπύλες στο CIELAB. Άρα από το διάγραμμα αυτό δεν μπορούν να προσδιορισθούν τα προσθετικά μίγματα των χρωμάτων. Αυτή η έλλειψη γραμμικότητας κάνει το μοντέλο αυτό κατάλληλο για περιπτώσεις διακρίσεως δύο σχεδόν

όμοιων χρωμάτων. Χρησιμοποιείται κυρίως από τις βιομηχανίες βαφών τοίχων και βαφών υφασμάτων.

2.3.14. Έλλαττωματική αντίληψη χρωμάτων

Αν και οι περισσότεροι άνθρωποι αντιλαμβάνονται τα χρώματα, όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, υπάρχει και ένα ποσοστό, που τα αντιλαμβάνονται διαφορετικά. Ονομάζονται **αχρωμάτωπες**, αλλά στην πραγματικότητα δεν είναι έτσι, γιατί αντιλαμβάνονται κάποια χρώματα, ενώ κάποια άλλα τα συγχέουν. Αυτή η σύγχυση στην αντίληψη των χρωμάτων οφείλεται στην ελαττωματική λειτουργία κάποιου είδους φωτοϋποδοχέων.

Ανάλογα με το ποιοι φωτοϋποδοχείς δυσλειτουργούν, τους χωρίζουμε στις εξής κατηγορίες:

Ανώμαλοι τριχρωμάτωπες λέγονται αυτοί που, αν και όλοι οι φωτοϋποδοχείς λειτουργούν, δεν καταφέρνουν να συνθέσουν τα χρώματα κανονικά, γιατί έχουν διαφορετικές φωτοευαίσθητες χρωστικές. Έτσι π.χ. οι **πρωτανώμαλοι** στα L κωνία δεν έχουν ερυθρολαβή αλλά κάτι παρόμοιο με πρασινολαβή. Έτσι τα L και τα M κωνία δίνουν παρόμοια σήματα.

Διχρωμάτωπες λέγονται αυτοί, που ένα είδος κωνίων δεν λειτουργεί. Αυτοί διακρίνονται σε **πρωτάνωπες** όταν δεν λειτουργούν τα L κωνία, **δευτεράνωπες** τα M, και **τριτάνωπες** τα S.

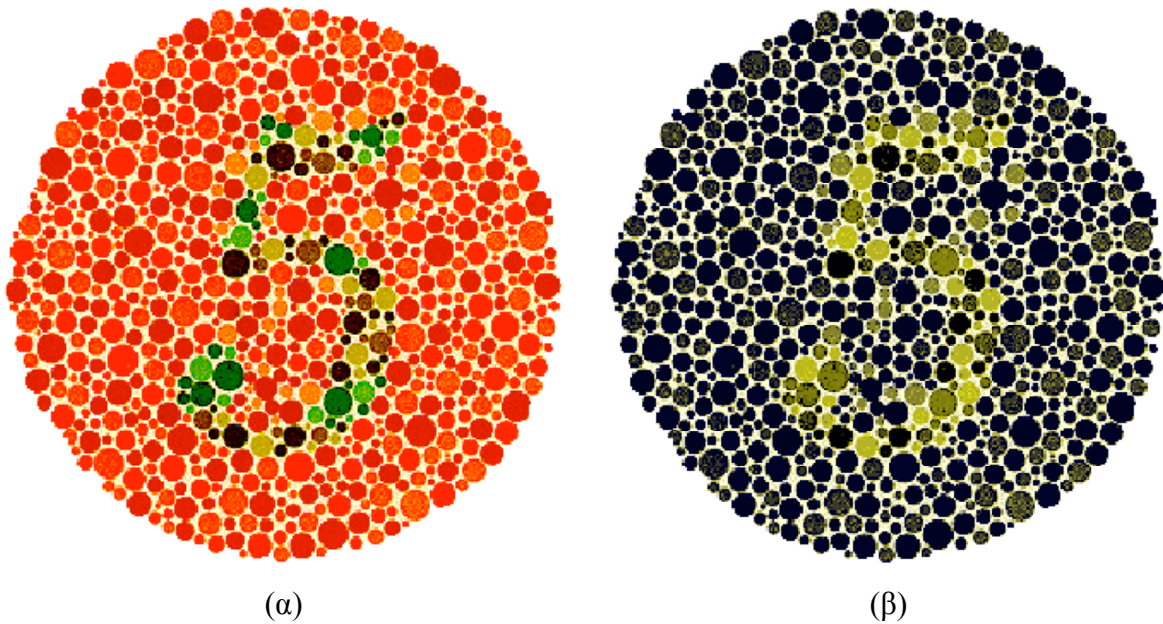
Μονοχρωμάτωπες λέγονται αυτοί, που είτε έχουν μόνο ραβδία και καθόλου κωνία (**μονοχρωμάτωπες ραβδίων**), είτε αυτοί που έχουν ραβδία, αλλά από κωνία έχουν μόνο τα S (**μονοχρωμάτωπες S κωνίων**). Αυτοί οι τελευταίοι είναι εξαιρετικά σπάνιοι. Έχοντας ήδη δύο είδη φωτοϋποδοχέων, η χρωματική σύνθεση που επιτυγχάνουν, μοιάζει με αυτή των διχρωματώπων. Έτσι παράγουν κάποιες μεταμερικές συνθέσεις στην μεσοπική περιοχή οράσεως. Οι μονοχρωμάτωπες ραβδίων εξ άλλου, παρουσιάζουν μεγάλη φωτοφοβία και μόνο με πολύ σκούρα γυαλιά μπορούν να ανεχθούν τα συνηθισμένα επίπεδα λαμπρότητας. Ο χρόνος όμως προσαρμογής τους στο σκοτάδι είναι μικρότερος από το φυσιολογικό.

Οι διχρωμάτωπες, αλλά και οι ανώμαλοι τριχρωμάτωπες βλέπουν κάποια χρώματα σαν ίδια, παρόλο που αυτά φαίνονται σαφώς διαφορετικά στους τριχρωμάτωπες. Αυτά τα συγκεχυμένα χρώματα βρίσκονται πάνω σε ευθείες γραμμές, τις **ισοχρωματικές**, που συγκλίνουν σε ένα σημείο, στα χρωματικά διαγράμματα. Το πλήθος των ισοχρωματικών γραμμών δίνει πληροφορίες για το ελάχιστο μέγεθος της μεταβολής στο μήκος κύματος $\Delta\lambda$, για να γίνει αντιληπτό άλλο χρώμα.

Οι πρωτάνωπες δεν μπορούν να ξεχωρίσουν το ερυθρό από το πράσινο, ενώ το ερυθρό το βλέπουν πιο σκούρο από το κανονικό. Οι δευτεράνωπες επίσης αδυνατούν να ξεχωρίσουν το

ερυθρό από το πράσινο, χωρίς όμως κανένα χρώμα να τους φαίνεται πιο σκούρο από το κανονικό. Οι τριτάνωπες δεν ξεχωρίζουν το κίτρινο από το κυανό. Όλα όμως τα χρώματα φαίνονται κανονικά ως προς την φωτεινότητα.

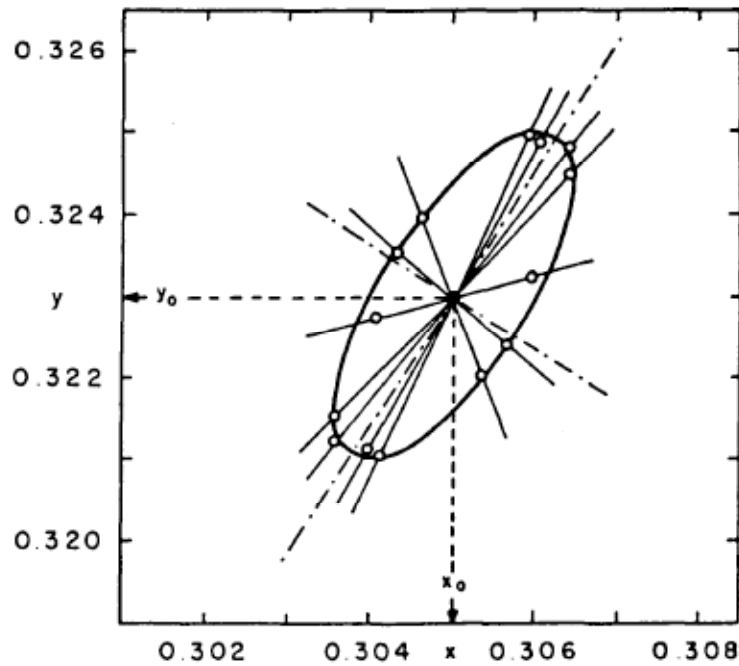
Η διερεύνηση του αν κάποιος είναι δυσχρωμάτωπας γίνεται με κατάλληλες ισοχρωματικές πινακίδες του Ishihara (σχήμα 2-21).



Σχήμα 2-21. Μία από τις πινακίδες του Ishihara [55]. (α) όπως την βλέπει ένας κανονικός τριχρωμάτωπας και (β) όπως την βλέπει ένας πρωτάνωπας.

2.3.15. Οι ελλείψεις του MacAdam

Ο MacAdam έκανε οπτικές ταυτίσεις μεταβάλλοντας την χρωματικότητα του δοκιμαστικού ερεθίσματος κατά μήκος μιας ευθείας στο διάγραμμα xy CIE1931, διατηρώντας σταθερή την λαμπρότητα (luminance). Διαπίστωσε ότι η τυπική απόκλιση σε κάθε σημείο αναφοράς σχημάτιζε μια έλλειψη με κέντρο το σημείο αυτό αναφοράς (σχήμα 2-22).



Σχήμα 2-22. Σχηματισμός των ελλείψεων του MacAdam [56].

Επιπροσθέτως, προσδιόρισε τα χρωματικά κατώφλια κατά μήκος αυτών των ευθειών, για το ίδιο ερέθισμα αναφοράς και βρήκε ότι είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερα από τις αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις. Για 25 ερεθίσματα αναφοράς είχε 25 διαφορετικές ελλείψεις (σχήμα 2-23).

Αυτές περιγράφονται από τις εξισώσεις:

$$g_{11} (dx)^2 + 2g_{12} dx dy + 2g_{22} (dy)^2 = 1$$

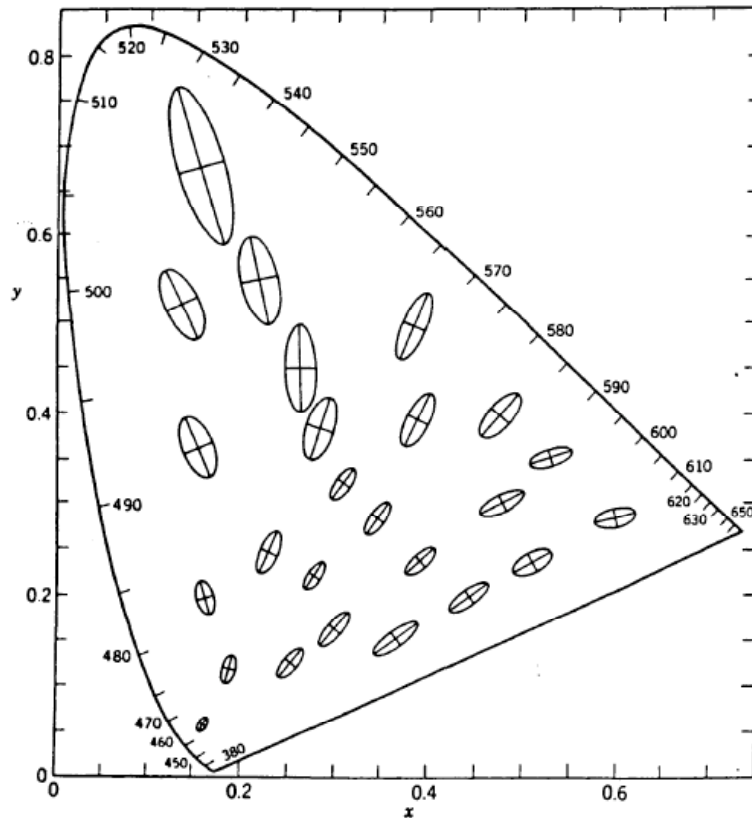
Οι συντελεστές g έχουν τις εξής σχέσεις με τις παραμέτρους των ελλείψεων a , b , θ :

$$g_{11} = \frac{1}{a^2} \cos^2 \theta + \frac{1}{b^2} \sin^2 \theta$$

$$g_{12} = \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \sin \theta \cdot \cos \theta$$

$$g_{22} = \frac{1}{a^2} \sin^2 \theta + \frac{1}{b^2} \cos^2 \theta$$

Αυτές οι τιμές των g διαφέρουν κατά συστηματικό τρόπο από έλλειψη σε έλλειψη.



Σχήμα 2-23. Οι ελλείψεις του MacAdam στο χρωματικό διάγραμμα CIE 1931 [56].

Στην προσπάθεια του MacAdam να παράγει μια συνάρτηση μεταβολής των g διαπιστώθηκε ότι έπρεπε να αποκλίνει από τις υπολογισθείσες τιμές των συντελεστών των ελλείψεων κατά τι.

Κατά ένα ελαφρά διαφορετικό τρόπο, οι MacAdam και Silverstein, αναλύσανε τις προηγούμενες μετρήσεις και δεχθήκανε ότι θα έπρεπε οι κατανομές των ταυτίσεων για κάθε ερέθισμα αναφοράς να ακολουθούν την κανονική κατανομή Gauss. Τα αποτελέσματά τους διαφέρουν κατά τι από τα παρατηρηθέντα.

Αν στον ανωτέρω τύπο ορισμού των ελλείψεων θέσουμε ds αντί για 1 τότε έχουμε:

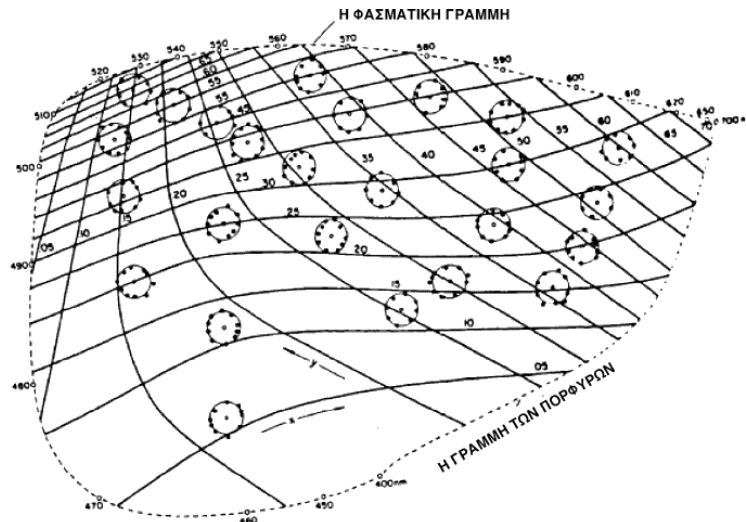
$$g_{11} (dx)^2 + 2g_{12} dx dy + 2g_{22} (dy)^2 = (ds)^2$$

Αυτό το ds μπορεί να θεωρηθεί σαν η απόσταση μεταξύ των σημείων (x, y) και $(x+dx, y+dy)$.

Βάζοντας $ds=3$ ορίζουμε τις λεγόμενες **ελλείψεις διακρίσεως**. Σε πρακτικές όμως εφαρμογές θέτουμε $ds=1$ κάνοντας την τυπική απόκλιση σαν την μοναδιαία διαφορά χρωματικότητας.

Ο Farnsworth [57] ανέπτυξε ένα μη γραμμικό μετασχηματισμό του CIExy1931 διαγράμματος, στον οποίον οι ελλείψεις του MacAdam γίνονται σχεδόν ίσοι κύκλοι.

Αναπαράσταση αυτού του καμπυλόγραμμου χώρου φαίνεται στο σχήμα 2-24.



Σχήμα 2-24. Ομογενής χρωματομετρικός χώρος κατά Farnsworth [57].

Είναι δυνατόν να προσεγγισθεί η ομογενούς χρωματικότητας επιφάνεια με έναν αριθμό επιπέδων διαγραμμάτων, που παριστάνουν μια μικρή περιοχή της καμπύλης επιφάνειας. Σε κάθε ένα από αυτά τα επίπεδα διαγράμματα η έλλειψη διακρίσεως μετασχηματίζεται σε κύκλο μοναδιαίας ακτίνας ($ds=1$) και τα x, y σχηματίζουν πλαγιογώνιο σύστημα αξόνων.

Μετρήσεις ανάλογες με αυτές του MacAdam, αλλά με μεταβλητή λαμπρότητα (luminance) οδήγησαν σε ελλειψοειδή με εξίσωση ορισμού:

$$(ds)^2 = \text{σταθ.} = g_{11} (dx)^2 + 2g_{12} dx dy + g_{22} (dy)^2 + 2g_{23} dy dl + g_{33} (dl)^2 + 2g_{13} dx dl$$

όπου $l = (1/5) \log_{10} Y$.

Αν $dY=0$ άρα $dl=0$ τότε τα g γίνονται συγκρίσιμα με αυτά του MacAdam. Αν $dx=dy=0$ τότε,

$$\text{με } ds=1, \text{ έχουμε } \frac{\Delta Y}{Y_n} = \frac{34.6}{\sqrt{g_{33}}}.$$

Θεωρώντας ότι στην φωτοπική περιοχή οράσεως ισχύει η προσθετικότητα και ότι οι ελλείψεις του MacAdam εισάγουν μετρική στον χρωματικό διανυσματικό χώρο, έγινε προσπάθεια να αναπτυχθεί και (μη ευκλείδεια) γεωμετρία αυτού του χώρου [58]. Δεν έχει όμως βρει πρακτικές εφαρμογές.

Όταν ελαττώνεται η λαμπρότητα, τότε οι ελλείψεις μεγαλώνουν σε μέγεθος, σύμφωνα με τους τύπους: [59]

$$a = 7.366 x^{-0.358}$$

$$b = 1.809 x^{-0.220}$$

όπου x η λαμπρότητα σε cd/m^2 . Αυτοί οι τύποι ισχύουν για εύρος $3 \leq x \leq 10000 \text{ cd/m}^2$.

2.3.16. Τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης

Η συνεισφορά των ραβδίων γίνεται φανερή, όταν το οπτικό πεδίο γίνεται μεγαλύτερο από 2° , όταν η όραση γίνει καθαρά περιφερειακή, οπότε η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας γίνεται πιο πλατιά από την $V(\lambda)$ [60], και ακόμη για μικρά γωνιακά ανοίγματα φαίνεται να ελαττώνεται ο κορεσμός και η απόχρωση να γίνεται πιο αβέβαιη [61]. Επίσης, όταν η λαμπρότητα ελαττωθεί πολύ, ώστε να τείνει να γίνει σκοτοπική. Η Trezona ανέπτυξε ένα τετραχρωματικό σύστημα συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης, βασισμένο σε πειράματά της, που να ισχύει σε ένα εύρος λαμπροτήτων από τη σκοτοπική μέχρι την φωτοπική. [62]

Οι προϋποθέσεις που έθεσε για μια επιτυχή πειραματική διαδικασία είναι:

- 1) Πρέπει να οδηγεί σε μια και μοναδική λύση για κάθε μήκος κύματος και κάθε επίπεδο λαμπρότητας.
- 2) Πρέπει να υπάρχει μια συγκεκριμένη και καλά σχεδιασμένη διαδικασία.
- 3) Να μην χρειάζονται μακροχρόνιες μετρήσεις
- 4) Πρέπει η στατιστική αβεβαιότητα να είναι μικρή σχετικά με την οπτική αβεβαιότητα.

Η Trezona χρησιμοποίησε ένα διμερές πεδίο 10° , το οποίο τροφοδότησε αφ' ενός με χρωμοερέθισμα $Q(\lambda)$ και αφ' ετέρου με τέσσερα πρωτεύοντα ερεθίσματα R, Y, C, B σταθερών μηκών κύματος $\lambda_R=644 \text{ nm}$, $\lambda_Y=588 \text{ nm}$, $\lambda_C=509 \text{ nm}$, $\lambda_B=468 \text{ nm}$. Και τα πέντε ερεθίσματα μπορούσαν να μεταβάλλουν την ισχύ τους από μηδέν μέχρι το σημείο να δίνει μέτρια φωτοερεθίσματα.

Η διαδικασία έγινε ως εξής. Αρχικά έγινε μια τριχρωματική ταύτιση με τα R, Y, B σε μέτρια επίπεδα λαμπρότητας. Ακολούθως η λαμπρότητα όλων χαμήλωσε σε επίπεδα κάτω από το κατώφλι των κωνίων. Εκεί δεν διακρίνονται χρώματα, παρ' εκτός από το απώτερο ερυθρό, το οποίο δίνει μια ερυθρή χροιά ακόμη και στο απόλυτο κατώφλι οράσεως. Φυσιολογικά, τα δύο μέρη του πεδίου φαίνονται άχρωμα, αλλά διαφορετικής λαμπρότητας. Τότε χρησιμοποιείται το πρωτεύον C , του οποίου το λ_C είναι κοντά στο μέγιστο της $V'(\lambda)$. Με τη βοήθεια αυτού γίνεται ταύτιση φωτεινότητας στο σκοτοπικό επίπεδο. Όταν η φωτεινότητα αποκαθίσταται στην αρχική, τότε η χρωματική ταύτιση έχει χαθεί. Ξαναγίνεται τότε ταύτιση με τα R, Y, B . Αυτή η διαδικασία γίνεται μερικές φορές, μέχρις ότου η ταύτιση είναι πλήρης και στα μέτρια και στα χαμηλά επίπεδα. Τυπικά τέσσερις επαναλήψεις είναι αρκετές.

Με αλλαγή του λ του Q η Trezona έκανε ένα πλήρες σύνολο από τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης. Διάγραμμά τους φαίνεται στο σχήμα 2-25. Η τετραχρωματική εξίσωση ταύτισης είναι:

$$QQ = R^{(4)}R + Y^{(4)}Y + C^{(4)}C + B^{(4)}B$$

Θέτοντας $Q=1$ έχουμε $r^{(4)}(\lambda)=R^{(4)}/Q$ κ.λ.π.. Οι ποσότητες $r^{(4)}(\lambda)\dots b^{(4)}(\lambda)$ ορίζονται σαν τετραχρωματικές CMF. Η παραπάνω εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$\mathbf{Q} = r^{(4)} \mathbf{R} + y^{(4)} \mathbf{Y} + c^{(4)} \mathbf{C} + b^{(4)} \mathbf{B}$$

Για ένα ορισμένο επίπεδο λαμπρότητας το πρωτεύον χρωμο-ερέθισμα C μπορεί να εκφρασθεί συναρτήσει των τριών άλλων:

$$\mathbf{C} = r^{(3)}(\lambda_C) \mathbf{R} + y^{(3)}(\lambda_C) \mathbf{Y} + b^{(3)}(\lambda_C) \mathbf{B}$$

Τότε έχουμε:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= [r^{(4)}(\lambda_C) + c^{(4)}(\lambda_C) r^{(3)}(\lambda_C)] \mathbf{R} \\ &+ [y^{(4)}(\lambda_C) + c^{(4)}(\lambda_C) y^{(3)}(\lambda_C)] \mathbf{Y} \\ &+ [b^{(4)}(\lambda_C) + c^{(4)}(\lambda_C) b^{(3)}(\lambda_C)] \mathbf{B} \end{aligned}$$

Οι ποσότητες μέσα στις αγκύλες είναι οι τριχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης, που προέκυψαν από τις τετραχρωματικές σε αυτό το ορισμένο επίπεδο λαμπρότητας.

Για μια ορισμένη λαμπρότητα βρέθηκε πειραματικά:

$$\mathbf{C} = -5.00 \mathbf{R} + 1.43 \mathbf{Y} + 0.087 \mathbf{B}$$

Οπότε, με κατάλληλους γραμμικούς μετασχηματισμούς των τριχρωματικών συναρτήσεων ταύτισης CIE 1964, μπορούμε να κάνουμε σύγκριση, για αυτό το επίπεδο λαμπρότητας, μεταξύ των δύο τριάδων.

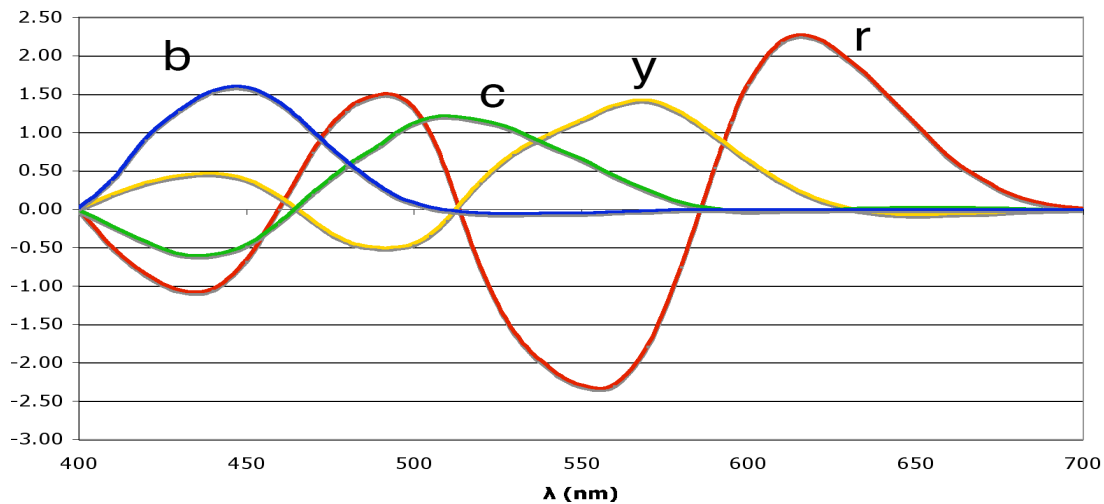
Δύο είναι τα ενδιαφέροντα αποτελέσματα των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης.

1) Η κηλίδα του Maxwell, η οποία είναι ορατή στο διμερές πεδίο των 10° , όταν χρησιμοποιείται τριχρωματική ταύτιση για κάποιο μονοχρωματικό δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα, δεν είναι ορατό, όταν γίνουν τετραχρωματικές ταυτίσεις.

2) Η τετραχρωματική ταύτιση σε πεδίο 10° είναι αποδεκτή και όταν το πεδίο γίνεται $1^\circ 20'$.

Ο M. Brill (1990) [63] απέδειξε θεωρητικά ότι κατ' αρχάς το τετραχρωματικό σύστημα της Trezona έχει βάση υπάρξεως, γιατί οι ευαισθησίες των κωνίων και των ραβδίων είναι φασματικά ανεξάρτητες. Επίσης, το επαναληπτικό πείραμα ταύτισης της Trezona συγκλίνει με αυτά τα πρωτεύοντα χρωμο-ερεθίσματα που επιλέχθηκαν.

Πειράματα από την Trezona δεν έδειξαν παραβίαση της τετραχρωματικής προσθετικότητας, ενώ αντίθετα, η παραβίαση της τριχρωματικής προσθετικότητας ήταν καταφανέστατη. [64]



Σχήμα 2-25. Οι τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης της Τρεζονα.

2.4. Αναγνώριση χρωμάτων στην μεσοπική όραση

Ο Hunt το 1994 [65] έκανε ένα μοντέλο, που προβλέπει το χρώμα για ένα εύρος φωτεινότητας από την μεσοπική ως την σκοτοπική. Έχει αξιόλογα αποτελέσματα, αλλά απαιτεί πολύπλοκους υπολογισμούς.

Οι Buck κλπ. [66] έκαναν ένα μοντέλο που λαμβάνει υπ' όψη τους την ασύμμετρη επίδραση των ραβδίων στην αντίληψη της χρωματικής απόχρωσης. Δηλαδή πρόσθεση του σήματος των ραβδίων στο κίτρινο μετατοπίζει την απόχρωση προς το πράσινο, ενώ πρόσθεσή του στο κυανό την μετατοπίζει προς το ερυθρό. Στο μοντέλο τους τα σήματα των ραβδίων επηρεάζουν σε διαφορετικό βαθμό κάθε είδος κωνίων (L, M, S).

Οι Shin κλπ. [67-68] πρότειναν ένα άλλο μοντέλο για την χρωματική αντίληψη στην μεσοπική όραση. Μελέτησαν την επίδραση των ραβδίων και κατέληξαν σε μοντέλων δύο φάσεων. Αυτή η επίδραση των ραβδίων, δέχτηκαν ότι γίνεται στα δύο αντιθετικά χρωματικά κανάλια, αλλά και στο αχρωματικό κανάλι λαμπρότητας. Έτσι, με την αλλαγή του φωτισμού, αλλάζουν και η απόχρωση (hue) και ο κορεσμός (saturation) αλλά και η λευκότητα (lightness).

Πειράματα αναγνώρισεως χρωμάτων έχουν γίνει από τον Taiichiro Ishida [69] χρησιμοποιώντας έγχρωμες ψηφίδες σε διάφορα επίπεδα φωτισμού.

3. Στόχοι της διατριβής

Όπως φάνηκε καθαρά από τις προηγούμενες παραγράφους, το σπουδαίο πρόβλημα της χρωματομετρίας είναι η έλλειψη προσθετικότητας, που οφείλεται στην επίδραση των ραβδίων. Αυτή η έλλειψη προσθετικότητας εκδηλώνεται με πολλές μορφές. Είτε σαν κηλίδα του Maxwell, οπότε έχει σχέση με την έκταση του οπτικού πεδίου. Είτε σαν αλλοίωση των χρωματομετρικών χαρακτηριστικών ενός χρωμο-ερεθίσματος στις χαμηλές λαμπρότητες, οπότε σχετίζεται με την γενικότερη μη γραμμικότητα της μεσοπικής οράσεως. Είτε σαν ενισχυτικού ή ακυρωτικού τύπου, ήδη στην φωτοπική όραση, που οφείλεται στον υψηλό κορεσμό και έχει σχέση με την ύπαρξη των αντιθετικών καναλιών στο οπτικό μας σύστημα.

Το μόνο σύστημα που φαίνεται να έχει ελπίδες να εφαρμοσθεί καθολικά σε όλο το εύρος των λαμπροτήτων και σε ικανή διακύμανση εύρους του οπτικού πεδίου είναι το τετραχρωματικό, το οποίο εισάχθηκε από την Trezona. Όπως ελέγχθη στα προηγούμενα αυτό παράχθηκε πειραματικά από την οπτική συμπεριφορά δύο παρατηρητών. Βέβαια, χωρίς να μπορεί να αμφισβητηθεί η σπουδαιότητα της έρευνας της Trezona, θα πρέπει παρ' όλα αυτά να χαρακτηριστεί σαν πιλοτική. Θα πρέπει να βασισθεί σε ήδη υπάρχουσες πρακτικές, για τις οποίες θα πρέπει να θεωρείται σαν επέκταση.

Αυτός είναι ο σκοπός της παρούσας διατριβής. Αποπειράται να επεκταθεί το υπάρχον σύστημα της φωτοπικής χρωματομετρίας, στην περιοχή της μεσοπικής οράσεως. Η επέκταση αυτή θα γίνει έτσι ώστε, να είναι δυνατόν να προβλεφθεί ένα σύνθετο χρωμοερέθισμα, από τον συνδυασμό των επί μέρους συνιστωσών του, όλα σε μεσοπικές συνθήκες. Επί πλέον, για αυτό το σύνθετο χρωμο-ερεθισμα να είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε την μεσοπική λαμπρότητα και χρωματικότητά του. Αυτό θα γίνει, θέτοντας τους εξής επί μέρους στόχους: Θα αναπτυχθεί θεωρητικά από τις ήδη διαθέσιμες και αποδεκτές από την CIE καμπύλες, ένα τετραχρωματικό χρωματομετρικό σύστημα, το οποίο θα ελεγχθεί για την πιστότητά του και πειραματικά. Συγκεκριμένα,

- 1) Αναπτύσσεται ένα τετραχρωματικό χρωματομετρικό μοντέλο, με καθαρά θεωρητικούς υπολογισμούς, από τις γενικά αποδεκτές καμπύλες CMF CIE 1964 των 10° , και την σκοτοπική καμπύλη $V'(\lambda)$.
- 2) Ακολουθεί πειραματικός έλεγχος της προσθετικότητας στην μεσοπική περιοχή οράσεως.
- 3) Στην περίπτωση που αποδεικνύεται επαρκές, ευρίσκεται τρόπος να μετατρέπονται οι τυχαίες τετραχρωματικές ταυτίσεις σε τριχρωματικές (ανηγγμένες) για το ίδιο τυχαίο χρωμο-ερέθισμα, σε οποιοδήποτε μεσοπικό επίπεδο λαμπρότητας. Αυτό θα δίνει την δυνατότητα του

προσδιορισμού του χρώματος ενός χρωμο-ερεθίσματος στην μεσοπική περιοχή οράσεως. Μέχρι σήμερα για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιείται η τριχρωματική φωτοπική CIE 1931 ή CIE 1964. Αυτό όμως στην μεσωπία δεν είναι ακριβές. Όπως ελέχθη προηγουμένως, όσο η λαμπρότητα πλησιάζει να γίνει σκοτοπική, τόσο τα χρωμο-ερεθίσματα αποκτούν μια κυανίζουσα χροιά. Αυτό δεν προβλέπεται από τα σημερινά χρωματομετρικά μοντέλα.

4) Δεδομένου ότι στην χρωματομετρία έχει ενσωματωθεί η φωτομετρία, ενδιάμεσος στόχος των ανωτέρω είναι να προσδιοριστεί η μεσοπική λαμπρότητα των φωτο-ερεθισμάτων κατασκευάζοντας το σχετικό μοντέλο.

Συνοπτικά μπορεί να λεχθεί, ότι η επίτευξη του σκοπού της διατριβής γίνεται σε τρία βήματα:

i) Παράγεται ένα τετραχρωματικό μοντέλο χρωματομετρίας, στο οποίο ισχύει η γραμμικότητα.

ii) Παράγεται ένα δεύτερο μοντέλο, που να περιγράφει την φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού σε μεσοπικές συνθήκες.

iii) Παράγεται ένα τρίτο μοντέλο, που να περιγράφει την χρωματικότητα στην μεσοπική όραση. Αυτό το μοντέλο θα είναι επέκταση του αντίστοιχου καθιερωμένου της φωτοπικής (τυπικός παρατηρητής CIE 1964).

Τα πρακτικά αποτελέσματα της διατριβής είναι διπλά:

A) Η δυνατότητα του υπολογισμού της μεσοπικής λαμπρότητας μιας φωτεινής πηγής κάνει πιο ρεαλιστικές τις εκτιμήσεις για την ικανότητα των ανθρώπινων οπτικών ικανοτήτων (π.χ. φωτεινότητα των αντικειμένων, οπτική οξύτητα, διάκριση των αντικειμένων κλπ). Αυτό συνεπάγεται την καλλίτερη εκμετάλλευση αυτών των ικανοτήτων, όπου η όραση είναι σε μεσοπικά επίπεδα. Επί παραδείγματι, σε περιπτώσεις οδοφωτισμού, μπορεί να επιλεγεί το είδος του φωτιστικού σώματος εκείνο, για το οποίο η οπτική ικανότητα που μας ενδιαφέρει γίνεται μέγιστη. Αυτό μπορεί να σημαίνει εγκαταστάσεις φωτισμού με λιγότερο κόστος και την ίδια απόδοση, ή με το ίδιο κόστος αλλά με καλλίτερη απόδοση.

B) Η δυνατότητα προσδιορισμού της χρωματικότητας στην μεσοπική όραση, παρέχει το αναγκαίο υπόβαθρο για την δημιουργία συσκευών (π.χ. μόνιτορ κλπ), οι οποίες θα λαμβάνουν υπ' όψιν τους την μεσοπική αλλοίωση των χρωμάτων, ώστε να τα αποδίδουν πιστικότερα. Επίσης ο κλάδος των διαφημίσεων και η βιομηχανία παραγωγής κινουμένων σχεδίων στον κινηματογράφο, θα μπορούν να αποδώσουν ρεαλιστικότερα τα χρώματα, όπως φαίνονται σε μεσοπικές συνθήκες. Το έδαφος είναι παρθένο για καινοτόμες εφαρμογές.

4. Πειραματική διερεύνηση

4.1. Στόχοι της πειραματικής διάταξης

Πειραματική διάταξη είναι αναγκαία για τις χρωματικές ταυτίσεις. Δεδομένου ότι δεν κυκλοφορεί στο εμπόριο μια τέτοια συσκευή, πρέπει να σχεδιαστεί και κατασκευαστεί στο εργαστήριο.

Πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένη, ώστε να επιτρέπει ταυτίσεις και τριχρωματικές και τετραχρωματικές. Αυτό σημαίνει ότι τα χρωμο-ερεθίσματα που θα χρησιμοποιηθούν να είναι $4+1=5$: τα τέσσερα πρωτεύοντα και το δοκιμαστικό. Αυτά θα χωριστούν σε δύο ομάδες, οι οποίες θα τροφοδοτήσουν τα δύο μέρη του διμερούς πεδίου. Για το κάθε μέρος του διμερούς πεδίου πρέπει η ανάμιξη των χρωμο-ερεθισμάτων να είναι τέλεια. Γι αυτό θα χρησιμοποιηθούν δύο ολοκληρώνοντες χώροι, με λευκή επικάλυψη εσωτερικά. Πάντοτε στις (τριχρωματικές ή τετραχρωματικές) ταυτίσεις πρέπει ένα από τα πρωτεύοντα να προστίθεται στο δοκιμαστικό. Άρα οι δύο ομάδες των πέντε χρωμο-ερεθισμάτων πρέπει να έχουν η μία τρία και η άλλη δύο χρωμο-ερεθίσματα.

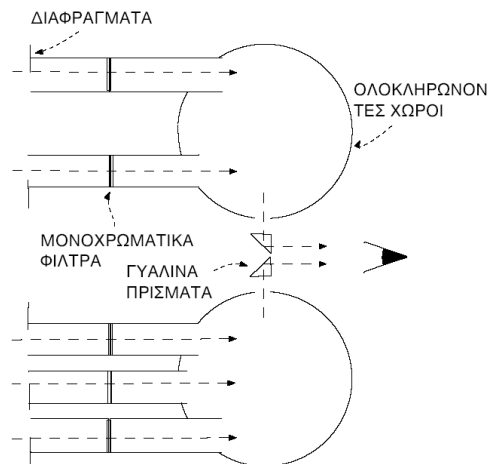
Τα χρωμο-ερεθίσματα που θα χρησιμοποιηθούν να είναι μονοχρωματικά. Θα παραχθούν από μονοχρωματικά φίλτρα συμβολής, τα οποία επιτρέπουν μικρό εύρος μήκους κυμάτων να διέλθουν. Για το ποια ακριβώς μήκη κύματος θα επιλεγούν για τα πρωτεύοντα, υπάρχει μια σχετική ελευθερία. Παρ' όλα αυτά καλό είναι τα πρωτεύοντα να πλησιάζουν τα αντίστοιχα του τυπικού παρατηρητή (CIE 1964) $R=645\text{nm}$, $G=525\text{nm}$, $B=444\text{nm}$. Το τέταρτο πρωτεύον να είναι κοντά στο μέγιστο της σκοτοπικής καμπύλης (509nm).

Η φωτεινή πηγή, που θα τροφοδοτεί την συσκευή να είναι όσο το δυνατόν πιο ισχυρή. Αυτό, διότι αφ' ενός τα μονοχρωματικά φίλτρα ελαττώνουν κατά πολύ την ένταση του φωτός, και αφ' ετέρου επιδιώκονται εντάσεις που να φτάνουν μέχρι τα φωτοπικά επίπεδα, ώστε οι ταυτίσεις να ξεκινούν από την φωτοπική περιοχή.

Μέριμνα πρέπει να ληφθεί για αποκλεισμό των τυχόν υπεριωδών ακτινοβολιών. Δεν είναι βέβαια ορατές, αλλά είναι δυνατόν να προκαλέσουν φθορισμούς και να αλλοιώσουν τα αποτελέσματα. Ένα κατάλληλο φίλτρο εμπρός από την πηγή είναι αρκετό.

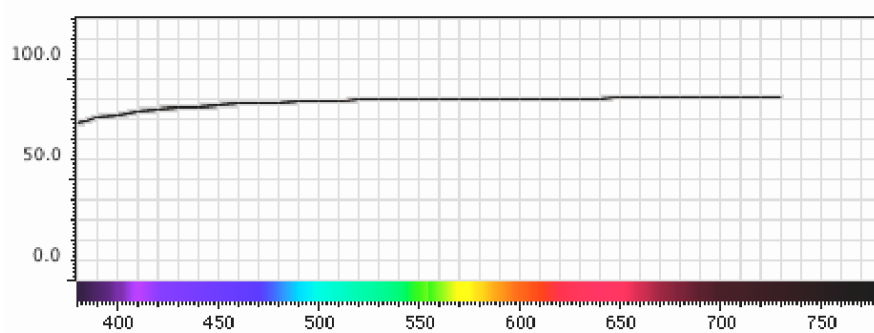
4.2. Διατάξεις που αναπτύχθηκαν

Σε όλες τις πειραματικές διαδικασίες χρησιμοποιείται μια πειραματική διάταξη αναγκαία για τις χρωματικές ταυτίσεις. Αυτή σχεδιάζεται και κατασκευάζεται από τον γράφοντα, στο εργαστήριο Φωτοτεχνίας. Σχέδιό της φαίνεται στο σχήμα 4-1. Είναι μια παραλλαγή της καθιερωμένης συσκευής Donaldson [70-72], που χρησιμοποιείται για χρωματικές ταυτίσεις.



Σχήμα 4-1. Η πειραματική διάταξη για χρωματικές ταυτίσεις.

Μια σχετικά μακρινή πηγή ισχυρού φωτός από λυχνία τόξου ξένου στέλνει σχεδόν παράλληλη δέσμη φωτός κάθετα σε μονοχρωματικά φίλτρα συμβολής, κεντρικού μήκους κύματος R, G, B, t, όπως παραπάνω, αφού με κατάλληλα διαφράγματα ρυθμιστεί η ένταση σε κάθε ένα από αυτά. Οι μονοχρωματικές δέσμες κατευθύνονται σε ολοκληρώνοντες χώρους. Από εκεί βγαίνουν τα «χρωματικά μίγματα» και με την βοήθεια γυάλινων πρισμάτων κατευθύνονται στον οφθαλμό του παρατηρητή. Λαμβάνεται μέριμνα για την εσωτερική επίστρωση των ολοκληρωνόντων χώρων με λευκό ακρυλικό, το οποίο απορροφά σχεδόν ομοιόμορφα στο ορατό φάσμα, οπότε δεν υπάρχει καμιά ανεπιθύμητη χρωματική αλλοίωση. Στο σχήμα 4-2 φαίνεται το φάσμα ανακλάσεως της ακρυλικής επίστρωσης.



Σχήμα 4-2. Το φάσμα ανακλάσεως της επίστρωσης στο εσωτερικό των ολοκληρωνόντων χώρων.

Η απόσταση του οφθαλμού είναι η κατάλληλη για να επιτυγχάνεται εύρος οπτικού πεδίου 10° . Σε κάθε περίπτωση οι ενέργειες μετρώνται με το IL1700 Research Radiometer με

μετρητική κεφαλή SED 033 και φίλτρα W (wide vision) και F (flat radiometric), της εταιρίας International Light.

4.3. Μεθοδολογία πειραμάτων χρωματικής ταύτισης με ανθρώπινα υποκείμενα

Η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθείται γενικά είναι η εξής:

Χρησιμοποιούνται ανθρώπινα υποκείμενα, τα οποία εκτελούν τις (τρι- και τετρα-) χρωματικές ταυτίσεις. Τα υποκείμενα είναι και από τα δύο φύλα, παρ' όλο που οι γυναίκες ίσως έχουν αυξημένη ικανότητα γι' αυτό. Όλοι πρέπει να είναι κανονικοί τριχρωμάτωπες. Αυτό μπορεί να ελεγχθεί με τις πινακίδες του Ishihara (§2.3.11).

Πριν από κάθε πείραμα χρωματικής ταύτισης πρέπει τα υποκείμενα να παραμείνουν στο σκοτάδι για τουλάχιστον 15 λεπτά, ώστε να υπάρξει η ανάλογη προσαρμογή των οφθαλμών.

Το διμερές πεδίο πρέπει να έχει διάμετρο 10^0 . Το υπόβαθρο είναι σκοτεινό. Σε κάθε πείραμα τα υποκείμενα επιχειρούν ταύτιση στην περιφέρεια του διμερούς πεδίου, ενώ ατενίζουν την κεντρική περιοχή του πεδίου. Με αυτόν τον τρόπο θα αποφεύγεται η αλλοίωση της ταύτισης από την κηλίδα του Maxwell, που παρατηρείται στην κεντρική περιοχή διαμέτρου σχεδόν 2^0 . Αυτή η κηλίδα οφείλεται, όπως έχει προαναφερθεί, στην διαφορά επιδράσεως των ραβδίων στην περιοχή της ωχράς κηλίδας, διαμέτρου περίπου 2^0 από αυτήν στην περιφέρεια.

Ολόκληρη η έρευνα αυτής της διατριβής βασίζεται στη μελέτη των συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης. Οι συναρτήσεις αυτές δείχνουν την αναλογική συνεισφορά κάθε ενός από τα πρωτεύοντα, για να επιτευχθεί ταύτιση, με κάθε μονοχρωματικό δοκιμαστικό χρωμο-ερεθίσμα, με την προϋπόθεση, πως όλα αυτά τα δοκιμαστικά χρωμο-ερεθίσματα, έχουν την ίδια ισχύ. Αυτό συνεπάγεται ότι στις ταυτίσεις της παρούσας πειραματικής έρευνας πρέπει τα δοκιμαστικά χρωμο-ερεθίσματα να μετρώνται με την (ραδιομετρική) ισχύ τους και όχι με την (φωτοπική) λαμπρότητά τους. Μετρήσεις ισχύος θα πρέπει να γίνονται και για τα πρωτεύοντα.

Εφ' όσον οι ταυτίσεις γίνονται στην μεσοπική περιοχή για να ερευνηθεί η μεταβολή τους, πρέπει να καλύπτουν ένα ικανό εύρος λαμπροτήτων από σχεδόν την σκοτοπική όραση, μέχρι σχεδόν το φωτοπικό όριο. Δεδομένου δε, ότι η σχέση ερεθισμάτων-αισθημάτων είναι λογαριθμική, πρέπει να επιλεγούν τιμές της φωτεινής ισχύος, που να απέχουν μεταξύ τους χοντρικά κατά μία λογαριθμική μονάδα. Τέσσερα λογαριθμικά βήματα ισχύος είναι αρκετά για να δώσουν επαρκή αποτελέσματα.

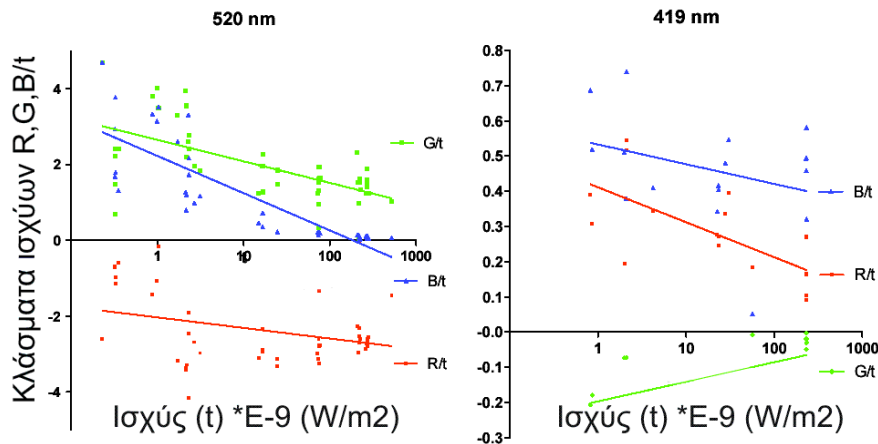
Σε κάθε επίπεδο φωτεινής ισχύος γίνονται ταυτίσεις από κάθε ένα ανθρώπινο υποκείμενο διαδοχικά. Αυτή η διαδοχή των υποκειμένων αποτρέπει την κόπωση στην όραση. Κάθε υποκείμενο έχει στην διάθεσή του απεριόριστο χρόνο για να επιτύχει μια ταύτιση. Κάνει μια ταύτιση και μετά διακόπτει για λίγο κάνοντας ένα μικρό διάλειμμα και μετά επιστρέφει και συνεχίζει. Είναι ελεύθερο να διορθώσει την ταύτιση όσες φορές χρειάζεται, ώστε να αισθάνεται σιγουριά για το αποτέλεσμα. Σε κάθε ταύτιση μετρώνται οι ισχείς του δοκιμαστικού και των πρωτευόντων. Πέντε μετρήσεις για το κάθε χρωμο-ερεθίσμα καταγράφονται και ο μέσος όρος τους χρησιμοποιείται για τους περεταίρω υπολογισμούς.

Τα προς ταύτιση δοκιμαστικά χρωμο-ερεθίσματα δεν είναι ένα αλλά περισσότερα. Οι ταυτίσεις του δεν γίνονται για όλα την ίδια ημέρα, αλλά τα πειράματα μοιράζονται σε αρκετές ημέρες. Καταβάλλεται προσπάθεια ώστε στα πειράματα κάθε χρωμο-ερεθίσματος, να συμμετέχουν τα ίδια υποκείμενα. Αυτό βέβαια δεν είναι πάντοτε δυνατόν. Εν πάσει όμως περιπτώσει, καταβάλλεται προσπάθεια κάθε άτομο να συμμετέχει στα πειράματα τουλάχιστον δύο δοκιμαστικών χρωμο-ερεθισμάτων. Επίσης είναι σημαντικό, τα ίδια υποκείμενα να συμμετέχουν στα πειράματα του ίδιου δοκιμαστικού χρωμο-ερεθίσματος και σε τετραχρωματικές και σε τριχρωματικές ταυτίσεις.

4.4. Προκαταρκτικά πειράματα τριχρωματικών ταυτίσεων, με στόχο να ερευνηθεί η σταθερότητά τους στην μεσοπική όραση

Έγιναν προκαταρκτικά πειράματα τριχρωματικής ταύτισης στο εργαστήριο φωτοτεχνίας, με στόχο να ερευνηθεί αν οι τριχρωματικές ταυτίσεις μένουν σταθερές στην μεσοπική όραση. Τυχόν μεταβολή των ταυτίσεων θα δείχνει, ότι ο νόμος της αναλογικότητας του Grassmann δεν ισχύει στην μεσοπική όραση.

Σε αυτά τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν 14 υποκείμενα. Έγιναν ταυτίσεις ανοίγματος οπτικού πεδίου 10° με σκοτεινό υπόβαθρο, για δύο δοκιμαστικές (t) μονοχρωματικές ακτινοβολίες, 520nm και 419nm αντίστοιχα, στην ανώτερη μεσοπική περιοχή οράσεως, όπως επίσης και σε τρία ακόμη επίπεδα ισχύος, κάθε ένα κατά μία τάξη μεγέθους χαμηλότερο από το προηγούμενό του. Σαν πρωτεύοντα χρωμο-ερεθίσματα ελήφθησαν οι μονοχρωματικές ακτινοβολίες $R=641.82\text{nm}$, $G=560.5\text{nm}$ και $B=441.2\text{nm}$. Για κάθε ένα από τα δύο δοκιμαστικά (t) έγιναν ταυτίσεις σε 4 συνολικά επίπεδα ισχύος. Σε κάθε περίπτωση υπολογίστηκαν οι λόγοι ισχύων R/t , G/t , B/t . Αυτοί οι λόγοι δείχνουν την συμμετοχή των πρωτευόντων **R**, **G**, **B** στην ταύτιση. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα ημιλογαριθμικά διαγράμματα του σχήματος 4-3.



Σχήμα 4-3. Τριχρωματικές ταυτίσεις των δοκιμαστικών $t_1=520\text{nm}$ και $t_2=419\text{nm}$ σε διάφορα μεσοπικά επίπεδα ισχύος, με πρωτεύοντα τα $R=641.82\text{nm}$, $G=560.5\text{nm}$ και $B=441.2\text{nm}$.

Από τα διαγράμματα αυτά είναι φανερά τέσσερα γεγονότα:

- 1) Οι ευθείες που παριστούν την προσαρμογή των δεδομένων, δεν είναι οριζόντιες, αλλά παρουσιάζουν μια κλίση.
- 2) Οι κλίσεις των ευθειών προσαρμογής δεν είναι ίδιες για τους τρεις λόγους R/t , G/t , B/t . Κάθε ένας λόγος, για κάθε μήκος κύματος t παρουσιάζει διαφορετική κλίση.
- 3) Ειδικά η ευθεία B/t στο $t=520\text{ nm}$ παρουσιάζει μεγαλύτερη κλίση από τις άλλες δύο R/t και G/t , ενώ στο $t=419\text{ nm}$ μικρότερη από τις αντίστοιχες R/t και G/t .
- 4) Η διασπορά των σημείων R/t , G/t , B/t αυξάνεται, όσο μειώνεται η αντίστοιχη ισχύς t .

Αυτά ερμηνεύονται ως εξής: Τα (1, 2) σημαίνουν ότι η συμμετοχή των τριών πρωτεύοντων **R**, **G**, **B** στην ταύτιση δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το επίπεδο ισχύος του δοκιμαστικού χρωμο-ερεθίσματος (t). Αν η συμμετοχή τους ήταν σταθερή, τότε οι ευθείες θα ήταν οριζόντιες. Αυτό ακριβώς αποδεικνύει εμπράκτως την έλλειψη προσθετικότητας των χρωμο-ερεθισμάτων στην μεσοπική περιοχή οράσεως. Το (3) σημαίνει ότι η συμμετοχή του **B** αυξάνεται σχετικά με τα άλλα δύο **R**, **G** στα δοκιμαστικά χρωμο-ερεθίσματα t μεγάλου μήκους κύματος (520 nm), όσο ελαττώνεται η ισχύς, άρα και η λαμπρότητα του t . Δηλαδή με την μείωση της λαμπρότητας, το t παίρνει μια κυανωπή χροιά. Αυτό είναι αναμενόμενο, λόγω της μετατοπίσεως του Purkinje. Αντίθετα, στα μικρού μήκους κύματος (419 nm) η αίσθηση του κυανού ελαττώνεται. Το (4) σημαίνει ότι καθώς η λαμπρότητα του δοκιμαστικού χρωμο-ερεθίσματος t ελαττώνεται, η ίδια η χρωματική ταύτιση γίνεται πιο ασαφής, χωρίς να ευθύνεται γι αυτό η πειραματική διάταξη. Και αυτό είναι αναμενόμενο. Στην ακραία μάλιστα περίπτωση, που η ενέργεια του t αντιστοιχεί στην σκοτοπική περιοχή

οράσεως, η χρωματομετρική ταύτιση καταντά ταύτιση φωτεινότητας μόνο. Οπότε τότε οποιοδήποτε από τα τρία βασικά **R**, **G**, **B** μπορεί ή μόνο του ή σε συνδυασμό με άλλο να κάνει ταύτιση. Άρα στην σκοτοπική περιοχή πρέπει να υπάρχει απειρία διακεκριμένων «τριχρωματικών» ταυτίσεων.

Η διαπιστωμένη λοιπόν έλλειψη προσθετικότητας στην μεσοπική όραση κάνει το ισχύον τριχρωματικό σύστημα CIE 1964 ακατάλληλο για χρήση σε αυτή την περιοχή οράσεως. Μία άλλη λύση λοιπόν είναι επιβεβλημένη.

5. Το τετραχρωματικό μοντέλο

5.1. Η τετραχρωματική προσέγγιση

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται ένα τετραχρωματικό μοντέλο [73], με καθαρά θεωρητικούς υπολογισμούς, από τις συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης CIE 1964 των 10° , και την σκοτοπική καμπύλη $V'(\lambda)$. Θα αποδειχθεί η ισοδυναμία του με τα πειραματικά αποτελέσματα της Trezona. Για κάθε δε επίπεδο λαμπρότητας, θα μπορεί να αναχθεί στο σύνηθες τριχρωματικό, όπως περιγράφεται στην βιβλιογραφία [74].

Έστω το τυχαίο μονοχρωματικό χρωμο-ερέθισμα \mathbf{Q} .

Αναλύεται στον διανυσματικό χώρο των τυχαίων πρωτευόντων $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$.

$$\mathbf{Q} = r\mathbf{R} + g\mathbf{G} + b\mathbf{B} \quad (5-1)$$

Έστω ένα ακόμη πρωτεύον, το \mathbf{P} , το οποίο όμως σε αυτόν τον διανυσματικό χώρο εξαρτάται γραμμικά από τα άλλα τρία. Αναλύεται το \mathbf{Q} στα τέσσερα πρωτεύοντα.

$$\mathbf{Q} = u\mathbf{R} + v\mathbf{G} + w\mathbf{B} + p\mathbf{P} \quad u, v, w, p \text{ άγνωστοι πραγματικοί αριθμοί}$$

Να τονιστεί ότι το « $r\mathbf{R} + g\mathbf{G} + b\mathbf{B}$ » και το « $u\mathbf{R} + v\mathbf{G} + w\mathbf{B} + p\mathbf{P}$ » είναι διαφορετικές αναπαραστάσεις του ίδιου ερεθίσματος \mathbf{Q} .

Αναλύεται το \mathbf{P} σε συνιστώσες των υπολοίπων τριών και γίνεται αντικατάσταση.

$$\mathbf{P} = R_p\mathbf{R} + G_p\mathbf{G} + B_p\mathbf{B} \quad R_p, G_p, B_p \text{ γνωστοί πραγματικοί αριθμοί}$$

$$\mathbf{Q} = u\mathbf{R} + v\mathbf{G} + w\mathbf{B} + p(R_p\mathbf{R} + G_p\mathbf{G} + B_p\mathbf{B})$$

$$\mathbf{Q} = (u + p R_p)\mathbf{R} + (v + p G_p)\mathbf{G} + (w + p B_p)\mathbf{B} \quad (5-2)$$

Με εξίσωση των (5-1) και (5-2)

$$\begin{aligned} r &= u + p R_p & u &= r - p R_p \\ g &= v + p G_p & \text{ή ισοδύναμα} & & v &= g - p G_p \\ b &= w + p B_p & & & w &= b - p B_p \end{aligned} \quad (5-3)$$

Από εδώ φαίνεται ότι ουσιαστικά άγνωστος είναι μόνο ο p . Τα υπόλοιπα εξαρτώνται από το p . Για διαφορετικές τιμές του p λαμβάνονται διαφορετικές τριάδες (u, v, w) , άπειρες το πλήθος.

Άρα η εισαγωγή ενός επιπλέον διανύσματος (χρωμο-ερεθίσματος) σαν βάση καταλήγει σε απροσδιοριστία με άπειρες λύσεις. Από αυτές τις άπειρες λύσεις επιλέγεται αυτή κατά την οποία το \mathbf{Q} αλλά και ο ισοδύναμος με αυτό συνδυασμός των τεσσάρων πρωτευόντων έχουν την ίδια σκοτοπική συνιστώσα.

$$S_Q = u S_R + v S_G + w S_B + p S_P \quad (5-4)$$

όπου

$$S_Q = \int QV'(\lambda) d\lambda, \quad S_P = \int PV'(\lambda) d\lambda$$

$$S_R = \int R V'(\lambda) d\lambda, \quad S_G = \int G V'(\lambda) d\lambda, \quad S_B = \int B V'(\lambda) d\lambda$$

από τις (4-3) και (4-4) λαμβάνεται η λύση

$$p = \frac{r \cdot S_R + g \cdot S_G + b \cdot S_B - S_Q}{R_p \cdot S_R + G_p \cdot S_G + B_p \cdot S_B - S_p} \quad (5-5)$$

Το Q θεωρήθηκε μονοχρωματικό (λ_Q). Άρα και το S_Q είναι συνάρτηση του λ . Άρα και το p και τα u, v, w είναι συναρτήσεις του λ .

Αν το Q είναι μοναδιαίο σε ισχύ, δηλαδή ληφθεί σαν μονάδα μετρήσεως ισχύων, τότε

$$S_Q = V'(\lambda_Q) \quad (5-6)$$

Τα $u(\lambda), v(\lambda), w(\lambda), p(\lambda)$ είναι τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης.

Από αυτές είναι δυνατόν να προκύψουν οι συνήθειες τριχρωματικές, με την βοήθεια των σχέσεων (5-3).

5.2. Σύγκριση με το σύστημα Trezona

Αν στους προηγούμενους τύπους (5-3) και (5-5) τεθεί $R=644\text{nm}$, $G=588\text{nm}$, $B=468\text{nm}$ και $P=509\text{nm}$, τότε οι θεωρητικές $u(\lambda), v(\lambda), p(\lambda), w(\lambda)$ μοιάζουν με τις πειραματικές $r(\lambda), y(\lambda), c(\lambda), b(\lambda)$ της Trezona. Ο πίνακας 5-1 δίνει τιμές των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης, όπως υπολογίζονται από το θεωρητικό μοντέλο, με πρωτεύοντα $R=644\text{nm}$, $G=588\text{nm}$, $P=509\text{nm}$ και $B=468\text{nm}$ (του συστήματος της Trezona) για διάφορα μήκη κύματος.

Πίνακας 5-1. Οι τιμές των θεωρητικών τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης με πρωτεύοντα $R=644\text{nm}$, $G=588\text{nm}$, $P=509\text{nm}$ και $B=468\text{nm}$ (του συστήματος της Trezona) για διάφορα μήκη κύματος (λ).

λ (nm)	$u(\lambda)$	$v(\lambda)$	$p(\lambda)$	$w(\lambda)$
390	-0.000139	0.000719	-0.002898	0.007718
395	-0.014870	0.007001	-0.011706	0.024010
400	-0.056498	0.024046	-0.034442	0.064089
405	-0.148094	0.060929	-0.082341	0.147197
410	-0.308646	0.124768	-0.164957	0.291135
415	-0.522470	0.208907	-0.275888	0.490161
420	-0.760195	0.301567	-0.401543	0.726992
425	-0.948487	0.375163	-0.509149	0.954920
430	-1.067449	0.422059	-0.587139	1.154695
435	-1.143204	0.451945	-0.643543	1.333368
440	-1.135527	0.449376	-0.656331	1.453528
445	-1.012659	0.402935	-0.613333	1.492516
450	-0.813318	0.326895	-0.525042	1.460935
455	-0.588880	0.240243	-0.409985	1.383730
460	-0.359957	0.149023	-0.268775	1.261022

465	-0.129261	0.055107	-0.110620	1.111239
470	0.086174	-0.036738	0.073747	0.925841
475	0.403762	-0.159782	0.287057	0.702763
480	0.711562	-0.273090	0.485889	0.502202
485	0.893766	-0.341389	0.653459	0.342835
490	0.983298	-0.372957	0.788728	0.221028
495	0.942158	-0.354141	0.891151	0.131514
500	0.677535	-0.257106	0.960526	0.065431
505	0.295894	-0.112877	0.996082	0.019700
510	-0.195277	0.074596	1.003018	-0.013171
515	-0.809829	0.311927	0.976758	-0.033056
520	-1.435194	0.563092	0.924688	-0.042677
525	-1.954560	0.787002	0.857217	-0.048791
530	-2.432436	1.003392	0.773437	-0.050647
535	-2.882736	1.215646	0.678332	-0.048564
540	-3.246784	1.402747	0.578488	-0.044150
545	-3.434128	1.533104	0.479083	-0.038760
550	-3.478533	1.621130	0.385599	-0.033181
555	-3.422230	1.681608	0.297640	-0.026910
560	-3.222558	1.697145	0.218483	-0.020260
565	-2.854916	1.657785	0.152002	-0.014216
570	-2.337249	1.565136	0.098693	-0.009225
575	-1.716354	1.426777	0.058456	-0.005474
580	-1.047350	1.265051	0.029062	-0.002804
585	-0.381431	1.101656	0.007925	-0.000753
590	0.254287	0.932229	-0.005283	0.000502
595	0.826674	0.758695	-0.011850	0.001079
600	1.298444	0.594610	-0.013924	0.001304
605	1.647183	0.448178	-0.013293	0.001268
610	1.863525	0.323044	-0.011094	0.000955
615	1.951429	0.222336	-0.008541	0.000781
620	1.923073	0.147497	-0.006209	0.000519
625	1.800945	0.094012	-0.004378	0.000419
630	1.613942	0.055319	-0.002770	0.000234
635	1.393774	0.028164	-0.001476	0.000075
640	1.170882	0.009178	-0.000516	0.000044
645	0.957279	-0.002295	0.000129	-0.000011
650	0.761662	-0.007368	0.000461	-0.000106
655	0.588788	-0.007988	0.000392	0.000031
660	0.445026	-0.007361	0.000352	0.000037
665	0.329282	-0.006200	0.000383	-0.000098
670	0.238744	-0.004747	0.000292	-0.000075
675	0.170970	-0.003602	0.000223	-0.000057
680	0.121291	-0.002750	0.000174	-0.000044
685	0.084894	-0.001925	0.000122	-0.000031
690	0.059273	-0.001373	0.000088	-0.000022
695	0.040763	-0.000835	0.000052	-0.000013
700	0.028190	-0.000559	0.000035	-0.000009
705	0.019941	-0.000544	0.000038	-0.000009
710	0.013435	-0.000280	0.000018	-0.000005
715	0.009547	-0.000272	0.000020	-0.000005
720	0.006797	-0.000267	0.000021	-0.000005
725	0.004177	-0.000009	0.000000	0.000000
730	0.002944	-0.000007	0.000000	0.000000
735	0.001995	-0.000005	0.000000	0.000000
740	0.001425	-0.000004	0.000000	0.000000
745	0.000951	-0.000003	0.000000	0.000000

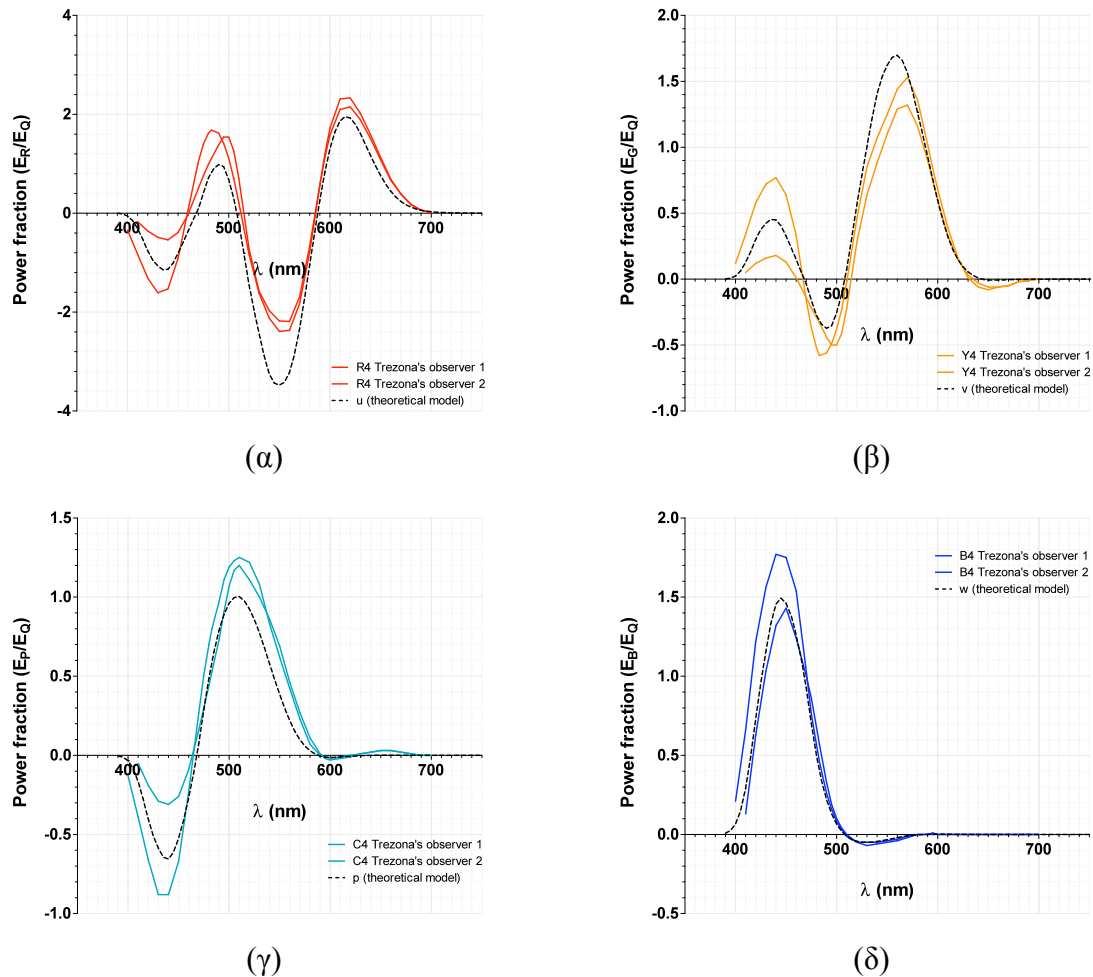
750	0.000666	-0.000002	0.000000	0.000000
755	0.000476	-0.000001	0.000000	0.000000
760	0.000380	-0.000001	0.000000	0.000000
765	0.000285	-0.000001	0.000000	0.000000
770	0.000190	-0.000001	0.000000	0.000000
775	0.000096	0.000000	0.000000	0.000000
780	0.000095	0.000000	0.000000	0.000000

Πίνακας 5-2. Οι τιμές των **πειραματικών** συναρτήσεων τετραχρωματικής ταύτισης της Trezona, χρησιμοποιώντας τα πρωτεύοντα **R=644nm**, **G=588nm**, **P=509nm** και **B=468nm** για κάθε έναν από τους δύο παρατηρητές (α) και (β).

λ (nm)	R4α	Y4α	C4α	B4α	R4β	Y4β	C4β	B4β
400					-0.34	0.12	-0.13	0.21
410	-0.17	0.05	-0.05	0.13	-0.83	0.34	-0.39	0.66
420	-0.36	0.12	-0.19	0.63	-1.31	0.58	-0.66	1.22
430	-0.49	0.16	-0.29	1.03	-1.61	0.72	-0.88	1.56
440	-0.54	0.18	-0.31	1.32	-1.53	0.77	-0.88	1.77
450	-0.39	0.13	-0.26	1.43	-0.91	0.64	-0.67	1.75
460	-0.02	0.01	-0.09	1.24	0.08	0.33	-0.23	1.54
470	0.50	-0.14	0.16	1.00	1.04	-0.16	0.27	1.03
475	0.76	-0.22	0.30	0.86	1.40	-0.37	0.51	0.76
480	0.99	-0.29	0.44	0.68	1.62	-0.52	0.70	0.57
483	1.11	-0.33	0.53	0.57	1.68	-0.58	0.80	0.46
490	1.38	-0.44	0.73	0.33	1.62	-0.56	0.97	0.26
495	1.54	-0.50	0.91	0.19	1.41	-0.49	1.11	0.16
500	1.54	-0.50	1.07	0.10	1.11	-0.38	1.19	0.08
505	1.26	-0.41	1.17	0.04	0.70	-0.23	1.23	0.03
510	0.70	-0.22	1.20	0.00	0.21	-0.02	1.25	-0.01
520	-0.71	0.28	1.11	-0.05	-0.83	0.46	1.22	-0.05
530	-1.58	0.64	1.00	-0.07	-1.62	0.85	1.08	-0.05
540	-1.97	0.88	0.86	-0.06	-2.12	1.07	0.83	-0.05
550	-2.18	1.10	0.69	-0.05	-2.39	1.25	0.62	-0.04
560	-2.19	1.29	0.46	-0.04	-2.37	1.44	0.42	-0.03
570	-1.69	1.32	0.27	-0.02	-1.83	1.53	0.23	-0.01
580	-0.66	1.16	0.11	0.00	-0.78	1.36	0.07	0.00
590	0.57	0.90	0.01	0.00	0.57	1.02	0.00	0.00
595	1.13	0.75	-0.02	0.01	1.20	0.84	-0.01	0.00
600	1.58	0.60	-0.03	0.00	1.72	0.68	-0.02	0.00
610	2.10	0.33	-0.02	0.00	2.31	0.39	-0.01	0.00
620	2.15	0.15	-0.01	0.00	2.33	0.16	0.00	0.00
630	1.89	0.03	0.01	0.00	2.02	0.01	0.01	0.00
640	1.51	-0.03	0.02	0.00	1.59	-0.06	0.02	0.00
650	1.08	-0.06	0.03	0.00	1.13	-0.08	0.03	0.00
660	0.67	-0.06	0.03	0.00	0.69	-0.06	0.03	0.00
670	0.39	-0.05	0.02	0.00	0.39	-0.05	0.02	0.00
680	0.18	-0.02	0.01	0.00	0.17	-0.02	0.01	0.00
690	0.06	-0.01	0.00	0.00	0.06	-0.01	0.00	0.00
700	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00

Ο πίνακας 5-2 δείχνει τα πειραματικά αποτελέσματα των τετραχρωματικών ταυτίσεων, που έκανε η Trezona, με δύο παρατηρητές, με τα πρωτεύοντα **R=644nm**, **G=588nm**, **P=509nm**

και $B=468\text{nm}$. Τα διαγράμματα του σχήματος 5-1 δείχνουν τις πειραματικές (της Trezona) και τις θεωρητικές (από το μοντέλο) τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης σε αντιπαράβολη για σύγκριση.



Σχήμα 5-1 α, β, γ, δ. Σύγκριση των θεωρητικών $\bar{u}(\lambda)$, $\bar{v}(\lambda)$, $\bar{p}(\lambda)$, $\bar{w}(\lambda)$ (διακεκομμένες) με τις πειραματικές $R4(\lambda)$, $Y4(\lambda)$, $C4(\lambda)$, $B4(\lambda)$ των δύο παρατηρητών της Trezona (πλήρεις). (α) για $u(\lambda)$ έναντι $R4(\lambda)$, (β) για $v(\lambda)$ έναντι $Y4(\lambda)$, (γ) για $p(\lambda)$ έναντι $C4(\lambda)$, (δ) για $w(\lambda)$ έναντι $B4(\lambda)$.

Οι αποκλίσεις πιθανόν να οφείλονται στον περιορισμένο αριθμό (μόνο 2) των υποκειμένων της Trezona.

5.3. Ισοδυναμία με το σύστημα Trezona

Ακρογωνιαίος λίθος του ελέγχου των θεωρητικών τετραχρωματικών συναρτήσεων $u(\lambda)$, $v(\lambda)$, $w(\lambda)$, $p(\lambda)$ είναι η προσθετικότητα που τυχόν παρουσιάζουν σε κάθε επίπεδο λαμπρότητας.

Όπως είδαμε ανωτέρω, η Trezona έχει αποδείξει πειραματικά, ότι οι τετραχρωματικές συναρτήσεις που κατασκεύασε πειραματικά η ίδια, παρουσιάζουν προσθετικότητα σε ικανοποιητικό βαθμό. Αν αποδειχθεί, ότι οι παρούσες θεωρητικές συναρτήσεις είναι ισοδύναμες της Trezona, τότε αυτές περνούν με επιτυχία τον έλεγχο της προσθετικότητας.

Είναι δυνατόν να γίνει αποδεκτή η ισοδυναμία των δύο ομάδων καμπύλων, αν

α) τα διαγράμματά τους είναι ουσιαδώς τα ίδια, το οποίο σημαίνει: ότι έχουν τον ίδιον αριθμό τοπικών μεγίστων, τον ίδιον αριθμό τοπικών ελαχίστων, τον ίδιον αριθμό σημείων μηδενισμού και την ίδια μονοτονία μεταξύ των ομολόγων ακροτάτων

β) και για τις θεωρητικές ισχύει ο νόμος της αναλογικότητας, αυτός δηλαδή βάσει του οποίου κατασκευάστηκαν οι πειραματικές.

Για το (α) δεν τίθεται θέμα. Απλή αντιπαραβολή αποδεικνύει την ομοιότητα, όπως φαίνεται από το σχήμα 5-1 της προηγούμενης παραγράφου. Για το (β) θα πρέπει να δειχθεί πειραματικά ότι μια τετραχρωματική ταύτιση δεν μεταβάλλεται, αν αλλάξει το επίπεδο της λαμπρότητας.

5.4. Πειράματα τριχρωματικής και τετραχρωματικής ταύτισης με ανθρώπινα υποκείμενα στην μεσοπική όραση, με στόχο να δειχθεί η σταθερότητα των τετραχρωματικών ταυτίσεων

Έγιναν πειράματα τριχρωματικής και τετραχρωματικής ταύτισης με ανθρώπινα υποκείμενα στην μεσοπική περιοχή οράσεως. Ο στόχος ήταν να αποδειχθεί η τυχόν σταθερότητα των τετραχρωματικών ταυτίσεων. Η μέθοδος ήταν να γίνουν τριχρωματικές και τετραχρωματικές ταυτίσεις για τα ίδια δοκιμαστικά χρωμο-ερεθίσματα, με τα ίδια πρωτεύοντα, από τα ίδια υποκείμενα, ώστε μια απ' ευθείας σύγκριση των αποτελεσμάτων να είναι δυνατή.

Η επί μέρους μέθοδος, όπως και ο εξοπλισμός ήταν όπως περιγράφεται στις παραγράφους §§4.2 και 4.3.

Χρησιμοποιήθηκαν 15 ανθρώπινα υποκείμενα 20-22 ετών και από τα δύο φύλα, όλα με φυσιολογική όραση, αφού τους εξηγήθηκε περί τίνος πρόκειται, και προσαρμόστηκαν στο σκοτάδι για 15 λεπτά. Έγιναν λοιπόν τετραχρωματικές ταυτίσεις για τρεις μονοχρωματικές ακτινοβολίες (451nm, 500nm, 580nm) σε αρκετά επίπεδα ενέργειας διαφέροντα μεταξύ τους κατά μισή τουλάχιστον λογαριθμική μονάδα. Δεν έγινε προσπάθεια ομαδοποιήσεως των

αποτελεσμάτων για το κάθε φύλο ξεχωριστά, παρ' όλο που υπάρχουν ενδείξεις για διαφορές στην αντίληψη των χρωμάτων από το κάθε φύλο [75].

Τα πειράματα για τον έλεγχο της μεταβολής των ταυτίσεων οργανώθηκαν ως εξής:

Δεδομένου ότι οι τιμές της ισχύος από τα τέσσερα πρωτεύοντα χρωμο-ερεθίσματα (u, v, p, w) για τα συγκεκριμένα μήκη κύματος t που επιλέχθηκαν ανωτέρω, τα τρία είναι θετικά και το τέταρτο αρνητικό, ρυθμίστηκαν συγκεκριμένες ισχείς (ραδιομετρικά) για το t και το αρνητικό μαζί, ενώ για τα υπόλοιπα τρία (τα θετικά) έγινε ταύτιση, όπως στις συνήθεις τριχρωματικές και μετρήθηκαν οι ισχείς τους. Η διαδικασία επανελήφθη και για ισχείς χαμηλότερες. Δηλαδή, για διάφορα επίπεδα ισχύος του δοκιμαστικού t , ρυθμίστηκε η αντίστοιχη ισχύς ενός από τα τέσσερα πρωτεύοντα i (το ίδιο πάντοτε), ώστε να είναι σταθερή η αναλογία i/t , αυτή ακριβώς που προβλέπεται από το μοντέλο και για τα υπόλοιπα γίνεται τριχρωματική ταύτιση. Τέλος, σχηματίστηκαν οι λόγοι ισχύων u/t , v/t , p/t , w/t και τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα συναρτήσει της ισχύος του t .

Τα πειραματικά αποτελέσματα των τριχρωματικών και τετραχρωματικών ταυτίσεων για τα δοκιμαστικά χρωμο-ερεθίσματα 451nm, 500nm και 580nm με πρωτεύοντα $R=641.82\text{nm}$, $G=560.5\text{nm}$, $B=441.2\text{nm}$ και $P=520\text{nm}$ παρουσιάζονται στους Πίνακες 5-3 έως 5-8. Τα αρνητικά πρόσημα σημαίνουν ότι τα συγκεκριμένα πρωτεύοντα προστίθενται στο δοκιμαστικό, για να επιτευχθεί ταύτιση.

Πίνακας 5-3. Πειραματικά αποτελέσματα από τριχρωματικές ταυτίσεις για το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα 451nm με πρωτεύοντα $R=641.82\text{nm}$, $G=560.5\text{nm}$ και $B=441.2\text{nm}$, από διάφορα ανθρώπινα υποκείμενα. Η ισχύς του δοκιμαστικού (t) και οι ισχείς των πρωτευόντων είναι σε μονάδες ($\times 10^{-5} \text{ W/m}^2$). Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι το πρωτεύον προστίθεται στο δοκιμαστικό.

Υποκείμενα	t	$-r$	g	b
NIKO	200.00	21.300	1.23	96.000
NIKO	20.00	0.060	0.30	5.680
TSOU	200.00	28.800	4.58	92.200
TSOU	20.00	1.400	0.97	6.000
SKOP	200.00	19.500	0.90	92.700
SKOP	20.00	0.210	1.06	6.200
POLY	15.54	0.800	0.23	7.440
POLY	8.82	0.000	1.20	3.500
POLY	204.00	21.000	5.21	122.300
POLY	147.90	15.430	4.33	89.200
POLY	100.20	9.380	2.66	53.700
POLY	51.60	3.520	2.26	26.500
POLY	20.00	0.930	1.31	10.030

Πίνακας 5-4. Πειραματικά αποτελέσματα από **τετραχρωματικές** ταυτίσεις για το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα **451nm** με πρωτεύοντα $R=641.82nm$, $G=560.5nm$, $P=520nm$ και $B=441.2nm$, από διάφορα ανθρώπινα υποκείμενα. Η ισχύς του δοκιμαστικού (t) και οι ισχύεις των πρωτευνόντων είναι σε μονάδες ($\times 10^{-5} W/m^2$). Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι το πρωτεύον προστίθεται στο δοκιμαστικό.

Υποκείμενα	t	R	-G	B	P
POLY	200.00	33.000	27.20	70.500	15.70
POLY	202.00	32.200	21.70	84.800	14.90
POLY	100.00	17.500	13.45	36.900	8.43
NIKO	200.00	24.400	27.10	99.500	18.30
NIKO	20.00	5.160	2.71	4.350	1.75
TSOU	200.00	20.700	27.10	82.700	15.30
TSOU	20.00	4.820	2.71	4.430	1.86
SKOP	200.00	20.700	27.10	82.600	15.50
SKOP	20.00	5.280	2.71	4.250	1.83
POLY	4.70	0.658	0.65	1.645	0.70
POLY	20.30	4.540	2.78	6.720	1.75
POLY	9.74	2.100	0.97	3.640	0.75
POLY	188.00	52.200	29.20	135.200	29.60
POLY	101.30	18.300	13.45	65.800	12.75
POLY	95.50	17.350	12.00	59.000	21.40
POLY	32.60	3.910	3.95	14.850	2.79
POLY	10.65	0.750	1.60	4.300	0.91
POLY	48.50	8.260	6.53	22.200	5.23
POLY	65.20	12.800	8.83	34.900	6.23
POLY	194.20	38.100	28.00	99.300	20.80
POLY	150.00	29.800	20.20	74.600	16.82
POLY	100.00	24.700	13.80	51.600	12.10
POLY	49.70	10.050	6.70	26.200	5.06
POLY	10.15	2.170	1.34	3.450	0.80
AGGE	147.00	16.210	20.40	63.500	10.30
AGGE	15.00	1.950	2.09	14.850	1.44
STEF	147.00	20.000	20.40	64.500	13.20
STEF	15.00	0.900	2.04	12.450	1.32
TSIG	147.00	23.300	20.40	76.600	16.00
TSIG	15.00	3.840	2.04	13.650	2.57
LHKS	147.00	30.400	20.40	112.000	12.00
LHKS	36.50	0.600	2.04	17.600	1.90

Πίνακας 5-5. Πειραματικά αποτελέσματα από **τριχρωματικές** ταυτίσεις για το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα **500nm** με πρωτεύοντα $R=641.82nm$, $G=560.5nm$ και $B=441.2nm$, από διάφορα ανθρώπινα υποκείμενα. Η ισχύς του δοκιμαστικού (t) και οι ισχύεις των πρωτευνόντων είναι σε μονάδες ($\times 10^{-5} W/m^2$). Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι το πρωτεύον προστίθεται στο δοκιμαστικό.

Υποκείμενα	t	-r	g	b
SKOP	151.90	270.000	94.50	19.200
SKOP	28.50	65.600	26.30	15.650
SKOP	3.72	8.770	4.86	4.800
TSOU	154.00	397.000	137.20	16.730
TSOU	26.90	78.000	50.50	8.810
TSOU	3.47	11.740	6.68	3.340
XALE	122.00	351.000	150.00	29.000
XALE	17.60	50.500	16.60	7.740
XATZ	122.30	336.000	148.80	19.240
XATZ	17.50	58.000	21.50	8.600
NIKO	156.50	300.000	102.20	38.600
NIKO	14.70	16.780	14.60	14.600
TSOU	149.00	319.000	128.00	30.500
TSOU	15.40	17.300	18.60	17.200

Πίνακας 5-6. Πειραματικά αποτελέσματα από **τετραχρωματικές** ταυτίσεις για το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα **500nm** με πρωτεύοντα $R=641.82nm$, $G=560.5nm$, $P=520nm$ και $B=441.2nm$, από διάφορα ανθρώπινα υποκείμενα. Η ισχύς του δοκιμαστικού (t) και οι ισχύεις των πρωτευνόντων είναι σε μονάδες ($\times 10^{-5} W/m^2$). Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι το πρωτεύον προστίθεται στο δοκιμαστικό.

Υποκείμενα	t	R	-G	B	P
SKOP	149.00	50.100	85.30	9.830	136.64
SKOP	72.50	45.600	42.50	6.940	78.00
SKOP	5.55	1.220	3.24	0.650	5.25
NIKO	149.50	31.100	85.30	9.660	134.10
NIKO	72.70	18.160	42.50	3.350	67.24
NIKO	5.55	1.704	3.24	1.010	5.51
TSOU	149.50	31.300	85.30	9.810	180.10
TSOU	72.50	46.000	42.50	7.600	80.70
TSOU	5.55	0.630	3.24	0.820	6.07
XALE	114.70	39.500	67.00	6.800	134.20
XALE	86.80	34.000	51.60	3.750	93.10
XALE	29.10	18.330	17.00	4.362	33.49
XATZ	112.00	40.400	64.00	6.300	134.20
XATZ	88.30	39.000	51.50	10.800	86.30
XATZ	29.00	14.000	17.40	1.750	31.20
NIKO	147.50	76.200	87.90	15.000	154.00
NIKO	14.42	8.280	8.51	1.340	17.48
NIKO	9.20	5.200	5.19	1.620	9.31
TSOU	145.00	78.300	85.50	15.700	157.20
TSOU	14.41	9.035	8.36	2.020	17.23
TSOU	9.00	5.360	5.22	1.170	9.44

POLY	200.00	95.000	117.00	18.400	205.00
POLY	12.30	3.420	16.70	3.300	23.00
POLY	100.00	40.100	58.00	5.730	105.90
POLY	3.85	12.500	9.96	0.000	6.00

Πίνακας 5-7. Πειραματικά αποτελέσματα από **τριχρωματικές** ταυτίσεις για το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα **580nm** με πρωτεύοντα $R=641.82nm$, $G=560.5nm$ και $B=441.2nm$, από διάφορα ανθρώπινα υποκείμενα. Η ισχύς του δοκιμαστικού (t) και οι ισχύεις των πρωτευόντων είναι σε μονάδες ($\times 10^{-5} W/m^2$).

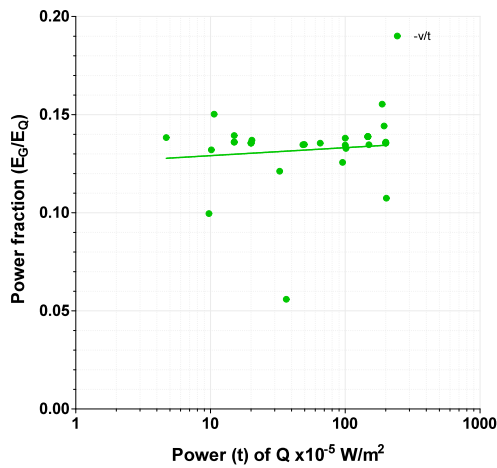
Υποκείμενα	t	r	g	b
POLY	134.500	263.00	73.500	0.300
POLY	90.200	234.00	62.500	0.000
POLY	50.000	125.50	31.600	0.000
XALE	135.000	282.00	73.000	11.400
XALE	90.000	180.00	43.600	9.600
XALE	53.000	128.00	27.100	12.000
XATZ	135.000	281.00	69.400	11.300
XATZ	87.600	176.50	43.700	9.790
XATZ	53.400	128.00	27.600	11.700
POLY	20.300	39.00	8.900	4.500
POLY	85.400	160.10	47.000	9.350
TOPA	79.200	196.50	51.100	5.280
TOPA	19.200	45.80	12.040	4.800
POLY	30.000	95.80	21.600	6.940
POLY	3.500	11.17	2.340	0.900
POLY	6.550	14.10	5.570	1.690

Πίνακας 5-8. Πειραματικά αποτελέσματα από **τετραχρωματικές** ταυτίσεις για το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα **580nm** με πρωτεύοντα $R=641.82nm$, $G=560.5nm$, $P=520nm$ και $B=441.2nm$, από διάφορα ανθρώπινα υποκείμενα. Η ισχύς του δοκιμαστικού (t) και οι ισχύεις των πρωτευόντων είναι σε μονάδες ($\times 10^{-5} W/m^2$). Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι το πρωτεύον προστίθεται στο δοκιμαστικό.

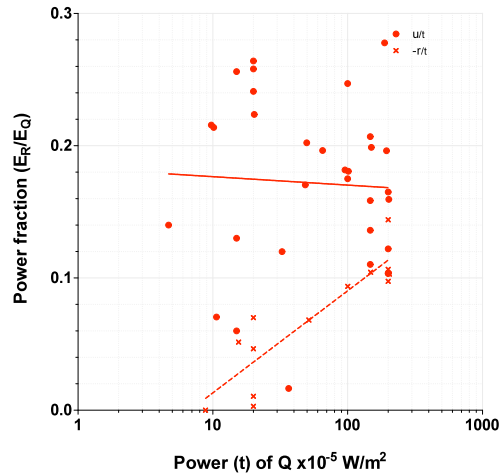
Υποκείμενα	t	R	G	B	-P
POLY	150.000	333.00	113.700	0.000	21.900
POLY	90.300	194.50	63.000	0.000	13.240
POLY	50.000	116.10	37.500	0.000	7.290
XALE	149.800	359.52	98.870	0.000	22.000
XALE	90.000	209.00	70.000	0.000	13.300
XALE	50.000	116.30	35.800	0.000	7.290
XATZ	134.000	287.00	97.300	0.000	19.500
XATZ	90.000	205.00	62.900	0.000	13.300
XATZ	51.500	115.00	35.700	0.000	7.290
POLY	135.000	281.00	98.600	2.430	19.700
POLY	31.300	67.00	20.970	0.626	4.570
POLY	90.000	195.00	64.500	1.300	13.100
POLY	21.000	51.45	15.600	0.200	3.100

TOPA	86.200	190.70	69.400	1.230	12.560
TOPA	19.600	48.60	16.070	0.220	2.800
POLY	50.000	110.00	36.200	0.000	7.285
POLY	6.207	14.90	4.940	0.000	0.910
POLY	1.470	3.05	0.985	0.000	0.214

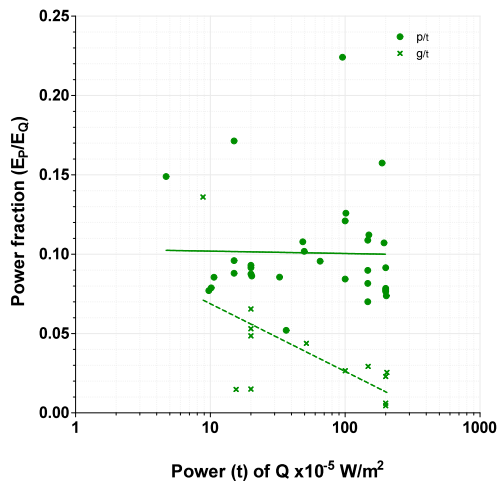
Στα σχήματα 5-2 έως 5-4 οι πλήρεις γραμμές δείχνουν τα τετραχρωματικά αποτελέσματα, ενώ οι διακεκομμένες τα αντίστοιχα τριχρωματικά.



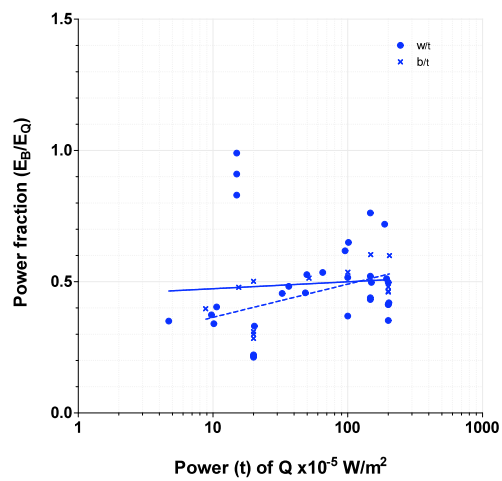
(α)



(β)

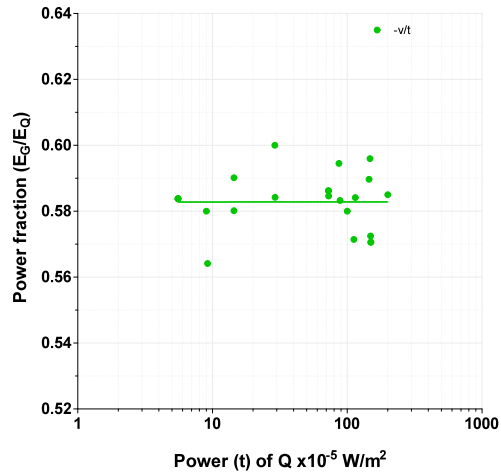


(γ)

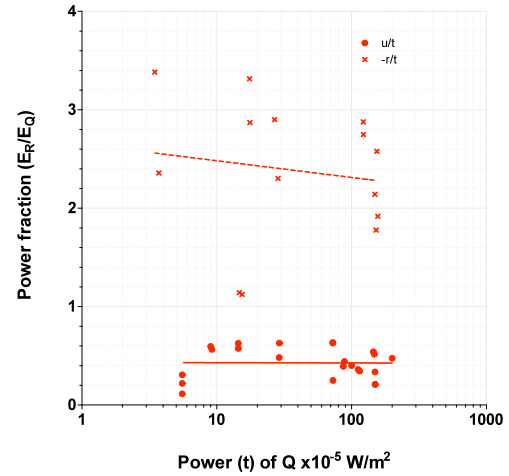


(δ)

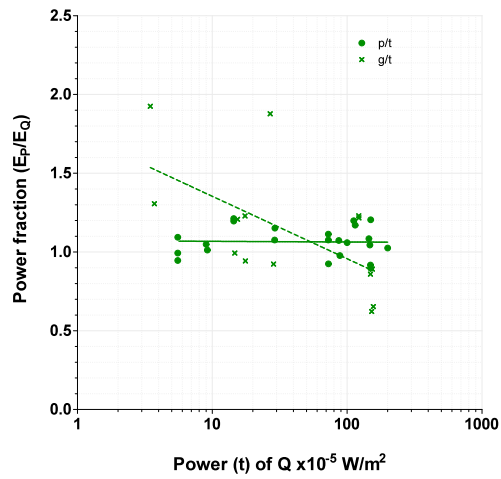
Σχήμα 5-2. Σύγκριση των κλασμάτων ισχύος v/t , u/t , p/t , w/t (πλήρεις) των τετραχρωματικών ταυτίσεων με τις αντίστοιχες τριχρωματικές r/t , g/t , b/t (διακεκομμένες) για το χρωμο-ερέθισμα 451 nm. (α) Για $-v/t$, (β) για u/t έναντι r/t , (γ) για p/t έναντι g/t , (δ) για w/t έναντι b/t .



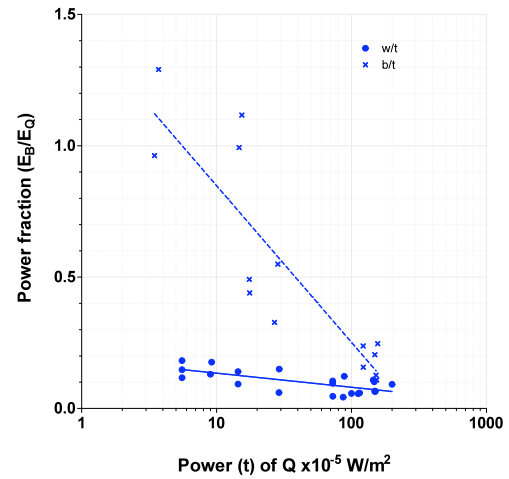
(α)



(β)

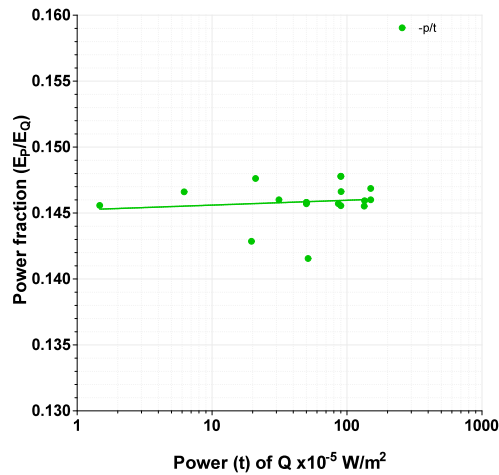


(γ)

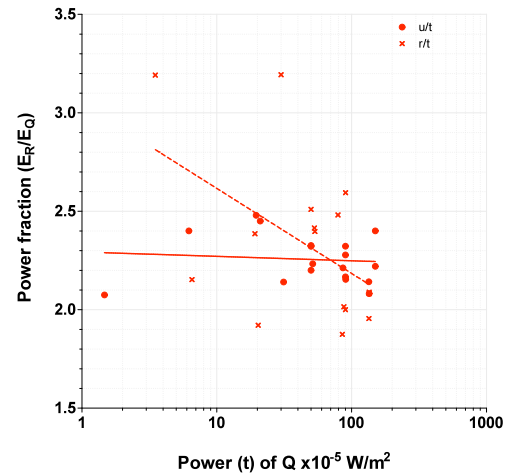


(δ)

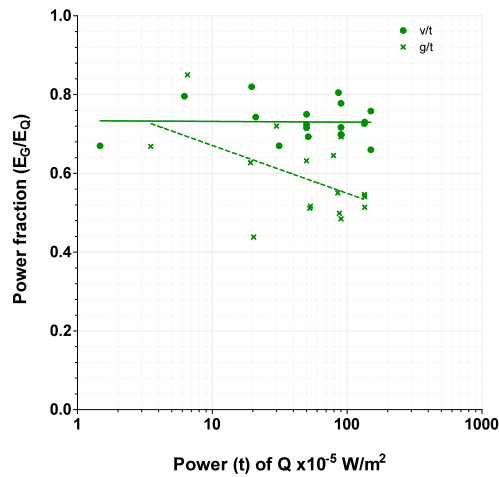
Σχήμα 5-3. Σύγκριση των κλασμάτων ισχύος v/t , u/t , p/t , w/t (πλήρεις) των τετραχρωματικών ταυτίσεων με τις αντίστοιχες τριχρωματικές r/t , g/t , b/t (διακεκομμένες) για το χρωμο-ερέθισμα 500 nm . (α) Για $-v/t$, (β) για u/t έναντι r/t , (γ) για p/t έναντι g/t , (δ) για w/t έναντι b/t .



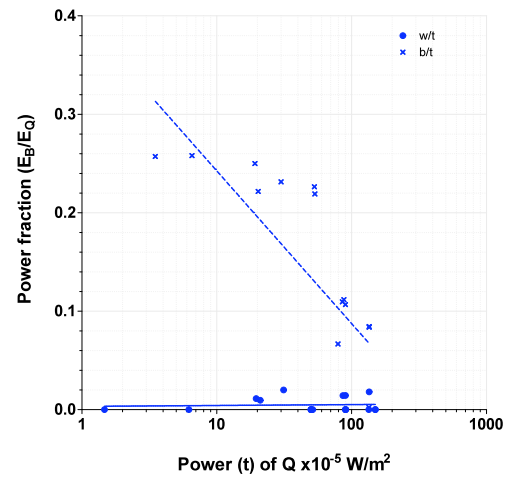
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 5-4. Σύγκριση των κλασμάτων ισχύος v/t , u/t , p/t , w/t (πλήρεις) των τετραχρωματικών ταυτίσεων με τις αντίστοιχες τριχρωματικές r/t , g/t , b/t (διακεκομμένες) για το χρωμο-ερέθισμα 580 nm. (α) Για $-p/t$, (β) για u/t έναντι r/t , (γ) για v/t έναντι g/t , (δ) για w/t έναντι b/t .

Στα παραπάνω σχήματα 5-2 έως 5-4 μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

1) Υπάρχει μεγάλη διασπορά στα τετραχρωματικά πειραματικά αποτελέσματα, μεγαλύτερη από ότι στα τριχρωματικά. Αυτό οφείλεται σε δύο αιτίες: στο γεγονός ότι οι τετραχρωματικές ταυτίσεις εξαρτώνται από την προηγούμενη ρύθμιση του v (στο 451 nm και 500 nm) ή στο p (στο 580 nm), τα οποία όμως ήδη έχουν κάποια μικρή έστω διασπορά και στο ότι πάντοτε οι χρωματικές ταυτίσεις έχουν μια αξιοσημείωτη διακύμανση, λόγω των διαφορών κατασκευής του οφθαλμού από άνθρωπο σε άνθρωπο.

2) Η διασπορά μεγαλώνει, όσο μικραίνουν οι ισχύεις του t δοκιμαστικού χρωμο-ερεθίσματος. Αυτό είναι αναμενόμενο, γιατί με την μείωση της φωτεινότητας, αυξάνεται το μέγεθος των ελλείψεων του MacAdam, το οποίο δείχνει την τυπική απόκλιση των μετρήσεων.

3) Οι γραμμές προσαρμογής των τετραχρωματικών ταυτίσεων είναι σαφώς πιο οριζόντιες από τις αντίστοιχες τριχρωματικές. Το γεγονός ότι δεν είναι οι ίδιες οριζόντιες, πιθανόν να οφείλεται στον όχι πολύ μεγάλο αριθμό μετρήσεων, αλλά και πιθανόν στο ότι το σύννηθες τριχρωματικό μοντέλο (CIE 1964) δεν είναι απολύτου ακριβείας.

Αυτό όμως που με σαφήνεια φαίνεται είναι ότι οι τετραχρωματικές ευθείες προσαρμογής έχουν μια τάση να είναι πιο οριζόντιες από τις αντίστοιχες τριχρωματικές, το οποίο σημαίνει ότι οι τετραχρωματικές ταυτίσεις είναι σταθερότερες έναντι των τριχρωματικών στις μεταβολές της φωτεινότητας των χρωμοερεθισμάτων. Η προσθήκη λοιπόν ενός επιπλέον πρωτεύοντος χρωμοερεθίσματος, που να εξισορροπεί την συνεισφορά των ραβδίων, κάνει τις τετραχρωματικές ταυτίσεις να φαίνονται ότι είναι ανεξάρτητες της ισχύος του δοκιμαστικού χρωμοερεθίσματος. Άρα ο νόμος της αναλογικότητας ισχύει. Αυτό λοιπόν αποδεικνύει την πλήρη ισοδυναμία του μοντέλου με τις τετραχρωματικές συναρτήσεις της Trezona. Συνεπώς ο τετραχρωματικός διανυσματικός χώρος είναι γραμμικός.

Βεβαίως δεν μπορεί να περιμένει κανείς στην πράξη πλήρη έλλειψη μεταβολής των ταυτίσεων μεταξύ των δύο επιπέδων λαμπρότητας, για οποιοδήποτε ανθρώπινο υποκείμενο. Και τούτο διότι υπάρχει πολύ μεγάλη διακύμανση των ταυτίσεων από άνθρωπο σε άνθρωπο. Όπως ελέχθη ανωτέρω, οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης (CMF) της CIE 1964 (τυπικός παρατηρητής) παρήχθησαν από τον μέσο όρο των πειραμάτων του Stiles και της Speranskaya, οι οποίες όμως παρατηρήθηκαν υπό διαφορετικές συνθήκες. Ο τυπικός παρατηρητής δεν είναι ίδιος με κανέναν πραγματικό παρατηρητή, ούτε καν με τον μέσο όρο των πραγματικών παρατηρητών, αν και περιμένουμε όλοι οι παρατηρητές να συμπεριφέρονται παρόμοια [76]. Άρα και οι θεωρητικές τετραχρωματικές καμπύλες, εφ' όσον παράγονται από τον τυπικό παρατηρητή, δεν μπορεί να συμπίπτουν με αυτές από κανένα ανθρώπινο υποκείμενο. Αυτό φαίνεται στην διακύμανση των CMF του Stiles για 49 παρατηρητές. [77]

5.5. Φυσιολογική ερμηνεία των τετραχρωματικών ταυτίσεων

Αυτά που έχουν δειχθεί πειραματικά είναι τα εξής: (α) τριχρωματικές ταυτίσεις είναι εφικτές για κάθε χρωμο-ερέθισμα σε όλο το εύρος της (μεσοπικής) οράσεως, και (β) για να

διατηρηθούν οι νόμοι της αναλογικότητας και της υπέρθεσης, πρέπει να εισαχθεί και τέταρτο πρωτεύον, οπότε οι ταυτίσεις θα είναι τετραχρωματικές.

Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα (§2.3.2), η αντίληψη των χρωμάτων οφείλεται στην ύπαρξη των τριών χρωματικών καναλιών στο οπτικό σύστημα, τα οποία κανάλια τροφοδοτούνται με τα σήματα των κωνίων. Υπάρχουν όμως και φαινόμενα, τα οποία υποδεικνύουν και την ανάμιξη των ραβδίων στον σχηματισμό της αντίληψης των χρωμάτων [78-81]. Οι εξαιρετικά σπάνιοι μονοχρωμάτωπες ραβδίων επί παραδείγματι, αυτοί δηλαδή που έχουν στον οφθαλμό τους μόνο ραβδία και καθόλου κωνία, παρουσιάζουν στο φως της ημέρας μια μεγάλη φωτοφοβία. Τέτοια φωτοφοβία δεν παρουσιάζεται ούτε στους τριχρωμάτωπες, ούτε στους διχρωμάτωπες. Αυτό σημαίνει ότι στους μονοχρωμάτωπες ραβδίων τα ραβδία, που είναι και οι μόνοι φωτοϋποδοχείς σε αυτούς, λειτουργούν σε όλη τους την ισχύ στο φως ημέρας. Αντίθετα, στα άτομα που έχουν και κωνία, η δράση των ραβδίων περιορίζεται από την ύπαρξη των κωνίων. Αυτό αποδεικνύει την αλληλεπίδραση των ραβδίων με τα κωνία.

Το γεγονός ότι δεν είναι μόνο ένα είδος κωνίων (πχ. τα κωνία S), που δρουν ανταγωνιστικά με τα ραβδία, πιστοποιείται από:

1) οι μονοχρωμάτωπες S κωνίων, δηλαδή τα άτομα που έχουν μόνο κωνία S και ραβδία, είναι διχρωμάτωπες κάτω από ορισμένες συνθήκες [82-83]. Αυτό σημαίνει, ότι τα ραβδία και τα κωνία S δεν μοιράζονται (τουλάχιστον αποκλειστικά) το ίδιο οπτικό κανάλι.

2) Αν και τα κωνία S δεν φαίνεται να παίζουν ρόλο στην μεσοπική λαμπρότητα, υπάρχουν ενδείξεις, ότι συμμετέχουν στην χρωματικότητα, το οποίο συνεπάγεται αλληλεπίδραση ραβδίων με τα κωνία S [84-85].

3) Εν τούτοις ραβδία και κωνία S πράγματι έχει βρεθεί να αθροίζουν γραμμικά τα σήματα εξόδου τους στο κατώφλι [86].

Συνοπτικά λοιπόν: το γεγονός (α) ότι οι τριχρωματικές ταυτίσεις είναι πάντοτε εφικτές, σημαίνει ότι σε κάθε περίπτωση τρία είναι τα χρωματικά κανάλια στον οφθαλμό. Το γεγονός ότι για να εξασφαλίζεται η προσθετικότητα στην μεσοπική όραση, χρειάζεται και τέταρτο πρωτεύον, σημαίνει ότι τα ραβδία παρεμβαίνουν σε αυτά τα τρία χρωματικά κανάλια. Τα ραβδία πρέπει να μοιράζονται κάποιο χρωματικό κανάλι με ένα ή περισσότερα είδη κωνίων, και οι δράση τους είναι ανταγωνιστική με τα κωνία. Ο βαθμός συμμετοχής των ραβδίων στο

χρωματικό αυτό κανάλι, εισάγει έναν τέταρτο βαθμό ελευθερίας, ο οποίος εκφράζεται με την εισαγωγή του τέταρτου πρωτεύοντος (β).

5.6. Μετασχηματισμοί αλλαγής πρωτεύοντων

Έστω ένα χρωμοερέθισμα \mathbf{Q} , όπως αναλύεται στο σύστημα των πρωτεύοντων ($\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{P}, \mathbf{B}$):

$$\mathbf{Q} = u\mathbf{R} + v\mathbf{G} + w\mathbf{B} + p\mathbf{P} \quad (5-6) \quad \text{ή}$$

$$\mathbf{Q} = (u, v, p, w) \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{G} \\ \mathbf{P} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix}$$

Σε ένα νέο σύστημα πρωτεύοντων ($\mathbf{R}', \mathbf{G}', \mathbf{P}', \mathbf{B}'$):

$$\mathbf{Q} = u'\mathbf{R}' + v'\mathbf{G}' + w'\mathbf{B}' + p'\mathbf{P}' \quad (5-7) \quad \text{ή}$$

$$\mathbf{Q} = (u', v', p', w') \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{R}' \\ \mathbf{G}' \\ \mathbf{P}' \\ \mathbf{B}' \end{pmatrix}$$

Αναλύουμε τα πρωτεύοντα του νέου συστήματος στο παλιό:

$$\mathbf{R}' = R_R'\mathbf{R} + G_R'\mathbf{G} + P_R'\mathbf{P} + B_R'\mathbf{B}$$

$$\mathbf{G}' = R_G'\mathbf{R} + G_G'\mathbf{G} + P_G'\mathbf{P} + B_G'\mathbf{B}$$

$$\mathbf{P}' = R_P'\mathbf{R} + G_P'\mathbf{G} + P_P'\mathbf{P} + B_P'\mathbf{B}$$

$$\mathbf{B}' = R_B'\mathbf{R} + G_B'\mathbf{G} + P_B'\mathbf{P} + B_B'\mathbf{B}$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{R}' \\ \mathbf{G}' \\ \mathbf{P}' \\ \mathbf{B}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{R'} & G_{R'} & P_{R'} & B_{R'} \\ R_{G'} & G_{G'} & P_{G'} & B_{G'} \\ R_{P'} & G_{P'} & P_{P'} & B_{P'} \\ R_{B'} & G_{B'} & P_{B'} & B_{B'} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{G} \\ \mathbf{P} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix}$$

Όπου: $R_R' = u(\lambda_{R'}), \dots, B_B' = w(\lambda_{B'})$

Αναλύουμε την (5.7)

$$\mathbf{Q} = (u' \quad v' \quad p' \quad w') \cdot \begin{pmatrix} R_{R'} & G_{R'} & P_{R'} & B_{R'} \\ R_{G'} & G_{G'} & P_{G'} & B_{G'} \\ R_{P'} & G_{P'} & P_{P'} & B_{P'} \\ R_{B'} & G_{B'} & P_{B'} & B_{B'} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{G} \\ \mathbf{P} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} \quad (5-8)$$

Εξισώνοντας (5-6) και (5-8):

$$(u' \quad v' \quad p' \quad w') \cdot \begin{pmatrix} R_{R'} & G_{R'} & P_{R'} & B_{R'} \\ R_{G'} & G_{G'} & P_{G'} & B_{G'} \\ R_{P'} & G_{P'} & P_{P'} & B_{P'} \\ R_{B'} & G_{B'} & P_{B'} & B_{B'} \end{pmatrix} = (u \quad v \quad p \quad w)$$

Τελικά:

$$u' = \frac{\begin{vmatrix} u & R_{G'} & R_{P'} & R_{B'} \\ v & G_{G'} & G_{P'} & G_{B'} \\ p & P_{G'} & P_{P'} & P_{B'} \\ w & B_{G'} & B_{P'} & B_{B'} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_{R'} & R_{G'} & R_{P'} & R_{B'} \\ G_{R'} & G_{G'} & G_{P'} & G_{B'} \\ P_{R'} & P_{G'} & P_{P'} & P_{B'} \\ B_{R'} & B_{G'} & B_{P'} & B_{B'} \end{vmatrix}}, \quad v' = \frac{\begin{vmatrix} R_{R'} & u & R_{P'} & R_{B'} \\ G_{R'} & v & G_{P'} & G_{B'} \\ P_{R'} & p & P_{P'} & P_{B'} \\ B_{R'} & w & B_{P'} & B_{B'} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_{R'} & R_{G'} & R_{P'} & R_{B'} \\ G_{R'} & G_{G'} & G_{P'} & G_{B'} \\ P_{R'} & P_{G'} & P_{P'} & P_{B'} \\ B_{R'} & B_{G'} & B_{P'} & B_{B'} \end{vmatrix}},$$

$$p' = \frac{\begin{vmatrix} R_{R'} & R_{G'} & u & R_{B'} \\ G_{R'} & G_{G'} & v & G_{B'} \\ P_{R'} & P_{G'} & p & P_{B'} \\ B_{R'} & B_{G'} & w & B_{B'} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_{R'} & R_{G'} & R_{P'} & R_{B'} \\ G_{R'} & G_{G'} & G_{P'} & G_{B'} \\ P_{R'} & P_{G'} & P_{P'} & P_{B'} \\ B_{R'} & B_{G'} & B_{P'} & B_{B'} \end{vmatrix}}, \quad w' = \frac{\begin{vmatrix} R_{R'} & R_{G'} & R_{P'} & u \\ G_{R'} & G_{G'} & G_{P'} & v \\ P_{R'} & P_{G'} & P_{P'} & p \\ B_{R'} & B_{G'} & B_{P'} & w \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_{R'} & R_{G'} & R_{P'} & R_{B'} \\ G_{R'} & G_{G'} & G_{P'} & G_{B'} \\ P_{R'} & P_{G'} & P_{P'} & P_{B'} \\ B_{R'} & B_{G'} & B_{P'} & B_{B'} \end{vmatrix}}, \quad (5-9)$$

Το συμπέρασμα από αυτά είναι ότι οποιοσδήποτε γραμμικός συνδυασμός ενός εγκύρου συνόλου συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης, θα παράξει άλλες συναρτήσεις εξ ίσου έγκυρες. Όλα αυτά ισχύουν, από την στιγμή που ο τετραχρωματικός χώρος είναι γραμμικός.

Μια ειδική περίπτωση γραμμικού συνδυασμού συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης, ο οποίος μπορεί να έχει κάποιο ενδιαφέρον, είναι αυτό που προκύπτει από τα πρωτεύοντα του συστήματος της Τρεζόνα $\mathbf{R}_T, \mathbf{G}_T, \mathbf{P}_T, \mathbf{B}_T$ ($\lambda_R = 644 \text{ nm}$, $\lambda_G = 588 \text{ nm}$, $\lambda_P = 509 \text{ nm}$ και $\lambda_B = 468 \text{ nm}$), που αντιστοιχούν στις συναρτήσεις u_T, v_T, p_T, w_T , από την εξίσωση μετασχηματισμού:

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ p' \\ w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3663 & 1.0976 & 0.0342 & 0.2170 \\ 0.1509 & 0.7958 & 0.5920 & 0.1737 \\ 0.0012 & 0.0766 & 0.9956 & 0.6543 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.1227 & 1.4031 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_T \\ v_T \\ p_T \\ w_T \end{pmatrix}$$

Οι παραγόμενες συναρτήσεις u' , v' , p' , w' ταυτίζονται με αυτές της CIE 1964 και την σκοτοπική καμπύλη: $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $V'(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ αντίστοιχα. Όχι αναπάντεχα, το σύστημα της CIE 1964 μαζί με την σκοτοπική καμπύλη αποτελούν ένα πλήρες σύστημα τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης. Άρα λοιπόν, ένα χρωμο-ερέθισμα ορίζεται πλήρως, αν είναι γνωστή η τριχρωματική χρωματικότητά του x , y , το κλάσμα S/P (φωτοπική διά σκοτοπική λαμπρότητα) και η φωτοπική του λαμπρότητα P.

5.7. Γραφική αναπαράσταση των τετραχρωματικών πραγματικών χρωμο-ερεθισμάτων

Μια βολική αναπαράσταση των μεσοπικών χρωμο-ερεθισμάτων είναι η τρισδιάστατη απεικόνιση με άξονες x , y και S/P. Τα x και y είναι τα συνηθισμένα από την τριχρωματική χρωματομετρία. Ο λόγος S/P έχει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ ενός μεγίστου και ενός ελαχίστου. Οι τιμές των μεγίστων και ελαχίστων του λόγου αυτού για πολλά σημεία (x , y) υπολογίσθηκαν και παρουσιάζονται στους Πίνακες 5-9 και 5-10.

Πίνακας 5-9. Για κάθε σημείο $Q(x, y)$ του χρωματικού διαγράμματος δείχνονται τα μήκη κύματος των δύο χρωμοερεθισμάτων λ_A και λ_B , τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό του Q , καθώς και την αναλογία ενεργειών τους (A/B) και τέλος την μέγιστη τιμή του λόγου S/P για το Q .

X_Q	Y_Q	λ_A	λ_B	A/B	SP max
0.1	0.8	780	514.282	0.03156	3.61019
0.05	0.75	780	505.88	0.03703	4.56711
0.1	0.75	780	508.758	0.09486	4.2303
0.15	0.75	780	513.115	0.1382	3.73582
0.2	0.75	780	521.672	0.11793	2.91702
0.05	0.7	780	502.72	0.0568	4.95547
0.1	0.7	780	504.79	0.12956	4.69879
0.15	0.7	780	507.602	0.20382	4.36368
0.2	0.7	780	511.854	0.2664	3.87596
0.25	0.7	780	520.258	0.26313	3.03336
0.05	0.65	780	499.993	0.0667	5.30541
0.1	0.65	780	501.574	0.14801	5.10103
0.15	0.65	780	503.591	0.23807	4.84646
0.2	0.65	780	506.33	0.33401	4.51333
0.25	0.65	780	510.476	0.42316	4.03413

0.3	0.65	780	518.584	0.44705	3.18322
0.05	0.6	780	497.462	0.06991	5.63477
0.1	0.6	780	498.732	0.15589	5.46857
0.15	0.6	780	500.296	0.25428	5.26596
0.2	0.6	780	502.253	0.36683	5.01447
0.25	0.6	780	504.912	0.49196	4.68397
0.3	0.6	780	508.935	0.61855	4.21015
0.35	0.6	780	516.719	0.68478	3.36138
0.05	0.55	780	495.12	0.06708	5.94601
0.1	0.55	780	496.114	0.15572	5.81333
0.15	0.55	780	497.317	0.25892	5.65385
0.2	0.55	780	498.817	0.37974	5.45746
0.25	0.55	780	500.734	0.52165	5.20902
0.3	0.55	780	503.301	0.68703	4.88249
0.35	0.55	780	507.184	0.86808	4.41242
0.4	0.55	780	514.64	1.00217	3.57248
0.05	0.5	780	492.891	0.05946	6.24591
0.1	0.5	780	493.664	0.14886	6.14167
0.15	0.5	780	494.585	0.25394	6.01777
0.2	0.5	780	495.706	0.37884	5.86761
0.25	0.5	780	497.111	0.52897	5.68101
0.3	0.5	780	498.943	0.7111	5.44097
0.35	0.5	780	501.428	0.9331	5.11954
0.4	0.5	780	505.151	1.19664	4.65487
0.45	0.5	780	512.269	1.44515	3.82916
0.1	0.45	780	491.298	0.13678	6.46065
0.15	0.45	780	491.988	0.24157	6.36772
0.2	0.45	780	492.815	0.36699	6.25613
0.25	0.45	780	493.829	0.51951	6.11937
0.3	0.45	780	495.11	0.70827	5.94728
0.35	0.45	780	496.795	0.94638	5.72276
0.4	0.45	780	499.151	1.25183	5.41392
0.45	0.45	780	502.699	1.64604	4.95788
0.5	0.45	780	509.45	2.10181	4.15158
0.1	0.4	780	488.945	0.12037	6.76417
0.15	0.4	780	489.43	0.22336	6.70494
0.2	0.4	780	490.006	0.34695	6.63392
0.25	0.4	780	490.704	0.49771	6.54041
0.3	0.4	780	491.57	0.68567	6.42396
0.35	0.4	780	492.676	0.92605	6.2747
0.4	0.4	780	494.152	1.24306	6.07577
0.45	0.4	780	496.248	1.67666	5.79523
0.5	0.4	780	499.556	2.29181	5.36137
0.55	0.4	780	505.84	3.16121	4.57153
0.1	0.35	780	486.522	0.10049	7.05256
0.15	0.35	780	486.811	0.20038	7.01877
0.2	0.35	780	487.153	0.32014	6.97851
0.25	0.35	780	487.566	0.46633	6.9297
0.3	0.35	780	488.073	0.64872	6.86923
0.35	0.35	780	488.712	0.88253	6.79222
0.4	0.35	780	489.545	1.19279	6.69061
0.45	0.35	780	490.682	1.62334	6.54311
0.5	0.35	780	492.346	2.25859	6.31895
0.55	0.35	780	495.068	3.28007	5.95237

0.6	0.35	780	500.672	5.11268	5.21641
0.1	0.3	780	483.947	0.07806	7.34684
0.15	0.3	780	484.023	0.17401	7.33829
0.2	0.3	780	484.113	0.28871	7.32811
0.25	0.3	780	484.222	0.42825	7.31577
0.3	0.3	780	484.357	0.60165	7.3005
0.35	0.3	780	484.528	0.82296	7.28111
0.4	0.3	780	484.752	1.1152	7.25569
0.45	0.3	780	485.057	1.51894	7.22086
0.5	0.3	780	485.499	2.11293	7.17021
0.55	0.3	780	486.195	3.07278	7.08965
0.6	0.3	780	487.46	4.88477	6.94094
0.65	0.3	780	490.525	9.55947	6.56218
0.15	0.25	780	480.947	0.14504	7.67917
0.2	0.25	780	480.73	0.25381	7.70291
0.25	0.25	780	480.465	0.38539	7.73204
0.3	0.25	780	480.132	0.54779	7.76867
0.35	0.25	780	479.726	0.75325	7.81586
0.4	0.25	780	479.191	1.02148	7.87977
0.45	0.25	780	478.427	1.38635	7.97198
0.5	0.25	780	477.235	1.91123	8.11756
0.55	0.25	780	475.094	2.7297	8.38645
0.6	0.25	780	469.88	4.17518	9.10261
0.2	0.2	780	477.004	0.21661	8.14702
0.25	0.2	780	476.239	0.33952	8.24236
0.3	0.2	780	475.229	0.48983	8.37036
0.35	0.2	780	473.823	0.67769	8.55291
0.4	0.2	780	471.712	0.91875	8.83919
0.45	0.2	780	468.078	1.23733	9.4119
0.5	0.2	780	460.182	1.6729	10.9682
0.2	0.15	780	472.09	0.17762	8.78705
0.25	0.15	780	470.261	0.29102	9.04707
0.3	0.15	780	467.533	0.42706	9.50968
0.35	0.15	780	463.107	0.59301	10.3623
0.4	0.15	780	453.708	0.79967	12.1266
0.2	0.1	780	464.179	0.13448	10.1469
0.25	0.1	780	459.263	0.23586	11.1478
0.3	0.1	780	448.747	0.35531	12.7897
0.2	0.05	780	444.742	0.08608	13.0736

Πίνακας 5-10. Για κάθε σημείο $Q(x, y)$ του χρωματικού διαγράμματος δείχνονται τα μήκη κύματος των δύο χρωμοερεθισμάτων λ_A και λ_B , τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό του Q , καθώς και την αναλογία ενεργειών τους (A/B) και τέλος την ελάχιστη τιμή του λόγου S/P για το Q .

XQ	YQ	λ_A	λ_B	A/B	SP min
0.1	0.8	400	516.589	0.02114	3.37464
0.05	0.75	400	508.848	0.06134	4.22159
0.1	0.75	401	515.869	0.09163	3.44842
0.15	0.75	400	522.738	0.06978	2.83386
0.2	0.75	400	529.18	0.02826	2.36268
0.05	0.7	400	507.52	0.12338	4.37635

0.1	0.7	400	515.067	0.17151	3.53206
0.15	0.7	400	522.465	0.14983	2.85709
0.2	0.7	400	529.383	0.10214	2.35044
0.25	0.7	400	536.358	0.04705	1.89313
0.05	0.65	400	505.991	0.18773	4.55865
0.1	0.65	400	514.126	0.26313	3.63296
0.15	0.65	400	522.148	0.24277	2.88425
0.2	0.65	400	529.617	0.18746	2.33631
0.25	0.65	400	537.136	0.12305	1.84809
0.3	0.65	400	544.132	0.05813	1.47458
0.05	0.6	400	504.216	0.25141	4.77574
0.1	0.6	400	513.026	0.3685	3.75435
0.15	0.6	400	521.776	0.35197	2.91643
0.2	0.6	400	529.891	0.28707	2.31983
0.25	0.6	400	538.041	0.21084	1.79683
0.3	0.6	400	545.49	0.13484	1.41176
0.35	0.6	400	552.005	0.06404	1.12308
0.05	0.55	400	502.139	0.30868	5.03721
0.1	0.55	400	511.723	0.49005	3.90262
0.15	0.55	400	521.333	0.48207	2.95518
0.2	0.55	400	530.224	0.40493	2.29942
0.25	0.55	400	539.104	0.31334	1.73812
0.3	0.55	400	547.059	0.22333	1.3414
0.35	0.55	400	553.949	0.14064	1.04556
0.4	0.55	400	560.076	0.06642	0.81953
0.05	0.5	412	499.904	0.35816	5.35715
0.1	0.5	400	510.159	0.62997	4.08674
0.15	0.5	400	520.795	0.63965	3.00278
0.2	0.5	400	530.629	0.54653	2.27439
0.25	0.5	400	540.367	0.43459	1.67137
0.3	0.5	400	548.89	0.32649	1.26201
0.35	0.5	400	556.213	0.22886	0.95998
0.4	0.5	400	562.611	0.14245	0.74165
0.45	0.5	400	568.251	0.06649	0.58474
0.1	0.45	400	508.209	0.78827	4.31299
0.15	0.45	400	520.13	0.83432	3.06265
0.2	0.45	400	531.128	0.71978	2.24382
0.25	0.45	400	541.878	0.58025	1.59648
0.3	0.45	400	551.055	0.44826	1.17113
0.35	0.45	400	558.881	0.33152	0.86585
0.4	0.45	400	565.577	0.22995	0.65838
0.45	0.45	400	571.557	0.14227	0.50949
0.5	0.45	400	577.01	0.06641	0.40012
0.1	0.4	400	505.765	0.95973	4.60542
0.15	0.4	400	519.254	1.0809	3.14604
0.2	0.4	400	531.758	0.93662	2.20569
0.25	0.4	400	543.73	0.75831	1.50839
0.3	0.4	400	553.669	0.5941	1.06626
0.35	0.4	400	562.015	0.45236	0.76649
0.4	0.4	400	569.119	0.33178	0.56943
0.45	0.4	400	575.491	0.22974	0.43214
0.5	0.4	400	581.286	0.14227	0.33004
0.55	0.4	400	586.796	0.06641	0.24949
0.1	0.35	400	502.639	1.12383	4.99533

0.15	0.35	400	518.1	1.40228	3.26013
0.2	0.35	400	532.577	1.21575	2.15687
0.25	0.35	400	546.05	0.98079	1.40319
0.3	0.35	400	556.904	0.77182	0.94583
0.35	0.35	400	565.803	0.59679	0.6604
0.4	0.35	400	573.456	0.45216	0.47719
0.45	0.35	400	580.273	0.33173	0.35124
0.5	0.35	400	586.637	0.22974	0.25607
0.55	0.35	400	592.932	0.14227	0.18472
0.6	0.35	400	599.276	0.06641	0.13235
0.1	0.3	418	499.916	1.32087	5.59855
0.15	0.3	400	516.529	1.83642	3.42221
0.2	0.3	400	533.684	1.5884	2.09224
0.25	0.3	401	548.953	1.27366	1.28173
0.3	0.3	401	560.946	0.99802	0.81397
0.35	0.3	400	570.579	0.77279	0.54556
0.4	0.3	400	578.882	0.59654	0.38093
0.45	0.3	400	586.421	0.45216	0.26502
0.5	0.3	400	593.838	0.33173	0.18243
0.55	0.3	400	601.379	0.22974	0.12482
0.6	0.3	400	609.531	0.14227	0.08297
0.65	0.3	400	619.247	0.06641	0.05143
0.15	0.25	401	513.959	2.45945	3.70693
0.2	0.25	400	535.26	2.11061	2.00304
0.25	0.25	400	553.021	1.64598	1.11443
0.3	0.25	400	566.222	1.27548	0.66427
0.35	0.25	400	576.843	0.9928	0.4261
0.4	0.25	400	586.111	0.77279	0.27787
0.45	0.25	400	595.137	0.59654	0.17989
0.5	0.25	400	604.483	0.45216	0.11647
0.55	0.25	400	615.16	0.33173	0.07443
0.6	0.25	400	631.23	0.22974	0.04743
0.2	0.2	400	537.673	2.89398	1.87318
0.25	0.2	400	558.699	2.17415	0.91145
0.3	0.2	400	573.545	1.6507	0.50392
0.35	0.2	400	585.63	1.27514	0.29789
0.4	0.2	400	597.156	0.9928	0.17764
0.45	0.2	400	609.501	0.77279	0.11008
0.5	0.2	400	626.617	0.59654	0.07637
0.2	0.15	400	541.755	4.19674	1.67628
0.25	0.15	400	567.265	2.95755	0.6746
0.3	0.15	400	584.781	2.17475	0.33344
0.35	0.15	400	600.764	1.6507	0.17836
0.4	0.15	400	619.959	1.27514	0.11938
0.2	0.1	400	549.878	6.77662	1.35189
0.25	0.1	400	582.876	4.25108	0.41409
0.3	0.1	400	609.396	2.95709	0.20271
0.2	0.05	400	574.487	14.1771	0.7782

Ο τρόπος υπολογισμού των μεγίστων και ελαχίστων τιμών του λόγου S/P ανάλογα με τις συντεταγμένες χρωματικότητας (x, y) CIE 1964, έγιναν ως εξής:

Κάθε εικονικό χρωμο-ερέθισμα $\mathbf{Q}(x, y)$ μπορεί να ταυτιστεί μεταμερικά με ένα συνδυασμό δύο μονοχρωματικών χρωμο-ερεθισμάτων: \mathbf{A} και \mathbf{B} . Στο χρωματικό διάγραμμα xy αυτά τα τρία σημεία των χρωμο-ερεθισμάτων Q, A, B θα είναι συνευθειακά, με το σημείο Q μεταξύ των σημείων A και B . Ο λόγος των ισχύων των \mathbf{A} και \mathbf{B} , που απαιτούνται για την ταύτιση του συνδυασμού τους με το \mathbf{Q} είναι αντιστρόφως ανάλογος του λόγου των αποστάσεων AQ και BQ .

Έστω x_Q, y_Q οι συντεταγμένες χρωματικότητας του \mathbf{Q} και $x_A(\lambda_A), y_A(\lambda_A)$ και $x_B(\lambda_B), y_B(\lambda_B)$ οι αντίστοιχες των \mathbf{A} και \mathbf{B} . Ικανή και αναγκαία συνθήκη ώστε τα τρία σημεία A, Q, B να είναι συνευθειακά, είναι:

$$\begin{vmatrix} x_A(\lambda_A) & y_A(\lambda_A) & 1 \\ x_Q & y_Q & 1 \\ x_B(\lambda_B) & y_B(\lambda_B) & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (5-10)$$

οι αποστάσεις του Q από τα A και B είναι:

$$AQ = \sqrt{(x_A(\lambda_A) - x_Q)^2 + (y_A(\lambda_A) - y_Q)^2}$$

$$BQ = \sqrt{(x_B(\lambda_B) - x_Q)^2 + (y_B(\lambda_B) - y_Q)^2}$$

η τιμή του λόγου S/P για την συγκεκριμένη τριάδα A, B, Q υπολογίζεται:

$$SPQ \equiv (S/P)_{ABQ} = \frac{1700}{683} \cdot \frac{BQ \cdot V'(\lambda_A) + AQ \cdot V'(\lambda_B)}{BQ \cdot V(\lambda_A) + AQ \cdot V(\lambda_B)}$$

Για δεδομένο σημείο $Q(x_Q, y_Q)$, αν το σημείο A (δηλαδή το λ_A) θεωρηθεί ανεξάρτητη μεταβλητή, τότε το σημείο B (δηλαδή το λ_B) θα είναι εξηρητημένη μεταβλητή, δυνάμενη να υπολογισθεί από τον τύπο 5-10. Επιδιώκοντας την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του λόγου S/P , στην ουσία επιδιώκουμε εκείνη την τιμή του λ_A , που κάνει το κλάσμα SPQ να έχει την μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή.

Για την παραγωγή των Πινάκων 5-9 και 5-10 επιλέγεται ένα δίκτυο σημείων Q , με βήμα 0.05 στον καθένα από τους δύο άξονες x και y . Για κάθε τέτοιο σημείο με αριθμητική παραγωγή του SPQ και επίλυση της παραγόμενης εξίσωσης, σε συνδυασμό με τον τύπο τύπο 5-10, μπορούν να ευρεθούν οι ζητούμενες τιμές για το λ_A , οι οποίες μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν το SPQ .

Βρέθηκε, ότι οι τιμές του λ_A , που μεγιστοποιούν το SPQ είναι οι τιμές του ακραίου ερυθρού σημείου του φασματικού τύπου (780nm). Βεβαίως και οι τιμές άλλων γειτονικών σημείων (πχ 700nm) θα έδιναν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα, λόγω της πυκνής συσσωρεύσεως των μηκών κύματος στο άκρο ερυθρό του ορατού φάσματος. Κατ' αναλογία βρέθηκε, ότι οι τιμές του λ_A , που ελαχιστοποιούν το SPQ είναι οι τιμές του ακραίου ιώδους σημείου του φασματικού τύπου (380nm). Επίσης τα γειτονικά σημεία (πχ 400nm) δίνουν τα ίδια σχεδόν αποτελέσματα. Εδώ για ευκολότερο χειρισμό, επιλέχθηκαν τα $\lambda_A=400\text{nm}$.

Στα ίδια αποτελέσματα καταλήγουμε, με μία διαφορετική μέθοδο: Κάθε εικονικό χρωμοερέθισμα $\mathbf{Q}(X, Y, Z)$ μπορεί να ταυτιστεί μεταμερικά με ένα συνδυασμό $\mathbf{Q}'(r, g, b)$ τριών μονοχρωματικών χρωμο-ερεθισμάτων: \mathbf{R} , \mathbf{G} και \mathbf{B} . Με $\mathbf{Q}=\mathbf{Q}'^m$. Υπάρχει απειρία τριάδων (\mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B}), που να ικανοποιούν αυτή την απαίτηση, και όλες ευρίσκονται με τον τύπο αλλαγής τριχρωματικών συντεταγμένων, ανάλογο του τύπου 5-9, γνωστόν ήδη από την βιβλιογραφία (§2.4.8). Για κάθε τετράδα (\mathbf{Q} , r , g , b) υπολογίζεται ο λόγος S/P:

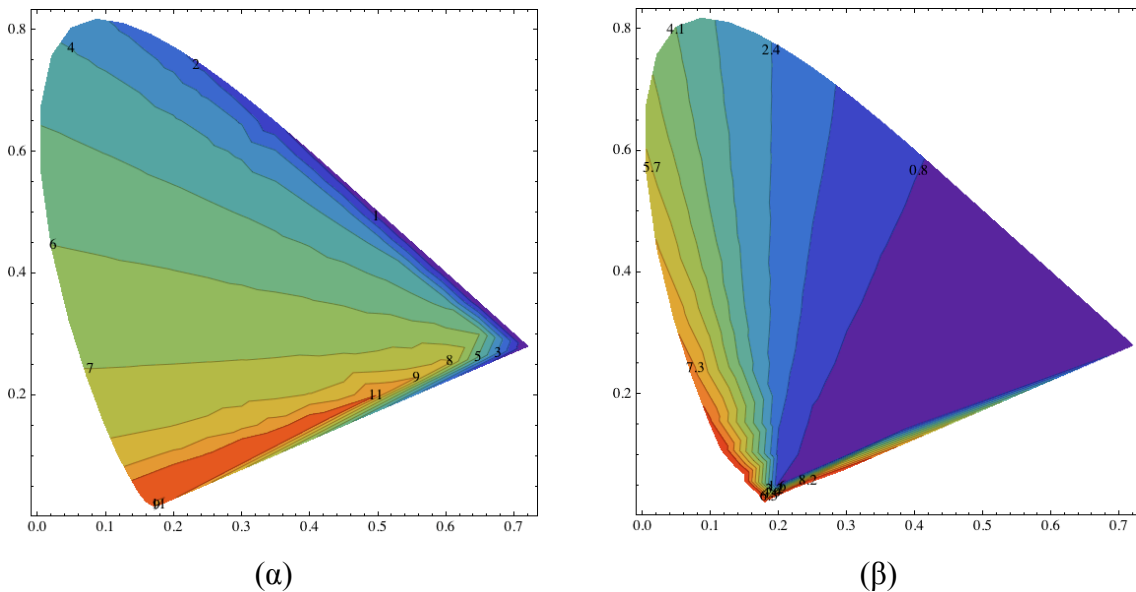
$$SPQ' \equiv (S/P)_{QRGB} = \frac{1700}{683} \cdot \frac{r \cdot V'(\lambda_R) + g \cdot V'(\lambda_G) + b \cdot V'(\lambda_B)}{r \cdot V(\lambda_R) + g \cdot V(\lambda_G) + b \cdot V(\lambda_B)}$$

Στην συνέχεια αναζητείται για κάθε \mathbf{Q}' η τριάδα (\mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B}) εκείνη, που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί το κλάσμα SPQ' . Για κάθε μεγιστοποίηση του κλάσματος SPQ' ευρίσκεται, ότι το μονοχρωματικό \mathbf{R} πρέπει να ευρίσκεται στο άκρο ερυθρό σημείο του ορατού φάσματος, η απεικόνιση \mathbf{B} του μονοχρωματικού \mathbf{B} πρέπει να είναι συνευθειακή με τα \mathbf{Q}' και \mathbf{R} ενώ για το \mathbf{G} ευρίσκεται ότι η αναλογία ισχύος που απαιτείται γι' αυτό, είναι μηδενική. Επίσης, για κάθε ελαχιστοποίηση του κλάσματος SPQ' ευρίσκεται, ότι το μονοχρωματικό \mathbf{B} πρέπει να ευρίσκεται στο άκρο ιώδες σημείο του ορατού φάσματος, η απεικόνιση \mathbf{R} του μονοχρωματικού \mathbf{R} πρέπει να είναι συνευθειακή με τα \mathbf{Q}' και \mathbf{B} ενώ για το \mathbf{G} ευρίσκεται πάλι, ότι η αναλογία ισχύος που απαιτείται γι' αυτό, είναι μηδενική. Απόσπασμα των αποτελεσμάτων αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται στον πίνακα 5-11.

Τα υπολογιστικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 5-9 και 5-10 απεικονίζονται στο σχήμα 5-5. Αυτό είναι ένα δισδιάστατο διάγραμμα παρόμοιο με το σύνηθες τριχρωματικό xy (CIE 1964). Πάνω σε αυτό είναι χαραγμένες γραμμές ίσου S/P. Στο (α) οι μέγιστες δυνατές τιμές, στο (β) οι ελάχιστες. Οι καθολικά μέγιστες δυνατές τιμές του λόγου S/P εμφανίζονται, όπως είναι αναμενόμενο, στην κάτω αριστερή γωνία του «χρωματικού τριγώνου», ενώ οι καθολικά ελάχιστες δυνατές τιμές στην κάτω δεξιά γωνία.

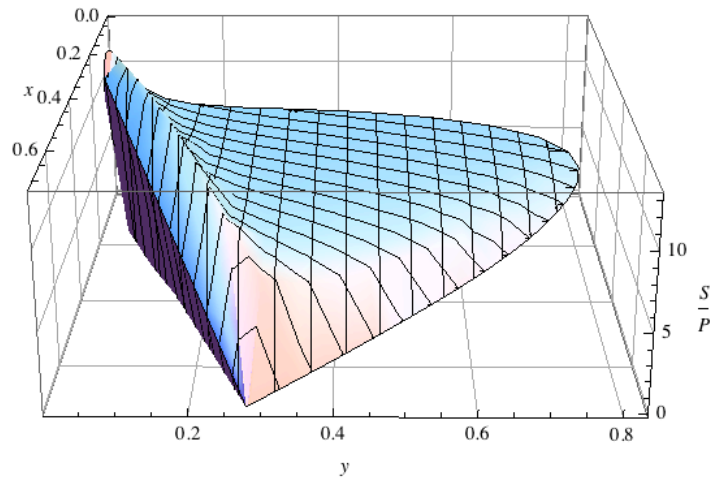
Πίνακας 5-11. Για κάθε σημείο $Q'(r, g, b)$ του τριχρωματικού χώρου δείχνονται τα μήκη κύματος των τριών πρωτευόντων λ_R, λ_G και λ_B , τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της **μέγιστης** τιμής του λόγου S/P για το Q' , καθώς και οι ισχύεις τους (r, g, b).

X_Q	Y_Q	Z_Q	x_Q	y_Q	λ_R	λ_G	λ_B	r	g	b	S/P
0.2	1	1	0.091	0.455	780	553.0	491.4	7.888	0	2.635	6.020
0.4	1	1	0.167	0.417	780	542.6	490.5	16.908	0	2.490	5.636
0.6	1	1	0.231	0.385	780	543.3	489.5	25.879	0	2.339	5.241
0.8	1	1	0.286	0.357	780	544.0	488.4	34.804	0	2.183	4.832
1	1	1	0.333	0.333	780	544.5	487.3	43.684	0	2.022	4.415
1.2	1	1	0.375	0.313	780	548.9	485.9	52.525	0	1.857	3.988
1.4	1	1	0.412	0.294	780	549.8	484.4	61.293	0	1.686	3.550
1.8	1	1	0.474	0.263	780	552.3	480.4	78.628	0	1.325	2.640
2	1	1	0.5	0.25	780	548.4	477.8	87.183	0	1.129	2.166
2.2	1	1	0.524	0.238	780	543.8	474.2	95.640	0	0.925	1.681
2.4	1	1	0.545	0.227	780	543.9	468.5	104.032	0	0.720	1.193
2.6	1	1	0.565	0.217	780	543.1	456.0	111.904	0	0.534	0.706



Σχήμα 5-5. Χρωματικό διάγραμμα xy (CIE 1964) όπου φαίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες δυνατές τιμές του λόγου S/P (σκοτοπική διά φωτοπική λαμπρότητα). Οι γραμμές παριστάνουν ίσες τιμές του λόγου. (α) οι μέγιστες δυνατές τιμές του S/P , (β) οι ελάχιστες δυνατές τιμές του S/P .

Τα τετραχρωματικά λοιπόν χρωμο-ερεθίσματα μπορούν να παρασταθούν γραφικά σε ένα τρισδιάστατο διάγραμμα: $x, y, S/P$, αν εξαιρέσει κανείς την φωτοπική λαμπρότητα P . Τα πραγματικά λοιπόν χρωμο-ερεθίσματα σχηματίζουν ένα στερεό, που έχει τη μορφή «πτερυγίου καρχαρία». Αυτό φαίνεται στο σχήμα 5-6.



Σχήμα 5-6. Το στερεό, που ορίζεται από τα σημεία με συντεταγμένες χρωματικότητας (x, y) και τα όρια της δυνατής κυμάνσεως του λόγου S/P .

Αυτή η αναπαράσταση είναι η επέκταση της συνήθους τριχρωματικής xy (CIE 1964) στην μεσοπική όραση.

5.8. Πρόσημα των τετραχρωματικών συναρτήσεων

Έστω ότι γίνεται αλλαγή πρωτευόντων και στο νέο σύστημα ένα από τα πρωτεύοντα που επιλέγονται είναι το ίδιο το \mathbf{Q} . Δηλ. έστω $\mathbf{Q} = \mathbf{R}'$. Τότε

$$u(\lambda_Q) = u(\lambda_{R'}) = R_{R'} \quad v(\lambda_Q) = v(\lambda_{G'}) = G_{R'}$$

$$p(\lambda_Q) = u(\lambda_{P'}) = P_{R'} \quad w(\lambda_Q) = v(\lambda_{B'}) = B_{R'}$$

στους τύπους αλλαγής πρωτευόντων της προηγούμενης παραγράφου (4-9) αντικαθιστώ με αυτές τις τιμές:

$$u' = \frac{\begin{vmatrix} R_{R'} & R_{G'} & R_{P'} & R_{B'} \\ G_{R'} & G_{G'} & G_{P'} & G_{B'} \\ P_{R'} & P_{G'} & P_{P'} & P_{B'} \\ B_{R'} & B_{G'} & B_{P'} & B_{B'} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_{R'} & R_{G'} & R_{P'} & R_{B'} \\ G_{R'} & G_{G'} & G_{P'} & G_{B'} \\ P_{R'} & P_{G'} & P_{P'} & P_{B'} \\ B_{R'} & B_{G'} & B_{P'} & B_{B'} \end{vmatrix}} = 1, \quad v' = \frac{\begin{vmatrix} R_{R'} & R_{R'} & R_{P'} & R_{B'} \\ G_{R'} & G_{R'} & G_{P'} & G_{B'} \\ P_{R'} & P_{R'} & P_{P'} & P_{B'} \\ B_{R'} & B_{R'} & B_{P'} & B_{B'} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_{R'} & R_{G'} & R_{P'} & R_{B'} \\ G_{R'} & G_{G'} & G_{P'} & G_{B'} \\ P_{R'} & P_{G'} & P_{P'} & P_{B'} \\ B_{R'} & B_{G'} & B_{P'} & B_{B'} \end{vmatrix}} = 0,$$

ομοίως, $p' = 0, w' = 0$.

Αυτά βεβαίως ισχύουν και στον συνήθη τριχρωματικό χώρο.

Άρα, σε μήκη κύματος ίσα με αυτά των πρωτευόντων, η μία συνάρτηση χρωματικής ταύτισης γίνεται 1 ενώ οι υπόλοιπες 0.

Συνολικά τα σημεία που κάποιες από τις συναρτήσεις μηδενίζονται είναι 4+2. 4 τα σημεία των πρωτευόντων και 2 τα ακραία σημεία του φάσματος 380 nm και 780 nm. Άρα όλες οι συναρτήσεις μηδενίζονται σε 6-1=5 σημεία.

Στα σημεία των πρωτευόντων ($Q = R$ ή G ή B ή P) οι συναρτήσεις αλλάζουν πρόσημο. Όλες, εκτός από την αντίστοιχη του πρωτευόντος (η u για το R , η v για το G κλπ.), η οποία δεν αλλάζει πρόσημο (παίρνει την τιμή 1).

Μπορούν να προσδιορισθούν από πριν τα πρόσημα των συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης. Έστω R, G, P, B τα 4 πρωτεύοντα και UV και IR τα ακραία σημεία του φάσματος, όπου όλες οι τιμές είναι μηδέν. Κατά σειρά αυξανόμενου λ τα πρόσημα των συναρτήσεων σημειώνονται στον πίνακα 5-12.

Πίνακας 5-12. Τα πρόσημα των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης u, v, p, w κατά μήκος ολόκληρου του ορατού φάσματος, κατά σειρά αυξανόμενου λ . Τα B, P, G, R είναι τα μονοχρωματικά πρωτεύοντα, ενώ τα UV και IR είναι τα ακραία σημεία του ορατού φάσματος.

	UV		B		P		G		R		IR
u	0	—	0	+	0	—	0	+	1	+	0
v	0	+	0	—	0	+	1	+	0	—	0
p	0	—	0	+	1	+	0	—	0	+	0
w	0	+	1	+	0	—	0	+	0	—	0

Παρατηρήσεις

1. Δεν υπάρχει διάστημα όπου όλα να είναι θετικά (ή όλα αρνητικά)
2. Δεν υπάρχει διάστημα όπου τα αρνητικά να είναι πιο πολλά από 2.

Ανάλογα γίνονται και με τις συνήθεις τριχρωματικές. Μπορούμε να συνδυάσουμε τους πίνακες τιμών και για τα δύο χρωματομετρικά συστήματα. Ο συνδυασμός αυτός φαίνεται στον πίνακα 5-13.

Πίνακας 5-13. Τα πρόσημα των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης u, v, p, w σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες τριχρωματικές κατά μήκος ολόκληρου του ορατού φάσματος, κατά σειρά αυξανόμενου λ . Τα B, P, G, R είναι τα μονοχρωματικά πρωτεύοντα, ενώ τα UV και IR είναι τα ακραία σημεία του ορατού φάσματος.

	UV	B	P	G	R	IR
r	+	—	—	+	+	
g	—	+	+	+	—	
b	+	+	+	—	+	
u	—	+	—	+	+	
v	+	—	+	+	—	
p	—	+	+	—	+	
w	+	+	—	+	—	

Μπορεί να αποδειχθεί ότι μια οποιαδήποτε τετραχρωματική συνάρτηση χρωματικής ταύτισης μπορεί γενικά να έχει δύο το πολύ φασματικές περιοχές, όπου θα έχει αρνητικό πρόσημο. Η απόδειξη γίνεται ως εξής:

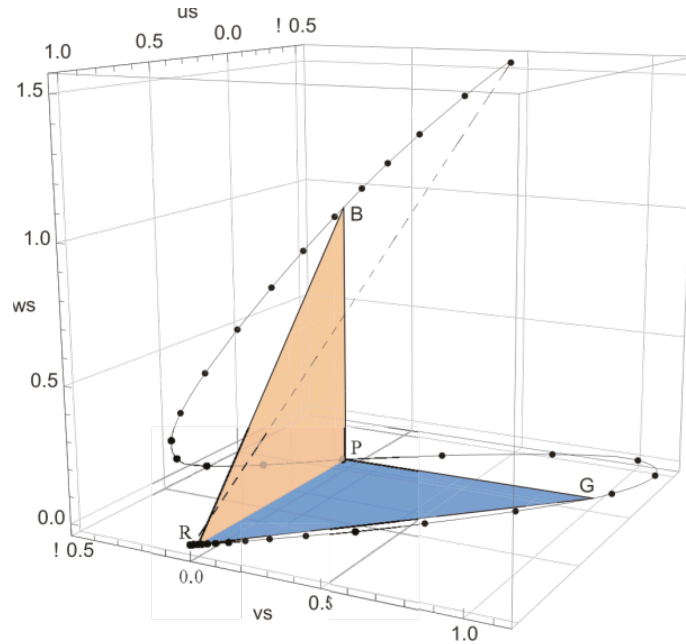
Έστω R, G, P, B ένα σύνολο τετραχρωματικών πρωτευόντων και u, v, p, w οι αντίστοιχες σε αυτά συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης. Έστω us, vs, ps, ws οι τετραχρωματικές «συντεταγμένες χρωματικότητας»:

$$us(\lambda) = \frac{u(\lambda)}{u(\lambda) + v(\lambda) + p(\lambda) + w(\lambda)} \quad vs(\lambda) = \frac{v(\lambda)}{u(\lambda) + v(\lambda) + p(\lambda) + w(\lambda)}$$

$$ps(\lambda) = \frac{p(\lambda)}{u(\lambda) + v(\lambda) + p(\lambda) + w(\lambda)} \quad ws(\lambda) = \frac{w(\lambda)}{u(\lambda) + v(\lambda) + p(\lambda) + w(\lambda)}$$

Προφανώς ισχύει: $us(\lambda) + vs(\lambda) + ps(\lambda) + ws(\lambda) = 1$.

Έστω \mathbf{sI} η διανυσματική παραμετρική συνάρτηση $\mathbf{sI}(\lambda) = (us(\lambda), vs(\lambda), ws(\lambda))$. Αυτή η συνάρτηση παριστά τον φασματικό τόπο σε αυτόν τον τρισδιάστατο χώρο (us, vs, ws) . Στο σχήμα 5-7 φαίνεται η αναπαράσταση του φασματικού τόπου. Για αυτήν ακριβώς την αναπαράσταση έχουν επιλεγθεί σαν πρωτεύοντα τα μονοχρωματικά $\lambda_R = 642\text{nm}$, $\lambda_G = 561\text{nm}$, $\lambda_P = 520\text{nm}$ και $\lambda_B = 441\text{nm}$. Κριτήριο για την επιλογή των συγκεκριμένων ήταν η ωραία εμφάνιση του διαγράμματος.



Σχήμα 5-7. Ο φασματικός τόπος στον χώρο των τετραχρωματικών συντεταγμένων χρωματικότητας $(us(\lambda), vs(\lambda), ws(\lambda))$, με πρωτεύοντα τα μονοχρωματικά $\lambda_R = 642nm$, $\lambda_G = 561nm$, $\lambda_P = 520nm$ και $\lambda_B = 441nm$.

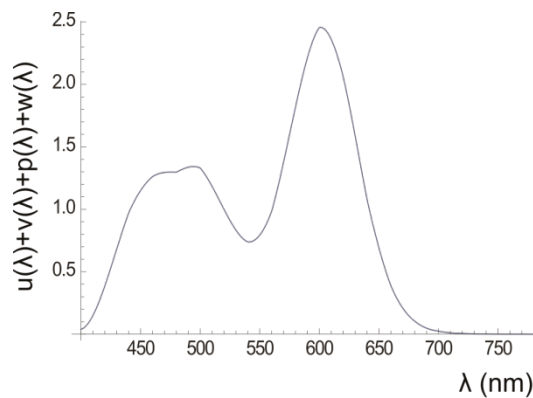
Φαίνεται εύκολα ότι αυτή η συνάρτηση \mathbf{sI} έχει ένα σχήμα σαν ζ-τελικό. Όμως δεν είναι μια επίπεδη καμπύλη. Το τμήμα της από το άπω ερυθρό μέχρι το πρωτεύον P είναι κοντά στο επίπεδο $ws=0$, διότι η συνάρτηση $ws(\lambda)$ έχει σχεδόν μηδενική τιμή σε αυτό το διάστημα. Το υπόλοιπο τμήμα της ευρίσκεται κοντά σε ένα επίπεδο κάθετο στο $ws=0$. Αυτό το σχήμα σαν ζ-τελικό μπορεί να αποδειχθεί μαθηματικά με την βοήθεια της έννοιας της καμπυλότητας. Σε μια δισδιάστατη καμπύλη $\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t))$ η καμπυλότητα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\kappa(t) = \frac{x'(t) \cdot y''(t) - x''(t) \cdot y'(t)}{\left((x'(t))^2 + (y'(t))^2 \right)^{3/2}} \quad (5-11)$$

Η συνάρτηση \mathbf{sI} είναι τρισδιάστατη. Μπορεί όμως να διαιρεθεί σε δύο τμήματα, τα οποία να εξετασθούν ξεχωριστά. Το πρώτο τμήμα εκτείνεται από το άπω ερυθρό μέχρι το λ_P , και το δεύτερο από το λ_P μέχρι το άπω ιώδες. Στο πρώτο τμήμα της είναι σχεδόν δισδιάστατη. Έτσι εξετάζεται σαν $\mathbf{sI}_1 = (us(\lambda), vs(\lambda))$. Αυτό που ενδιαφέρει είναι το πρόσημο της καμπυλότητας και όχι η αριθμητική τιμή της. Ο παρονομαστής του κλάσματος στον τύπο (5-11) είναι πάντοτε θετικός. Εξετάζοντας τον αριθμητή στην μορφή $us'(\lambda) \cdot vs''(\lambda) - us''(\lambda) \cdot vs'(\lambda)$ αποδεικνύεται ότι είναι παντού αρνητικός. Αυτό σημαίνει ότι η καμπύλη είναι κυρτή. Το δεύτερο τμήμα της καμπύλης δεν είναι επίπεδο. Εν τούτοις μπορεί να εξετασθεί σαν $\mathbf{sI}_2 = (ws(\lambda), vs(\lambda))$, το οποίο είναι η προβολή του στο επίπεδο $us=0$. Και εδώ αυτό που

ενδιαφέρει είναι το πρόσημό του. Εξετάζεται ο τύπος $ws'(\lambda) \cdot vs''(\lambda) - ws''(\lambda) \cdot vs'(\lambda)$. Μπορεί να αποδειχθεί ότι και αυτό είναι παντού αρνητικό. Άρα και αυτό το τμήμα είναι κυρτό. Τα δύο λοιπόν τμήματα αυτά, μη ευρισκόμενα στο ίδιο επίπεδο, σχηματίζουν μια καμπύλη σχήματος ς-τελικού.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5-8 το άθροισμα $u(\lambda)+v(\lambda)+p(\lambda)+w(\lambda)$ είναι παντού θετικό, σε αυτό το σύστημα πρωτεύοντων. Άρα και οι συντεταγμένες χρωματικότητας έχουν το ίδιο πρόσημο με τις συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης.



Σχήμα 5-8. Το άθροισμα των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης σαν συνάρτηση του μήκους κύματος (λ).

Τα τέσσερα πρωτεύοντα **R**, **G**, **P**, **B** ευρίσκονται στον φασματικό τόπο και σχηματίζουν ένα τρισσορθογώνιο τετράεδρο με κορυφή ορθής το **P**, το οποίο είναι στην αρχή των αξόνων. Τα άλλα τρία ευρίσκονται πάνω στους άξονες $(0, u_s)$, $(0, v_s)$, $(0, w_s)$. Η διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 5-7 είναι η γραμμή των πορφυρών.

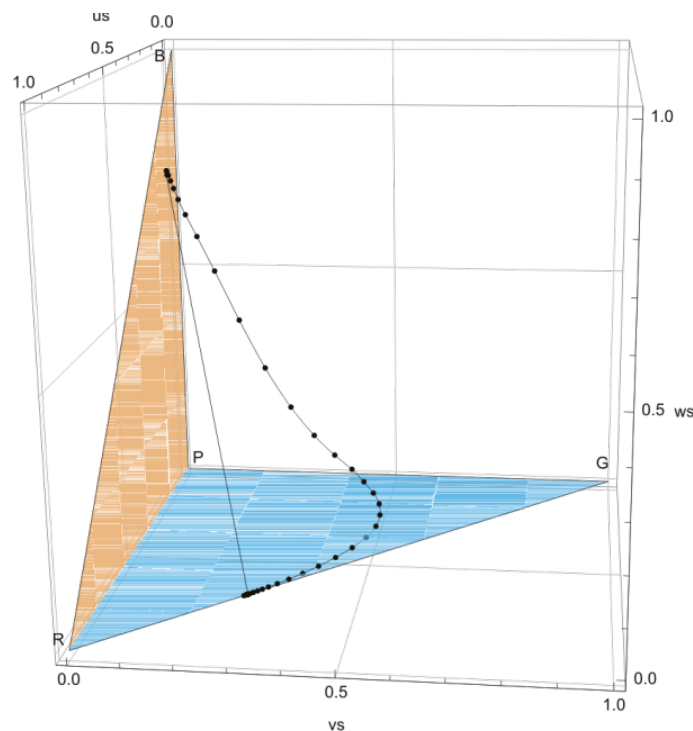
Όλα τα χρωμο-ερεθίσματα, που έχουν θετικές και τις τέσσερείς τους συντεταγμένες χρωματικότητας, αναπαρίστανται από σημεία, που ευρίσκονται στο εσωτερικό του τετραέδρου RGPB. Εν αντιθέσει, τα σημεία στο εξωτερικό του τετραέδρου αναπαριστούν χρωμο-ερεθίσματα, που έχουν τουλάχιστον μία από τις συντεταγμένες χρωματικότητας αρνητική. Ειδικότερα, τα σημεία με τιμές $u_s > 0$ (άρα και $u > 0$) χωρίζονται από αυτά με $u_s < 0$ από το επίπεδο που ορίζεται από τα σημεία των **G**, **P**, **B** πρωτεύοντων. Ομοίως, τα σημεία με $v_s > 0$ χωρίζονται από το επίπεδο **RPB** και τα σημεία με $w_s > 0$ από το **RGP**.

Ο τετραχρωματικός χώρος είναι γραμμικός. Άρα, είναι δυνατόν να μετατραπούν γραμμικά οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης από μια τετράδα, σε μια άλλη τετράδα εξ ίσου έγκυρη. Αυτές οι νέες συναρτήσεις αντιστοιχούν σε πρωτεύοντα, όχι κατ' ανάγκη πάνω στον φασματικό τόπο. Αυτά τα νέα πρωτεύοντα μπορεί να είναι πραγματικά ή φανταστικά.

Λόγω του ιδιότυπου σχήματος του φασματικού τόπου, κάθε ένα από τα επίπεδα **RGP**, **RPB** και **GPB** μπορεί να τον τμήσει σε κανένα, ένα, δύο, ή τρία το πολύ σημεία. Άρα, ο φασματικός τόπος μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερα το πολύ τμήματα, με εναλλασσόμενα πρόσημα. Ένα από αυτά πρέπει οπωσδήποτε να είναι θετικό. Τα μισά το πολύ από αυτά θα είναι αρνητικά. Αυτό αποδεικνύει τον ισχυρισμό, ότι το πλήθος των αρνητικών τμημάτων μπορεί να είναι μηδέν, ένα ή δύο.

Είναι δυνατόν να ευρεθούν τέσσερα πρωτεύοντα, τέτοια ώστε το αντίστοιχό τους τετράεδρο στο διάγραμμα να περικλείει εξ ολοκλήρου τον φασματικό τόπο. Κατά συνέπεια, οι αντίστοιχες σε αυτά συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης, θα είναι παντού θετικές. Αυτά τα τέσσερα πρωτεύοντα θα είναι προφανώς φανταστικά.

Επί παραδείγματι, αν επιλεγθούν οι συναρτήσεις CIE 1964 μαζί με την σκοτοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας $V'(\lambda)$ τότε το παραγόμενο τετράεδρο περικλείει εξ ολοκλήρου τον φασματικό τόπο. Οι τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης θα είναι παντού θετικές. Αυτό αποδεικνύει τον ισχυρισμό, ότι το μικρότερο πλήθος των αρνητικών τμημάτων σε μια συνάρτηση χρωματικής ταύτισης, είναι μηδέν.



Σχήμα 5-9. Ο φασματικός τόπος στον χώρο των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικότητας ($us(\lambda)$, $vs(\lambda)$, $ws(\lambda)$), με πρωτεύοντα αυτά, που αντιστοιχούν στις συναρτήσεις $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $V'(\lambda)$, $z(\lambda)$.

5.9. Οι τετραχρωματικές συναρτήσεις ελαχίστης ισχύος

Με μικρές μεταβολές κάποιου από τα πρωτεύοντα, αλλάζει τα μέγιστο (αλλά και το ελάχιστο) όλων των συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης, αλλά κυρίως των αντιστοιχών με αυτά (το u για το \mathbf{R} κλπ). Οι αλλαγές αυτές άλλοτε είναι αυξητικές και άλλοτε μειωτικές. Βρίσκεται με ελαχιστοποίηση του παρονομαστή στους τύπους αλλαγής πρωτευόντων (5-9):

$$\begin{vmatrix} R_{R'} & R_{G'} & R_{P'} & R_{B'} \\ G_{R'} & G_{G'} & G_{P'} & G_{B'} \\ P_{R'} & P_{G'} & P_{P'} & P_{B'} \\ B_{R'} & B_{G'} & B_{P'} & B_{B'} \end{vmatrix}$$

ότι για κάποια μήκη κύματος πρωτευόντων, οι αντίστοιχες συναρτήσεις παρουσιάζουν την μικρότερη τιμή στο μέγιστό τους και την μέγιστη τιμή στο ελάχιστό τους. Δηλαδή έχουν το μικρότερο ολοκλήρωμα και την μικρότερη ισχύ.

Στον (τρισιδιάστατο) τριχρωματικό διανυσματικό χώρο $(\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B})$ έστω το τετράεδρο με μία κορυφή την αρχή των αξόνων και λοιπές τρεις κορυφές τα σημεία $(\mathbf{R}', \mathbf{G}', \mathbf{B}')$ πάνω στον φασματικό τόπο. Ο όγκος ενός τετραέδρου, όταν δίνονται οι τέσσερις κορυφές του, είναι:

$$V = \frac{1}{3!} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix} \quad (5-12)$$

Για το συγκεκριμένο λοιπόν τετράεδρο, που έχει κορυφές (O, R', G', B') ο όγκος είναι:

$$V = \frac{1}{3!} \begin{vmatrix} R_{R'} & G_{R'} & B_{R'} & 1 \\ R_{G'} & G_{G'} & B_{G'} & 1 \\ R_{B'} & G_{B'} & B_{B'} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{3!} \begin{vmatrix} R_{R'} & G_{R'} & B_{R'} \\ R_{G'} & G_{G'} & B_{G'} \\ R_{B'} & G_{B'} & B_{B'} \end{vmatrix} \quad (5-13)$$

Αντίστοιχα στον τετραχρωματικό διανυσματικό χώρο το αντίστοιχο «υπερ-πεντάεδρο» με κορυφές την αρχή των αξόνων (O) και τα σημεία (R', G', P', B') του φασματικού τόπου, ο «υπερ-όγκος» του είναι:

$$V = \frac{1}{4!} \begin{vmatrix} R_{R'} & G_{R'} & P_{R'} & B_{R'} \\ R_{G'} & G_{G'} & P_{G'} & B_{G'} \\ R_{P'} & G_{P'} & P_{P'} & B_{P'} \\ R_{B'} & G_{B'} & P_{B'} & B_{B'} \end{vmatrix} \quad (5-14)$$

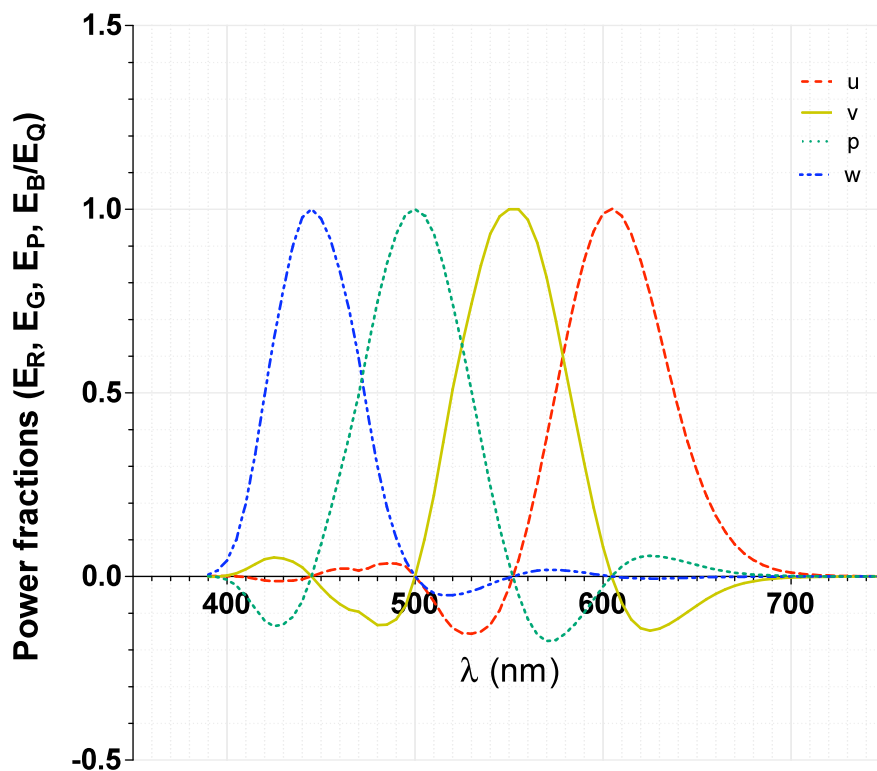
Στην απαίτηση αυτός ο «υπερ-όγκος» να γίνεται μέγιστος, έπεται ότι η ορίζουσα του τύπου (5-14) πρέπει να γίνει μέγιστη, έχοντας σαν μεταβλητές τα $\lambda_{R'}, \lambda_{G'}, \lambda_{P'}, \lambda_{B'}$. Η ορίζουσα όμως αυτή είναι η ανάστροφη του παρονομαστή του τύπου αλλαγής πρωτευόντων (5-9). Αυτό

σημαίνει ότι: με την μεγιστοποίηση αυτού του παρονομαστή, επιτυγχάνεται (α) τετράδα συναρτήσεων ελάχιστης ισχύος και (β) μεγιστοποίηση του εύρους των χρωμο-ερεθισμάτων με θετικές όλες τους τις συνιστώσες.

Για την κάτωθι τετράδα πρωτεύοντων όλες οι συναρτήσεις έχουν την ελάχιστη ισχύ.

$\lambda_R = 604.62 \text{ nm}$, $\lambda_G = 552.10 \text{ nm}$, $\lambda_P = 500.00 \text{ nm}$ και $\lambda_B = 445.00 \text{ nm}$.

Μάλιστα, όλα τα μέγιστα έχουν την τιμή 1 και όλα τα ολοκληρώματα είναι παρεμφερή. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 5-10. Οι τιμές των μεγίστων, των ελαχίστων και των ολοκληρωμάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 5-14.



Σχήμα 5-10. Οι τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης με πρωτεύοντα ελάχιστης ισχύος στον τετραχρωματικό χώρο.

Πίνακας 5-14. Οι τιμές των μεγίστων, των ελαχίστων και των ολοκληρωμάτων των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης ελάχιστης ισχύος.

R=604.6	G=552.1	P=500.0	B=445.0	
1.000	1.000	1.000	1.000	=μέγιστη τιμή
-0.156	-0.147	-0.051	-0.176	=ελάχιστη τιμή
61.406	51.859	51.760	52.982	=ολοκλήρωμα

Όσο τα πρωτεύοντα απομακρύνονται από τις παραπάνω τιμές, τόσο τα μέγιστα των αντιστοιχών συναρτήσεων αυξάνονται. Απειρίζονται δε, όταν δύο πρωτεύοντα ταυτίζονται (γιατί παύουν να είναι γραμμικώς ανεξάρτητα).

Για παράδειγμα, στα πειράματα τετραχρωματικής ταύτισης της Trezona όπου $\lambda_{RT} = 644 \text{ nm}$, $\lambda_{GT} = 588 \text{ nm}$, $\lambda_{PT} = 509 \text{ nm}$ και $\lambda_{BT} = 468 \text{ nm}$ οι διαφορές στα ολοκληρώματα από τα ολοκληρώματα ελάχιστης ισχύος είναι $\Delta R = 39$, $\Delta G = 38$, $\Delta P = 5$ και $\Delta B = 23$

Οι μεγαλύτερες λοιπόν ενέργειες για ταύτιση θα απαιτούνται για το **R** και το **G**.

γ) Αυτά τα πρωτεύοντα διαφέρουν κατά τι από τα τριχρωματικά των 10^0 ελάχιστης ισχύος, τα οποία είναι [87-88]

$\lambda_R = 600 \text{ nm}$, $\lambda_G = 535 \text{ nm}$ και $\lambda_B = 445 \text{ nm}$.

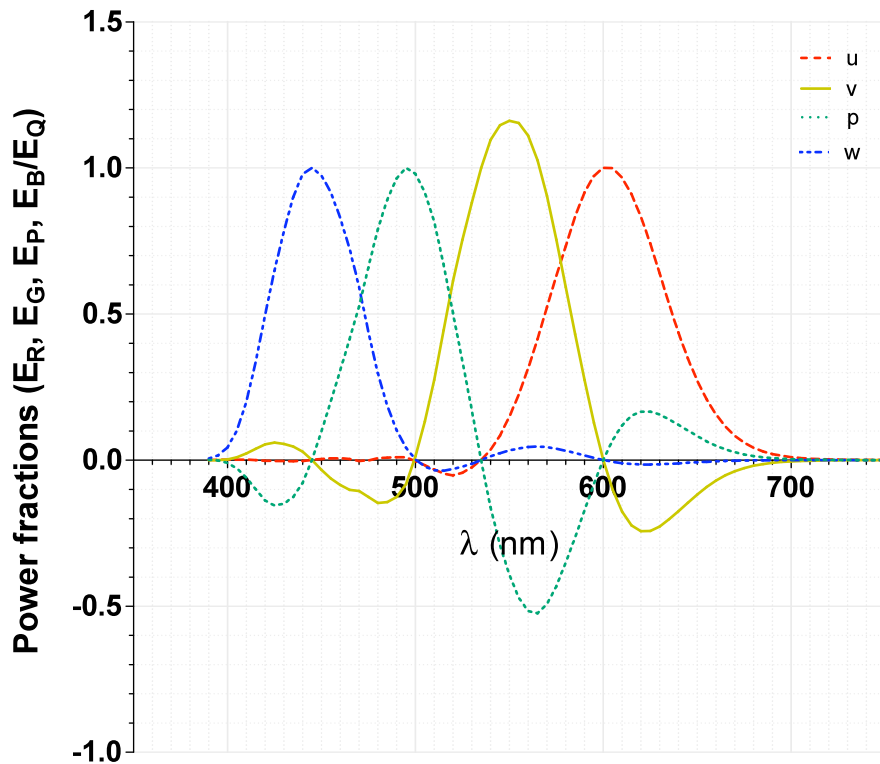
Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς ότι τα δύο από τα πρωτεύοντα ελαχίστης ισχύος $\lambda_G = 552.10 \text{ nm}$, $\lambda_P = 500.00 \text{ nm}$ είναι κοντά στα μέγιστα των καμπύλων $V_{10}(\lambda)$ και $V'(\lambda)$ (555nm και 509nm αντίστοιχα). Αυτό σημαίνει, ότι χρησιμοποιώντας τα πρωτεύοντα ελάχιστης ισχύος επιτυγχάνεται η άριστη ικανότητα διακρίσεως χρωμάτων στον οφθαλμό.

Στα πρωτεύοντα ελάχιστης ισχύος των τριχρωματικών 10^0 , αν προστεθεί και το $\lambda_P = 503.1481 \text{ nm}$, τότε στα αντίστοιχα τετραχρωματικά θα έχουμε τα μέγιστα $u = 1$, $p = 1$, $b = 1$ αλλά $v = 1.161648$,

το οποίο δεν είναι η μικρότερη τιμή για το v . Αυτό φαίνεται στο σχήμα 5-11. Οι τιμές των μεγίστων, ελαχίστων και των ολοκληρωμάτων τους φαίνεται στον πίνακα 5-15.

Πίνακας 5-15. Οι τιμές των μεγίστων, των ελαχίστων και των ολοκληρωμάτων των τριχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης ελάχιστης ισχύος με την προσθήκη του τέταρτου πρωτεύοντος P.

R=600	G=535	P=503	B=445	
1.000	1.162	1.000	1.000	=η μέγιστη τιμή
-0.053	-0.244	-0.037	-0.524	=η ελάχιστη τιμή
14.080	10.992	10.669	6.748	=ολοκλήρωμα



Σχήμα 5-11. Οι τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης με πρωτεύοντα ελάχιστης ισχύος στον τριχρωματικό χώρο.

Πρωτεύοντα ελάχιστης ισχύος θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε μελλοντικά πειράματα χρωματικής ταύτισης για να επιτυγχάνονται πιο ακριβή αποτελέσματα. Τα αντίστοιχα πρωτεύοντα ελάχιστης ισχύος στην τριχρωματική χρωματομετρία είναι σημαντικά γιατί με αυτά η οπτική απόδοση αλλά και το χρωματικό εύρος γίνονται βέλτιστα. Παρόμοια ιδιότητα έχουν και τα αντίστοιχα του τετραχρωματικού χώρου.

6. Μοντέλο για τον υπολογισμό της μεσοπικής λαμπρότητας, από τριχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης

6.1. Τριχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης στην μεσοπική όραση

Έστω το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα \mathbf{Q} , και (u_Q, v_Q, p_Q, w_Q) οι 4-χρωματικές του συντεταγμένες. Από τις εξισώσεις 5-3 είναι δυνατόν να ευρεθούν αντίστροφα οι τριχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης στην μεσοπική περιοχή οράσεως στο συγκεκριμένο σύστημα πρωτευόντων $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{P}, \mathbf{B}$ για οποιαδήποτε ισχύ t του δοκιμαστικού χρωμο-ερεθίσματος \mathbf{Q} . Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να είναι γνωστές οι τριχρωματικές συνιστώσες $R_{PE}=r_E(\lambda_C)$, $G_{PE}=g_E(\lambda_C)$, $B_{PE}=b_E(\lambda_C)$, του \mathbf{P} στα υπόλοιπα πρωτεύοντα $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$, στο συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος E . Αυτές βέβαια οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης έχουν περιορισμένη χρησιμότητα, γιατί στον τριχρωματικό χώρο στην μεσοπική όραση επιτρέπονται μόνο καταχρηστικά αλλαγές πρωτευόντων και ολοκληρώσεις, διότι δεν ισχύει η προσθετικότητα.

Κατά την μετατροπή των τετραχρωματικών σε τριχρωματικές συναρτήσεις παράγεται λοιπόν πλήθος από συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης ανάλογα με την ισχύ E . Από τους τύπους (4-3) φαίνεται ότι σημαντικός παράγων είναι ο p . Άρα οι συναρτήσεις μεταβάλλονται περισσότερο στα μήκη κύματος εκείνα όπου το p έχει την μεγαλύτερη απόλυτη τιμή. Π.χ. για το σύστημα μονοχρωματικών πρωτευόντων ($\lambda_R=641.82\text{nm}$, $\lambda_G=560.50\text{nm}$, $\lambda_C=520.00\text{nm}$, $\lambda_B=441.20\text{nm}$) αυτή η μέγιστη απόλυτη τιμή είναι περίπου στα 520 nm. Άρα σε αυτή την περιοχή περιμένουμε να υπάρχει η μεγαλύτερη εξάρτηση από την ισχύ E . Αφ' ετέρου, εκεί όπου η p μηδενίζεται, δηλαδή στο λ_B στο λ_G και στο λ_R , οι r_E, g_E, b_E δεν μεταβάλλουν τις τιμές τους, μη εξαρτώμενες από την ισχύ. Άρα με την μεταβολή της ισχύος οι r_E, g_E, b_E μεταβάλλουν μόνο τα τοπικά τους ακρότατα και όχι τα υπάρχοντα σημεία μηδενισμού τους.

Είναι δυνατόν όμως να υπάρχουν και άλλα σημεία μηδενισμού. Αν στις παραπάνω σχέσεις θέσουμε επί παραδείγματι $r_E(\lambda_Q) = 0$ τότε $u(\lambda_Q) + p(\lambda_Q) \cdot r_E(\lambda_C) = 0$, το οποίο μπορεί να συμβεί:

1) Αν $r_E(\lambda_C) > 0$ θα πρέπει τα $u(\lambda_Q)$ και $p(\lambda_Q)$ να είναι ετερόσημα, το οποίο συμβαίνει για μήκη κύματος στο διάστημα (λ_P, λ_R) .

2) Αν $r_E(\lambda_C) < 0$ θα πρέπει τα $u(\lambda_Q)$ και $p(\lambda_Q)$ να είναι ομόσημα, το οποίο συμβαίνει για μήκη κύματος στα διαστήματα $(\lambda_{UV}, \lambda_C)$ και $(\lambda_C, \lambda_{IR})$.

Όπου λ_{UV} και λ_{IR} είναι τα μήκη κύματος στα ακραία μικρά και αντίστοιχα μεγάλα σημεία του φάσματος, όπου οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης μονίμως είναι μηδέν. Με όμοιο τρόπο μπορούν να βρεθούν τα αντίστοιχα διαστήματα πιθανού μηδενισμού και για τις $g_E(\lambda)$ και $b_E(\lambda)$. Αυτά τα επιπλέον σημεία μηδενισμού μπορούν να συμβούν μόνο στις χαμηλές ισχύεις.

Είναι επίσης άξιο παρατηρήσεως, ότι αν τα $\Gamma_E(\lambda_C)$, $g_E(\lambda_C)$ και $b_E(\lambda_C)$, μεγαλώνουν κατά απόλυτη τιμή όσο μικραίνει η ισχύς, τότε μεγαλώνει και η επίδραση του $p(\lambda_Q)$ επί των αντίστοιχων συναρτήσεων $\Gamma_E(\lambda_Q)$, $g_E(\lambda_Q)$ και $b_E(\lambda_Q)$. Σε πολύ μικρές ισχύεις η επίδραση του $p(\lambda_Q)$ είναι τόσο μεγάλη, ώστε τα τοπικά ακρότατα των $\Gamma_E(\lambda_Q)$, $g_E(\lambda_Q)$ και $b_E(\lambda_Q)$ τείνουν να ταυτιστούν με το αντίστοιχο του $p(\lambda_Q)$, άρα και μεταξύ τους. Στην σχεδόν σκοτοπική λοιπόν όραση και οι τρεις καμπύλες θα έχουν σχεδόν τα ίδια τοπικά ακρότατα, το οποίο κάνει την χρωματική ταύτιση αόριστη δηλαδή επιδεχόμενη πολλές λύσεις.

6.2. Θεωρητική θεμελίωση του μοντέλου για τον υπολογισμό της μεσοπικής λαμπρότητας στην μεσοπική όραση

Στην παρούσα διατριβή αναπτύσσεται ένα νέο μοντέλο μεσοπικής φασματικής ευαισθησίας με γραμμικό συνδυασμό των φωτομετρικών καμπύλων $V_{10}(\lambda)$ και $V'(\lambda)$, με την χρήση τριχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης στην μεσοπική όραση [89]. Αυτές οι τριχρωματικές συναρτήσεις μπορούν να προκύψουν είτε από τους τύπους 5-3 και πειραματικό προσδιορισμό των $\Gamma_E(\lambda_C)$, $g_E(\lambda_C)$ και $b_E(\lambda_C)$, είτε με πειραματικά δεδομένα από απ' ευθείας τριχρωματικές ταυτίσεις διαφόρων μονοχρωματικών δοκιμαστικών χρωμο-ερεθισμάτων στην μεσοπική περιοχή.

Έστω λοιπόν τα πρωτεύοντα μονοχρωματικά χρωμο-ερεθίσματα \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} . Με οποιονδήποτε από τους δύο τρόπους (πειραματικό προσδιορισμό των $\Gamma_E(\lambda_C)$, $g_E(\lambda_C)$ και $b_E(\lambda_C)$, ή με πειραματικά δεδομένα από απ' ευθείας τριχρωματικές ταυτίσεις) προσδιορίζονται οι τριχρωματικές συνιστώσες για τα μονοχρωματικά δοκιμαστικά χρωμο-ερεθίσματα $\mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_n$ σε διάφορα επίπεδα ισχύος, που όλα όμως αντιστοιχούν σε μεσοπική όραση.

Αυτό που μετράνε τα όργανα είναι οι ισχύεις E_R , E_G , E_B των τριών πρωτευόντων και E_{Q_i} η ισχύς του εκάστοτε δοκιμαστικού \mathbf{Q}_i . Στην φωτοπική περιοχή οράσεως στην πλήρη ταύτιση χρωματικότητας και φωτεινότητας ισχύει:

$$E_Q \cdot K \cdot V_{10}(\lambda_Q) = E_R \cdot K \cdot V_{10}(\lambda_R) + E_G \cdot K \cdot V_{10}(\lambda_G) + E_B \cdot K \cdot V_{10}(\lambda_B) \quad (6-1)$$

Ομοίως και στην σκοτοπική όραση στην ταύτιση φωτεινότητας ισχύει:

$$E_Q \cdot K' \cdot V'(\lambda_Q) = E_R \cdot K' \cdot V'(\lambda_R) + E_G \cdot K' \cdot V'(\lambda_G) + E_B \cdot K' \cdot V'(\lambda_B) \quad (6-2)$$

Όπου $K=683 \text{ lm/W}$ και $K'=1720 \text{ lm/W}$.

Στην μεσοπική όραση δεχόμαστε ότι ισχύει μια ανάλογη σχέση στην πλήρη ταύτιση:

$$E_Q \cdot K_E'' \cdot V_E''(\lambda_Q) = E_R \cdot K_E'' \cdot V_E''(\lambda_R) + E_G \cdot K_E'' \cdot V_E''(\lambda_G) + E_B \cdot K_E'' \cdot V_E''(\lambda_B) \quad (6-3)$$

Όπου K_E'' μια άγνωστη μεταβλητή, που εξαρτάται από την ισχύ E_Q και παίρνει τιμές $K < K_E'' < K'$.

Η $V_E''(\lambda)$ είναι η ζητούμενη φασματική ευαισθησία του οφθαλμού στην ισχύ E_Q . Εξαρτάται από την ισχύ και παίρνει τιμές κάθε φορά μεταξύ των $V_{10}(\lambda_Q)$ και $V'(\lambda_Q)$.

Η σχέση (6-3) γράφεται αλλιώς:

$$K_E'' \cdot V_E''(\lambda_Q) = (E_R/E_Q) \cdot K_E'' \cdot V_E''(\lambda_R) + (E_G/E_Q) \cdot K_E'' \cdot V_E''(\lambda_G) + (E_B/E_Q) \cdot K_E'' \cdot V_E''(\lambda_B) \quad (6-4)$$

Τα κλάσματα $(E_R/E_Q) \equiv r_E$, $(E_G/E_Q) \equiv g_E$, $(E_B/E_Q) \equiv b_E$, είναι τα ποσοστά ισχύος των τριών πρωτευόντων, που απαιτούνται για πλήρη ταύτιση με το Q στην ισχύ E . Αυτά τα κλάσματα προσδιορίζονται για διάφορα επίπεδα ισχύος E_Q .

Για κάποια λοιπόν δεδομένη ισχύ E_Q έχουμε τις σχέσεις, που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από τα δοκιμαστικά Q_i :

$$K_E'' \cdot V_E''(\lambda_{Q_i}) = r_{E_i} \cdot K_E'' \cdot V_E''(\lambda_R) + g_{E_i} \cdot K_E'' \cdot V_E''(\lambda_G) + b_{E_i} \cdot K_E'' \cdot V_E''(\lambda_B) \quad (6-5)$$

Το K_E'' έχει την ίδια τιμή σε όλες τις σχέσεις. Γι' αυτό μπορούμε να το ενσωματώσουμε στις $V_E''(\lambda)$ σε μια νέα συνάρτηση, την $M_E(\lambda)$. Τα ανωτέρω λοιπόν γράφονται:

$$M_E(\lambda_{Q_i}) = r_{E_i} \cdot M_E(\lambda_R) + g_{E_i} \cdot M_E(\lambda_G) + b_{E_i} \cdot M_E(\lambda_B) \quad (6-6)$$

Αν οι εξισώσεις αυτές είναι n το πλήθος, τότε οι άγνωστοι είναι $n+3$. Άρα δεν λύνονται αναλυτικά. Οι λύσεις όμως μπορούν να προσεγγισθούν με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, κάνοντας τις παρατηρήσεις:

1) Όλα τα σημεία $M_E(\lambda_{Qi})$, $M_E(\lambda_R)$, $M_E(\lambda_G)$, $M_E(\lambda_B)$ δεν είναι άσχετα μεταξύ τους, αλλά αποτελούν σημεία της ίδιας καμπύλης $M_E(\lambda)$. Άρα αυτό που ζητείται είναι μια νέα καμπύλη και όχι σκόρπια σημεία.

Έστω ότι η καμπύλη αυτή είναι της μορφής:

$$M_E(\lambda) = a_E \cdot K \cdot V_{10}(\lambda) + b_E \cdot K' \cdot V'(\lambda) \quad (6-7)$$

δηλαδή είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των καμπύλων $V_{10}(\lambda)$ (CIE 1931) και $V'(\lambda)$. Επιλέχθηκε αυτός ο τύπος, γιατί η φασματική ευαισθησία του οφθαλμού στην μεσοπική περιοχή είναι συνάρτηση της επιδράσεως των ραβδίων και των κωνίων.

2) Ολόκληρη η οικογένεια των μεσοπικών καμπύλων $M_E(\lambda)$ έχει ένα κοινό σημείο με τις $KV_{10}(\lambda)$ και $K'V'(\lambda)$. Για $\lambda=555\text{nm}$ όλες οι καμπύλες που δείχνουν φασματική ευαισθησία, πρέπει να έχουν την τιμή 683 lm/W . Άρα η σχέση (6-7) γίνεται:

$$M_E(555) = a_E \cdot K \cdot V_{10}(555) + b_E \cdot K' \cdot V'(555) \quad \Rightarrow$$

$$683 = a_E \cdot 683 + b_E \cdot 683 \quad \Rightarrow \quad b_E = (1 - a_E) \quad (6-8)$$

Αντικαθιστώντας την (5) στην (4), λαμβάνουμε:

$$M_E(\lambda) = a_E \cdot K \cdot V_{10}(\lambda) + (1 - a_E) \cdot K' \cdot V'(\lambda) \quad (6-9)$$

Αντικαθιστώ την (6-9) στην (6-6) και έχω τελικά:

$$a_E \cdot K \cdot V_{10}(\lambda_{Qi}) + (1 - a_E) \cdot K' \cdot V'(\lambda_{Qi}) =$$

$$= r_{Ei} [a_E \cdot K \cdot V_2(\lambda_R) + (1 - a_E) \cdot K' \cdot V'(\lambda_R)] + g_{Ei} [a_E \cdot K \cdot V_{10}(\lambda_G) + (1 - a_E) \cdot K' \cdot V'(\lambda_G)] +$$

$$+ b_{Ei} [a_E \cdot K \cdot V_2(\lambda_B) + (1 - a_E) \cdot K' \cdot V'(\lambda_B)] \quad (6-10)$$

Τα $V_{10}(\lambda_R)$, $V_{10}(\lambda_G)$, $V_{10}(\lambda_B)$, $V_{10}(\lambda_{Qi})$ είναι οι φωτοπικές τιμές των πρωτευόντων και του δοκιμαστικού και βρίσκονται εύκολα. Ομοίως, τα $V'(\lambda_R)$, $V'(\lambda_G)$, $V'(\lambda_B)$, $V'(\lambda_{Qi})$ είναι οι αντίστοιχες σκοτοπικές τιμές. Από όλες τις σχέσεις (6-10) αυτά που παραμένουν άγνωστα είναι τα a_E , τα οποία εξαρτώνται μόνο από την ισχύ E_Q και όχι από το μήκος κύματος του δοκιμαστικού χρωμο-ερεθίσματος. Αν έχουμε λοιπόν n το πλήθος εξισώσεις σαν την (6-10), μπορούμε με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων να προσδιορίσουμε τα a_E , για ένα εύρος ισχύων.

6.3. Πειράματα τριχρωματικής ταύτισης με ανθρώπινα υποκείμενα στην μεσοπική όραση με στόχο να προσδιορισθούν οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης

Η μέθοδος, που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των τριχρωματικών συναρτήσεων στην μεσοπική περιοχή οράσεως, ήταν με πειραματικά δεδομένα από απ' ευθείας τριχρωματικές ταυτίσεις.

Σαν πρωτεύοντα επιλέχθηκαν τα $R=641.82\text{nm}$, $G=560.50\text{nm}$, $B=441.20\text{nm}$. Αν και αυτά τα πρωτεύοντα επιλέχθηκαν αυθαίρετα, κριτήριο της επιλογής τους ήταν να πλησιάζουν τα **R** και **B** στα αντίστοιχα του τυπικού παρατηρητή CIE 1964 ($R=645\text{ nm}$, $B=444\text{ nm}$). Όσο για το **G** πρωτεύον επιλέχθηκε το συγκεκριμένο, γιατί σε αυτό το μήκος κύματος ο οφθαλμός είναι πιο ευαίσθητος από ό,τι στο αντίστοιχο του τυπικού παρατηρητή **G** ($=525\text{nm}$). Αυτή καθ' αυτή η συγκεκριμένη επιλογή των πρωτευόντων είναι μικρής σημασίας. Και τούτο διότι, οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης μπορούν πάντοτε να μετατρέπονται εύκολα με γραμμικούς μετασχηματισμούς από ένα σύστημα πρωτευόντων σε ένα άλλο.

Έγιναν τριχρωματικές ταυτίσεις για τα δοκιμαστικά χρωμο-ερεθίσματα $Q_1=419.80\text{nm}$, $Q_2=451.00\text{nm}$, $Q_3=500.00\text{nm}$, $Q_4=520.00\text{nm}$, $Q_5=580.40\text{nm}$ για διάφορα επίπεδα ισχύος, που όλα αντιστοιχούν σε μεσοπική όραση. Και αυτά τα δοκιμαστικά χρωμο-ερεθίσματα επιλέχθηκαν αυθαίρετα. Τα κριτήρια για την επιλογή τους ήσαν: (α) Τα μήκη κύματος τους να είναι αρκετά μακριά το ένα από το άλλο, ώστε τα αισθήματα των χρωμάτων, που θα παράγουν, να είναι σαφώς διαφορετικά. (β) Περισσότερο βάρος δόθηκε στα μικρά μήκη κύματος. Αυτό έγινε διότι όσο η ισχύς μειώνεται, τόσο η μεταβολή των συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης γίνεται μεγαλύτερη σε αυτά τα μήκη κύματος. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε δοκιμαστικά χρωμο-ερεθίσματα. Περισσότερα δεν θα βελτίωναν τα αποτελέσματα θεαματικά. Αυτά τα δοκιμαστικά χρωμο-ερεθίσματα, σύμφωνα με την μέθοδο που επελέγη, δεν θα χρησιμοποιούντο για να παράξουν τις χρωματικές συναρτήσεις σε κάθε επίπεδο ισχύος από το μηδέν. Οι συναρτήσεις αυτές για την φωτοπική όραση είναι γνωστές. Αυτό που ενδιαφέρει εδώ είναι η μεταβολή τους στην μεσοπική όραση. Ως εκ τούτου, λίγα μόνο δοκιμαστικά είναι αρκετά. Εξ άλλου, σύμφωνα με την ανωτέρω εκτεθείσα μεθοδολογία ο μόνος άγνωστος σε κάθε επίπεδο ισχύος είναι η παράμετρος a_E . Θεωρητικά, και ένα μόνο δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα θα ήταν αρκετό. Το ερυθρό μέρος του φάσματος αποκλείστηκε από την επιλογή, διότι δεν επηρεάζεται πολύ από την μετατόπιση του Purkinje. Παραμένει αρκετά σταθερό σε μεταβολές τις ισχύος. Χρωμο-ερεθίσματα του άκρου ερυθρού του ορατού

φάσματος φαίνονται σαν ερυθρά ακόμη και στο απόλυτο κατώφλι οράσεως. Το να συμπεριληφθούν σε αυτή την έρευνα, δεν θα άλλαζαν τα αποτελέσματα σημαντικά. Δεν συμμετέχουν σημαντικά στην μεταβολή της ευαισθησίας του οφθαλμού στην μεσοπική όραση.

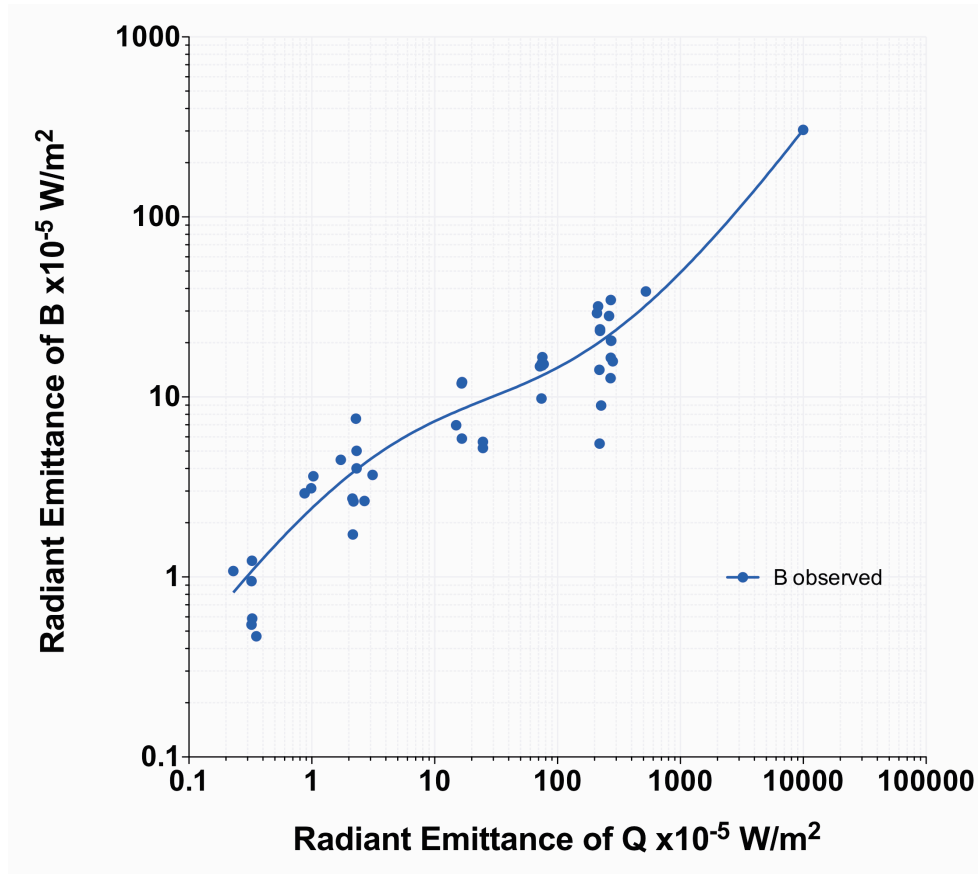
Χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη και η μεθοδολογία, που εκτέθηκαν στις παραγράφους 4.2 και 4.3. Έλαβαν μέρος 15 ανθρώπινα υποκείμενα 20-22 ετών, όλα με φυσιολογική όραση, αφού τους εξηγήθηκε περί τίνος πρόκειται και προσαρμόστηκαν στο σκοτάδι για 15 λεπτά. Όπως στα πειράματα των Stiles και Burch [90], τους ζητήθηκε να εστιάσουν την προσοχή τους και να επιτύχουν ταύτιση στην περιφέρεια του οπτικού πεδίου τους των 10^0 ενώ θα ατενίζουν στην κεντρική περιοχή, και αυτό για να αποφευχθεί η συνεισφορά της κηλίδας του Maxwell.

Τα αποτελέσματα των χρωματικών ταυτίσεων μπορούν να επεξεργαστούν με μη γραμμική προσαρμογή: Η ισχύς (R_E, G_E, B_E) κάθε ενός από τα πρωτεύοντα $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$, που απαιτείται για την ταύτιση ενός δοκιμαστικού (Q_i), σαν συνάρτηση της ισχύος (E) του δοκιμαστικού. Η ερώτηση, που ίσως εγείρεται, είναι κατά πόσο τα πειραματικά αυτά δεδομένα από κάθε πρωτεύον μπορούν να θεωρηθούν σαν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Η απάντηση είναι διπλή: (α) πάντοτε υπάρχει μια μικρή ανοχή στις μεταμερικές συνθέσεις, όπως υπαγορεύεται από τις ελλείψεις του MacAdam (§2.3.12). (β) Δεν υπάρχει μαθηματική έκφραση, που να τα συνδυάζει. Άρα μπορούν να θεωρηθούν, ως ένα βαθμό, σαν ανεξάρτητα.

Στους υπολογισμούς προσαρμογής έχουν ληφθεί υπ' όψιν και οι αντίστοιχες φωτοπικές τιμές $V_{10}(Q_1), \dots, V_{10}(Q_5)$, θεωρώντας ότι είναι οι τιμές των δοκιμαστικών σε πολύ υψηλά επίπεδα ισχύος ($10000 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$). Αυτές οι τιμές της ισχύος σαφώς αντιστοιχούν σε φωτοπικά μεγέθη για τα τρία τελευταία δοκιμαστικά ($Q_3=500\text{nm}, Q_4=520\text{nm}, Q_5=580\text{nm}$). Σε υψηλά επίπεδα ισχύος, οι μεσοπικές τιμές των χρωματικών συνιστωσών των πρωτευόντων πρέπει να τείνουν να πλησιάσουν στις αντίστοιχες φωτοπικές τιμές, όπως μπορούν να υπολογισθούν από τις (φωτοπικές) συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης. Αυτές οι τιμές πρέπει να είναι το φωτοπικό όριο των μεσοπικών. Ως εκ τούτου, πρέπει να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς.

Έχοντας ανά χείρας τα πειραματικά αποτελέσματα και τα φωτοπικά όρια, που τέθηκαν, υπολογίζονται οι γραμμές προσαρμογής. Αυτές έχουν ένα σχήμα σαν ζ-τελικό, αλλά κεκλιμένο, όπως φαίνεται στο σχήμα 6-1. Σε αυτό το σχήμα φαίνεται η προσαρμογή της B

συνιστώσας του δοκιμαστικού $Q_3=520\text{nm}$, σαν παράδειγμα. Η μέθοδος υπολογισμού της γραμμής προσαρμογής είναι η Marquardt και Levenberg.



Σχήμα 6-1. Τα πειραματικά αποτελέσματα της B συνιστώσας του δοκιμαστικού $Q_3=520\text{nm}$, μαζί με την γραμμή προσαρμογής τους.

Στην προσαρμογή αυτή χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό μοντέλο:

$$B(E) = 10^{(\tanh(a \log(E)+b)+c \log(E)+d)} \quad (6-11)$$

όπου: $a=-0.6753$, $b=0.9667$, $c=0.9473$ και $d=-0.3657$

Ο όρος «tanh» γενικά προσδιορίζει μια καμπύλη μορφής ζ-τελικού, ενώ οι υπόλοιποι όροι προσδιορίζουν την «κλίση» της από τον οριζόντιο άξονα (το «c») και την θέση της στον άξονα B (το «d»). Το ακριβές σχήμα αυτής της καμπύλης, δηλαδή οι ακριβείς τιμές των

παραμέτρων «a», «b», «c», «d» εξαρτάται από το ίδιο το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα. Ειδικότερα, εξαρτάται τουλάχιστον από τον λόγο S/P (σκοτοπική διά φωτοπική λαμπρότητα).

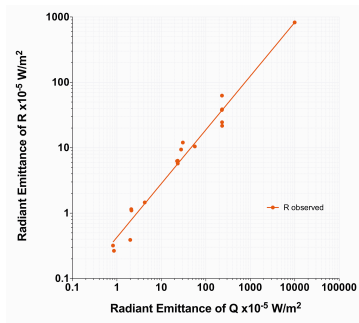
Ο ακριβής τύπος που περιγράφει την καμπύλη προσαρμογής αυτή θα χρησιμοποιηθεί αργότερα για τον προσδιορισμό των τιμών του συντελεστή a_E , που παρουσιάζεται στον τύπο (5-10). Κατά συνέπεια ο συντελεστής a_E πρέπει να είναι συνάρτηση δύο μεταβλητών: της ισχύος (E) και του λόγου (S/P). Στην πράξη η διαδικασία προσδιορισμού του a_E σαν συνάρτηση δύο μεταβλητών είναι δύσκολη. Γι' αυτό και η διαδικασία αυτή χωρίζεται σε δύο φάσεις:

Στην πρώτη φάση, όλες οι μεταβολές που οφείλονται στον λόγο (S/P) δεν λαμβάνονται υπ' όψιν. Για όλα τα πειραματικά δεδομένα γίνεται μη γραμμική προσαρμογή με μοντέλο διπλο-λογαριθμικές ευθείες, δηλαδή ευθείες σε διάγραμμα λογ-λογ. Όλα τα όρια φωτοπικής λαμπρότητας θα θεωρηθούν τα ίδια για όλα τα δοκιμαστικά. Το ίδιο και για τα όρια σκοτοπικής λαμπρότητας. Με αυτόν τον τρόπο ο συντελεστής a_E είναι συνάρτηση μόνο μιας μεταβλητής, της ισχύος. Τώρα μπορεί ευκολότερα να προσδιορισθεί. Τα αποτελέσματα δεν θα περιγράφουν ένα συγκεκριμένο δοκιμαστικό, αλλά μάλλον θα περιγράφουν προσεγγιστικά όλα τα δοκιμαστικά και κυρίως αυτά με λόγο (S/P) κοντά στην μονάδα.

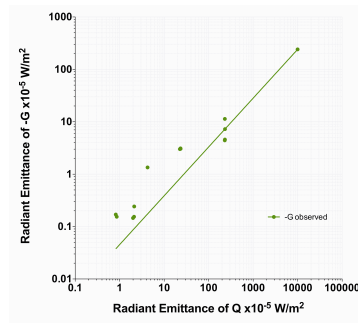
Στην δεύτερη φάση ο συντελεστής a_E θα τροποποιηθεί σύμφωνα με τον λόγο (S/P). Θα γίνει ένας συμβιβασμός μεταξύ απλότητας και ακρίβειας, αλλά με έμφαση στην ακρίβεια. Αυτή φάση είναι η «βελτίωση» του μοντέλου.

6.4. Ανάπτυξη του μοντέλου

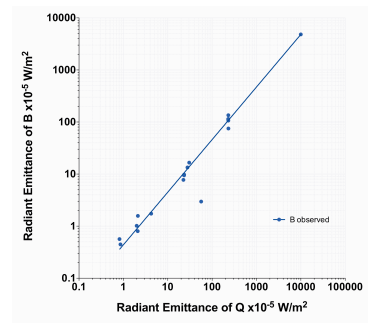
Οι τιμές των συνιστωσών των δοκιμαστικών χρωμο-ερεθισμάτων $Q_1 \dots Q_5$ στα πρωτεύοντα **R**, **G** και **B** έχουν προσαρμοστεί μη γραμμικά. Η μέθοδος, που χρησιμοποιείται, είναι η Marquardt και Levenberg, η οποία συνδυάζει δύο άλλες μεθόδους: της τέμνουσας και των Gauss-Newton. Η μέθοδος της τέμνουσας είναι αποδοτική στις πρώτες αναδρομές, αλλά συγκλίνει πολύ αργά όταν πλησιάζει τις βέλτιστες τιμές. Αντίθετα, η Gauss-Newton συγκλίνει αργά στις πρώτες αναδρομές, αλλά γίνεται αποδοτικότερη, όταν πλησιάζει τις βέλτιστες τιμές. Τα σχήματα 6-2 έως 6-6 δείχνουν τα πειραματικά αποτελέσματα των ισχύων των συνιστωσών R(E), G(E), B(E) των τριών πρωτευόντων που απαιτήθηκαν για ταύτιση των δοκιμαστικών χρωμο-ερεθισμάτων $Q_1 \dots Q_5$, μαζί με τις ευθείες προσαρμογής τους.



(α)

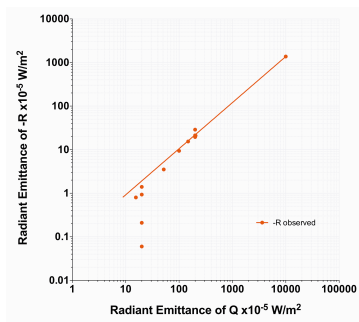


(β)

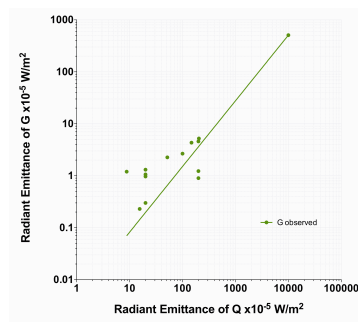


(γ)

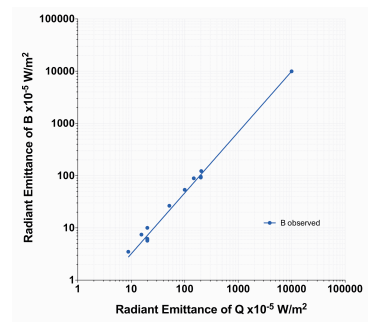
Σχήμα 6-2. Οι ισχύεις των τριών πρωτευόντων για ταύτιση του δοκιμαστικού $Q_1=419.80nm$ (α) για το R , (β) για το G , (γ) για το B .



(α)

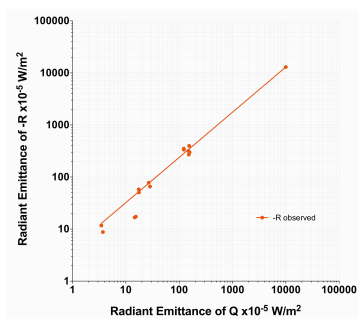


(β)

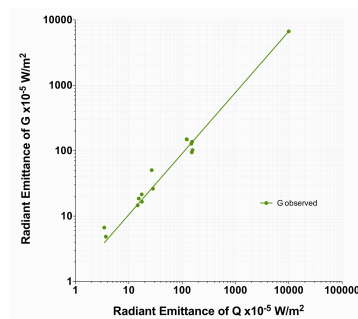


(γ)

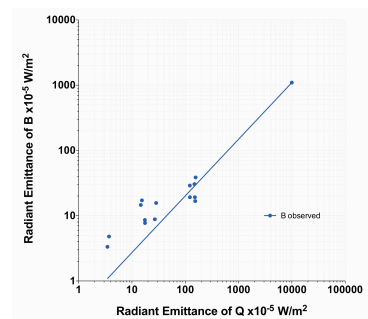
Σχήμα 6-3. Οι ισχύεις των τριών πρωτευόντων για ταύτιση του δοκιμαστικού $Q_2=451nm$ (α) για το R , (β) για το G , (γ) για το B .



(α)

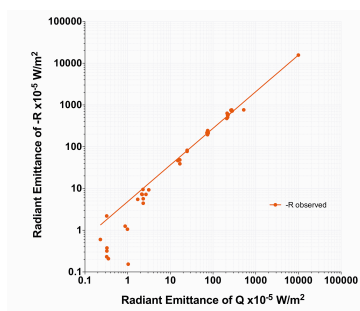


(β)

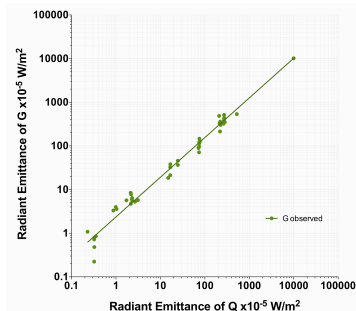


(γ)

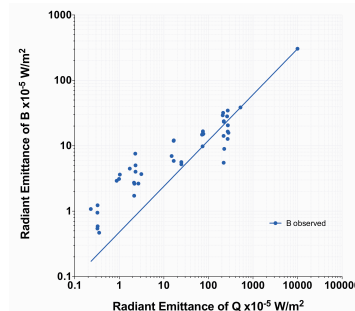
Σχήμα 6-4. Οι ισχύεις των τριών πρωτευόντων για ταύτιση του δοκιμαστικού $Q_3=500nm$ (α) για το R , (β) για το G , (γ) για το B .



(α)

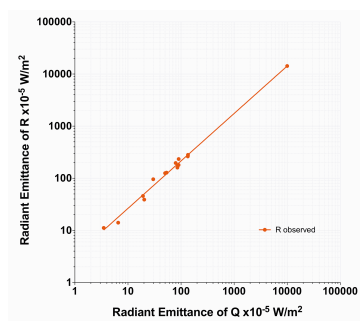


(β)

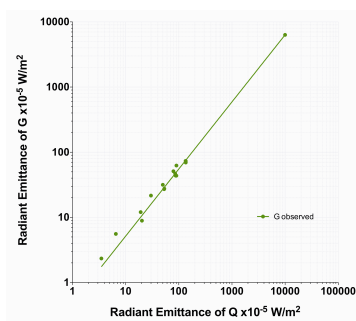


(γ)

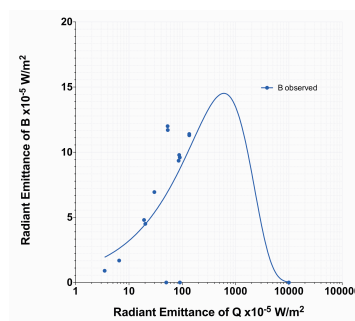
Σχήμα 6-5. Οι ισχύεις των τριών πρωτεύοντων για ταύτιση του δοκιμαστικού $Q_4=520nm$ (α) για το R , (β) για το G , (γ) για το B .



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 6-6. Οι ισχύεις των τριών πρωτεύοντων για ταύτιση του δοκιμαστικού $Q_5=580nm$ (α) για το R , (β) για το G , (γ) για το B .

Σε αυτά τα σχήματα (6-2 έως 6-6) τα αρνητικά πρόσημα, που εμφανίζονται στις περιγραφές των καθέτων αξόνων, δείχνουν ότι αυτά τα πρωτεύοντα έχουν προστεθεί στο δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα, για να επιτευχθεί ταύτιση. Συμβατικά η ενέργειά τους λέγεται «αρνητική». Σε αυτά τα σχήματα (6-2 έως 6-6) όλες οι γραμμές προσαρμογής είναι (διπλο-λογαριθμικές) ευθείες, με εξαίρεση την τελευταία. Η συγκεκριμένη έχει ένα τοπικό μέγιστο και μετά πέφτει στο μηδέν. Αυτό συμβαίνει γιατί αντίστοιχη φωτοπική τιμή είναι μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι για αυτό το χρωμο-ερέθισμα (η B συνιστώσα του $Q_5=580nm$) δεν χρειάζεται το B πρωτεύον για να επιτευχθούν ταυτίσεις. Όμως στα πειράματα που έγιναν, τα υποκείμενα χρειάστηκαν το B πρωτεύον για τις ταυτίσεις τους στην μεσοπική περιοχή. Αυτές οι τιμές της ισχύος του B , οσοδήποτε μικρές κι αν ήσαν, δεν μπορούσαν να αγνοηθούν. Ως εκ τούτου, η γραμμή

προσαρμογής ακολουθεί τις μεσοπικές τιμές αλλά στο τέλος γίνεται μηδέν στο φωτοπικό όριο.

Οι γραμμές προσαρμογής για όλες τις γραμμές περιγράφονται από τον τύπο:

$$R(E) \text{ ή } G(E) \text{ ή } B(E) = 10^{(\text{Intercept} + \text{Slope} \log(E) + D E)} \quad (6-12)$$

Σε αυτόν τον τύπο η ισχύς εκφράζεται σε μονάδες 10^{-5} W/m^2 . Αυτή η σχέση έχει άνω όριο εφαρμογής το φωτοπικό όριο, δηλαδή αυτό όπου τα ραβδία θεωρούνται κορεσμένα. Αυτό το όριο έχει ληφθεί για ισχύ $10000 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$, η οποία αντιστοιχεί σε φωτοπική λαμπρότητα πάνω από 10 cd/m^2 για μονοχρωματικό χρωμο-ερέθισμα από 490 nm έως 620 nm. Συμπεριλαμβάνει δε τα δοκιμαστικά Q_3 , Q_4 και Q_5 στα παρόντα πειράματα. Πάνω από αυτό το όριο, η τιμή της συναρτήσεως (6-12) παραμένει σταθερή.

Οι αριθμητικές τιμές των συντελεστών Intercept, Slope και D για τις συνιστώσες R, G, B των δοκιμαστικών φαίνονται στον πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1. Οι συντελεστές Intercept, Slope και D για τις συνιστώσες R, G, B των δοκιμαστικών Q_i , όπως εμφανίζονται στον τύπο (6-12).

λ_Q (nm)		Intercept	Slope	D
419.80	R	-0.3695	0.8215	0
	-G	-1.343	0.9313	0
	B	-0.3587	1.010	0
451.00	-R	-1.094	1.058	0
	G	-2.351	1.264	0
	B	-0.6603	1.164	0
500.00	-R	0.6392	0.08685	0
	G	0.08687	0.9348	0
	B	-0.4335	0.8684	0
520.00	-R	0.6847	0.8775	0
	G	0.3731	0.9090	0
	B	-0.3218	0.7011	0
580.40	R	0.5114	0.9105	0
	G	-0.3178	1.030	0
	B	0.0237	0.4851	-0.000349

Υπενθυμίζεται, ότι αυτές οι γραμμές προσαρμογής δεν είναι οι βέλτιστες για τα πειραματικά εξαγόμενα. Είναι όμως οι βέλτιστες κάτω από τις προϋποθέσεις που τέθηκαν στην παράγραφο §6.3. Με την βοήθειά τους μπορούν να υπολογισθούν οι τριχρωματικές συνιστώσες κάθε δοκιμαστικού στα πρωτεύοντα **R**, **G**, **B** για κάθε τιμή ισχύος.

Οι τιμές της παραμέτρου a_E μπορούν να προσδιοριστούν από τον τύπο (6-10), με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, για μεγάλο αριθμό ισχύων.

Αναλυτικότερα, οι τιμές του a_E υπολογίζονται ως εξής, από τον τύπο (6-10). Για μια συγκεκριμένη τιμή της ισχύος (E), επί παραδείγματι $E = 1500 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$, πέντε εξισώσεις παρόμοιες με την (6-10) γράφονται, μια για κάθε ένα από τα πέντε δοκιμαστικά χρωμοερεθίσματα $Q_1=419\text{nm}$, $Q_2=451\text{nm}$, $Q_3=500\text{nm}$, $Q_4=520\text{nm}$ και $Q_5=580\text{nm}$.

Οι τιμές των $V_{10}(\lambda_Q)$ και $V'(\lambda_Q)$ για τα πέντε αυτά δοκιμαστικά μπορούν εύκολα να ευρεθούν, όπως επίσης και οι τιμές $V_{10}(\lambda)$ και $V'(\lambda)$ για τα τρία πρωτεύοντα $R=641.82\text{nm}$, $G=560.50\text{nm}$ και $B=441.20\text{nm}$.

Οι τιμές των $r_{Ei}=R(E)/E$, $g_{Ei}=G(E)/E$ και $b_{Ei}=B(E)/E$, για κάθε ένα από τα δοκιμαστικά ($i=1 \dots 5$) για την δεδομένη τιμή της ισχύος ($E = 1500 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$) μπορούν να υπολογιστούν από τους τύπους (6-12):

Για το Q_1 : $r_{E419}=0.38919$, $g_{E419}=-0.0423803$, $b_{E419}=0.481061$

Ομοίως για τα: Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 .

Τώρα, οι πέντε εξισώσεις οι παρόμοιες με την (6-10) μπορούν να γραφούν:

Για το Q_1 :

$$\begin{aligned} & a_E \cdot K \cdot V_{10}(419) + (1 - a_E) \cdot K' \cdot V'(419) = \\ & = r_{E419} \cdot [a_E \cdot K \cdot V_{10}(641.82) + (1 - a_E) \cdot K' \cdot V'(641.82)] + \\ & + g_{E419} \cdot [a_E \cdot K \cdot V_{10}(560.50) + (1 - a_E) \cdot K' \cdot V'(560.50)] + \\ & + b_{E419} \cdot [a_E \cdot K \cdot V_{10}(441.20) + (1 - a_E) \cdot K' \cdot V'(441.20)] \end{aligned}$$

Το οποίο τελικά δίνει:

$$\text{Για το } Q_1: \quad 117.319 - 117.314 a_E = 0$$

Ομοίως, για τα υπόλοιπα δοκιμαστικά:

$$\text{Για το } Q_2: \quad -374.576 + 366.88 a_E = 0$$

$$\text{Για το } Q_3: \quad -1189.66 + 1302.9 a_E = 0$$

$$\text{Για το } Q_4: \quad -891.013 + 1026.33 a_E = 0$$

$$\text{Για το } Q_5: \quad 127.035 - 129.083 a_E = 0$$

Υψώνοντας το αριστερό μέλος των τελευταίων πέντε εξισώσεων στο τετράγωνο και εν συνεχεία αθροίζοντάς τα όλα μαζί, μια νέα συνάρτηση $f(a_E)$ προκύπτει:

$$f(a_E) = 2.3794 \times 10^6 - 5.26415 \times 10^6 a_E + 2.91595 \times 10^6 a_E^2$$

Αναζητώντας εκείνη την τιμή του a_E που κάνει την συνάρτηση αυτή να παίρνει την ελάχιστη τιμή $f(a_E)$:

$$df(a_E)/da_E = 0 \text{ το οποίο δίνει } a_E = 0.902649$$

για τιμή της ισχύος $E = 1500 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τον υπολογισμό των τιμών του a_E για πολλές τιμές της ισχύος E . Οι τιμές του συντελεστή a_E που ευρέθηκαν, παρουσιάζονται στον πίνακα 6-2.

Πίνακας 6-2. Οι τιμές του συντελεστή a_E που ευρέθηκαν με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, για διάφορες τιμές της ισχύος (E) σε μονάδες ($\times 10^{-5} \text{ W/m}^2$).

E	a_E	E	a_E	E	a_E
0.300000	0.748591	11.9432	0.836467	475.468	0.933309
0.377678	0.747836	15.0356	0.843307	598.579	0.938557
0.475468	0.749197	18.9287	0.850048	753.566	0.943731
0.598579	0.752174	23.8298	0.856682	948.683	0.948836
0.753566	0.756376	30.0000	0.863208	1194.32	0.953875
0.948683	0.761494	37.7678	0.869622	1503.56	0.958854
1.19432	0.767291	47.5468	0.875925	1892.87	0.963777
1.50356	0.77358	59.8579	0.882118	2382.98	0.968647
1.89287	0.780216	75.3566	0.888202	3000.00	0.97347
2.38298	0.787086	94.8683	0.894179	3776.78	0.97825
3.00000	0.794104	119.432	0.900053	4754.68	0.982991
3.77678	0.801202	150.356	0.905826	5985.79	0.987699
4.75468	0.808329	189.287	0.911502	7535.66	0.992378
5.98579	0.815446	238.298	0.917084	9486.83	0.997032
7.53566	0.822521	300.000	0.922577		
9.48683	0.829534	377.678	0.927984		

Μια τελική μη γραμμική προσαρμογή των τιμών του a_E που προκύπτουν, γίνεται με την μέθοδο Marquardt και Levenberg. Σαν τύπος προσαρμογής προκρίθηκε ο εξής:

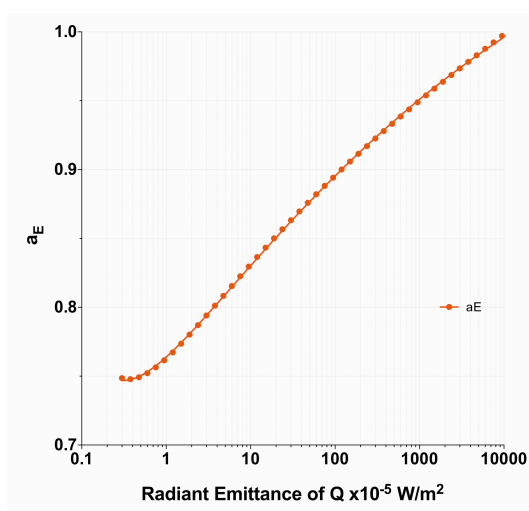
$$a_E = p (\log(E))^2 + q \log(E) + r/E + s \quad (6-13)$$

με τιμές:

$$p = -0.005295, q = 0.08214, r = 0.01170, s = 0.7522$$

όπου η ισχύς είναι σε μονάδες 10^{-5} W/m^2 .

Το σχήμα 6-7 παρουσιάζει τις τιμές του a_E μαζί με τη γραμμή προσαρμογής:



Σχήμα 6-7. Διάγραμμα μεταβολής του a_E συναρτήσει της ισχύος. Η ισχύς είναι ($\times 10^{-5} \text{ W/m}^2$).

6.5. Βελτίωση του μοντέλου

Η βελτίωση του μοντέλου είναι αναγκαία σαν η δεύτερη φάση της μαθηματικής επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων. Σε αυτό το στάδιο θα ληφθούν υπ' όψιν οι λόγοι (S/P) των δοκιμαστικών χρωμο-ερεθισμάτων. Όπως ήδη έχει αναφερθεί στην παράγραφο 6.3 οι βέλτιστες γραμμές προσαρμογής για τις περισσότερες από τις συνιστώσες R, G και B των δοκιμαστικών είναι κεκλιμένες καμπύλες σχήματος ζ-τελικού. Αυτές οι γραμμές σχετίζονται

με τον συντελεστή a_E οποίος πρέπει να έχει τύπο όμοιο με τον (6-11). Έτσι, μια βελτιωμένη μορφή του a_E μπορεί να είναι:

$$a_E = a_{E0} 10^{(k \tanh((\ln(P+n)) + m) - k + kk)} \quad (6-14)$$

όπου: a_{E0} ο αρχικός τύπος, όπως προκύπτει από την εξίσωση (5-13). «P» είναι η φωτοπική λαμπρότητα. Οι παράμετροι «k», «m», «n» και «kk» είναι πραγματικοί αριθμοί εξαρτώμενοι από το κάθε δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα. Αυτός ο τύπος (6-14) εκφράζει την αρχική μορφή του a_E , τροποποιημένου όμως με μια γενική μορφή καμπύλης σχήματος ζ-τελικού. Κάθε μία από τις παραμέτρους «k», «m», «n» και «kk», ελέγχει διαφορετικό χαρακτηριστικό της καμπύλης αυτής. Ύστερα από πολλές δοκιμές βρέθηκε ότι:

Κάθε αλλαγή στην παράμετρο «m» μεταβάλλει τον λόγο:

$$\frac{a_E(P = P_{ph})}{a_E(P = P_{sc})}$$

όπου: $a_E(P=P_{ph})$ είναι η τιμή του a_E , όταν το «P» ισούται με το φωτοπικό όριο για το συγκεκριμένο δοκιμαστικό. Ομοίως, $a_E(P=P_{sc})$ είναι η τιμή του a_E , όταν το «P» ισούται με το σκοτοπικό όριο του συγκεκριμένου δοκιμαστικού. Δεδομένου ότι το a_E πρέπει να είναι κοντά στο ένα στο φωτοπικό όριο και κοντά στο μηδέν στο σκοτοπικό όριο, η τιμή του «m» πρέπει να είναι τέτοια ώστε αυτός ο λόγος να λαμβάνει την μέγιστη τιμή του:

$$\frac{a_E(P = P_{ph})}{a_E(P = P_{sc})} \rightarrow \max \quad (6-15)$$

Κάθε αλλαγή στην παράμετρο «k» αλλάζει το «πλάτος» της καμπύλης, με τέτοιον τρόπο ώστε η ασύμπτωτος στις υψηλές τιμές (φωτοπικές) να μένει σταθερά. Οι ρυθμοί μεταβολής σε σχέση με το «k» των $a_E(P=P_{ph})$ και $a_E(P=P_{sc})$ μεταβάλλονται. Επιλέγεται τέτοια τιμή του «k» ώστε οι δύο ρυθμοί να έχουν την ίδια τιμή:

$$\left. \frac{da_E}{dk} \right|_{P=P_{ph}} = \left. \frac{da_E}{dk} \right|_{P=P_{sc}} \quad (6-16)$$

Εδώ χρησιμοποιείται η προηγουμένως ευρεθείσα τιμή του «m».

Κάθε αλλαγή στην παράμετρο «n» μετακινεί το κέντρο συμμετρίας της καμπύλης κατά μήκος μιας ευθείας παράλληλης των ασυμπτώτων. Επιλέγεται τιμή του «n» τέτοια ώστε:

$$\left. \frac{d^2 a_E}{dn^2} \right|_{P=P_{sc}} = 0 \quad (6-17)$$

Αυτό είναι ένα σημείο καμπής της συναρτήσεως $a_E(n)$. Οι προηγουμένως ευρεθείσες τιμές των «m» και «k» χρησιμοποιούνται εδώ.

Κάθε αλλαγή στην παράμετρο «kk» μετακινεί την καμπύλη κατά μήκος του κάθετου άξονα. Επιλέγεται τιμή του «kk» τέτοια ώστε η μέγιστη τιμή του a_E να ευρίσκεται κοντά στο 1:

$$a_E (P=P_{ph}) = 1 \quad (5-18)$$

Οι προηγουμένως ευρεθείσες τιμές των «m», «k» και «n» χρησιμοποιούνται εδώ.

Όλες αυτές οι τροποποιήσεις έγιναν έχοντας υπ' όψιν ότι:

α) Η καμπύλη $M(P)$ – δηλαδή η μεσοπική λαμπρότητα (M) σαν συνάρτηση της φωτοπικής (P) – θα πρέπει να αναπαρίσταται με μια καμπύλη σχήματος ζ-τελικού σε ένα διπλολογαριθμικό διάγραμμα, παρόμοιο με αυτό του σχήματος 6-1 και του τύπου (6-11). Αυτό το επιχείρημα ενισχύεται από τα ευρήματα άλλων ερευνητών [91]. Όθεν η μορφή του τύπου (6-14).

β) Το εύρος των τιμών του συντελεστή a_E θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι μέγιστο, έχοντας την τιμή σχεδόν μηδέν όταν $P=P_{sc}$, και σχεδόν ένα, όταν $P=P_{ph}$. Όθεν η αναγκαιότητα των τύπων (6-15) και (6-18).

γ) Οι τιμές των παραμέτρων «m» και «n» θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε η συνάρτηση $a_E = a_E(k, m, n, kk)$ να έχει ακρότατο ή σημείο καμπής. Σε αυτή την περίπτωση η συμπεριφορά της θα είναι ιδιαίζουσα. Όθεν η ύπαρξη των τύπων (6-16) και (6-17).

Σε κάθε περίπτωση σαν σκοτοπικό όριο P_{sc} , θεωρείται η καθιερωμένη τιμή [12] 0.001 cd/m^2 :

$$P_{sc} = 0.001 \text{ cd/m}^2. \quad (6-19)$$

Σαν φωτοπικό όριο P_{ph} λαμβάνεται η συνήθως παραδεδεγμένη τιμή [12] 3 cd/m^2 :

$$P_{ph} = 3 \text{ cd/m}^2. \quad (6-20)$$

Στο μοντέλο των Rea κλπ [34] αυτό το φωτοπικό όριο P_{ph} ισούται με 0.6 cd/m^2 . Ως εκ τούτου, όταν οι φωτοπικές λαμπρότητες υπερβαίνουν αυτό το όριο, τότε οι μεσοπικές λαμπρότητες ισούνται με τις φωτοπικές. Στο μοντέλο MOVE [35], αυτό το όριο είναι πάνω

από 10 cd/m². Άρα, ακόμα και σε φωτοπική λαμπρότητα 10 cd/m², οι μεσοπικές λαμπρότητες διαφέρουν από τις φωτοπικές.

Οι θεωρηθείσες τιμές των P_{ph} και P_{sc} είναι ικανοποιητικές, όταν ο λόγος S/P για κάποιο χρωμο-ερεθίσμα είναι μεταξύ 3 και 0.3, δηλαδή για τιμές, που συνήθως απαντώνται σε πηγές οδοφωτισμού. Όταν οι τιμές του S/P είναι έξω από αυτά τα όρια, τότε μια επιπλέον βελτίωση του μοντέλου απαιτείται, για μεγαλύτερη ακρίβεια. Αυτή η βελτίωση θα πρέπει να λαμβάνει υπ' όψιν την εξάρτηση των P_{ph} και P_{sc} από τον λόγο (S/P). Εν τούτοις, για λόγους απλότητας, αυτή η βελτίωση δεν προτείνεται σε αυτό το μοντέλο.

Ο προσδιορισμός των τεσσάρων παραμέτρων «k», «m», «n» και «kk» έγινε για τα μονοχρωματικά χρωμο-ερεθίσματα 520nm, 540nm, 550nm, 560nm, 570nm και 580nm, τα οποία καλύπτουν ένα εύρος λόγων S/P από 3.055 έως 0.347. Οι τιμές των παραμέτρων ευρέθηκαν με την ανωτέρω εκτεθείσα μεθοδολογία. Αυτές οι τιμές φαίνονται στον πίνακα 6-3.

Πίνακας 6-3. Οι τιμές των τεσσάρων παραμέτρων, που χρησιμοποιήθηκαν για την βελτίωση του a_E, για κάποια μονοχρωματικά χρωμο-ερεθίσματα.

λ (nm)	S/P	E/P	k	m	n	kk
520	3.055	461	1.686	2.905	0.116	0.01969
540	1.682	365	1.687	2.905	0.116	0.02197
550	1.207	354	1.687	2.905	0.116	0.02227
560	0.821	352	1.687	2.905	0.116	0.02233
570	0.541	367	1.687	2.905	0.116	0.02192
580	0.347	404	1.687	2.905	0.116	0.02097

Στον πίνακα 6-3 παρατηρεί κανείς ότι οι τιμές των «k», «m» και «n» παραμένουν σχεδόν σταθερές.

$$k = 1.687, m = 2.90 \text{ και } n = 0.116. \quad (5-21)$$

Αυτό συμβαίνει γιατί θεωρήθηκε ότι οι τιμές του φωτοπικού ορίου (P_{ph}) είναι σταθερές (P_{ph} = 3 cd/m²). Η απομένουσα παράμετρος «kk» αλλάζει λίγο σαν συναρτήσει του λόγου (S/P),

αλλά δεδομένου ότι αυτή η αλλαγή είναι πολύ μικρή, θα θεωρηθεί και αυτό σταθερό μεταξύ των συγκεκριμένων ορίων του λόγου S/P:

$$k_k = 0.022. \quad (5-22)$$

Όπως έχει προλεχθεί, μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί, αν το P_{ph} θεωρηθεί σαν συνάρτηση του (S/P). Εν τούτοις, αυτή η τροποποίηση δεν θα βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια των τιμών της μεσοπικής λαμπρότητας, για το εύρος του λόγου S/P μεταξύ 3 και 0.3. Αντίθετα, θα κάνει τους υπολογισμούς πιο πολύπλοκους.

6.6. Αξιολόγηση του μοντέλου

6.6.1. Σύγκριση με άλλα μοντέλα

Για τον σκοπό της αξιολόγησης της ακρίβειας του παρόντος μοντέλου, θα υπολογισθούν κάποιες τιμές μεσοπικής λαμπρότητας για μερικούς λαμπτήρες οδοφωτισμού, όταν οι αντίστοιχες τιμές της φωτοπικής λαμπρότητας είναι δεδομένες.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται η ολοκληρωμένη μορφή του τύπου (6-9):

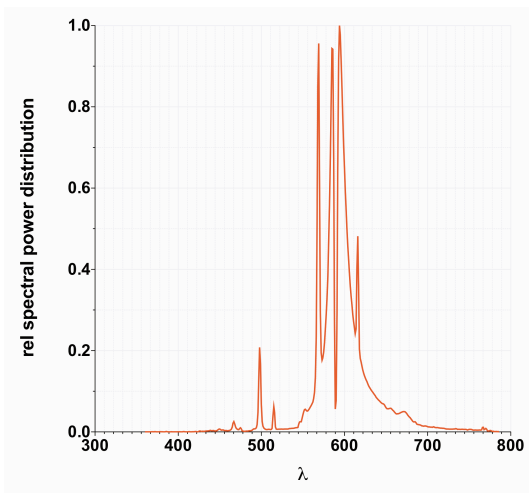
$$M = a_E P + (1 - a_E) S \quad (6-23)$$

Ή καλλίτερα:

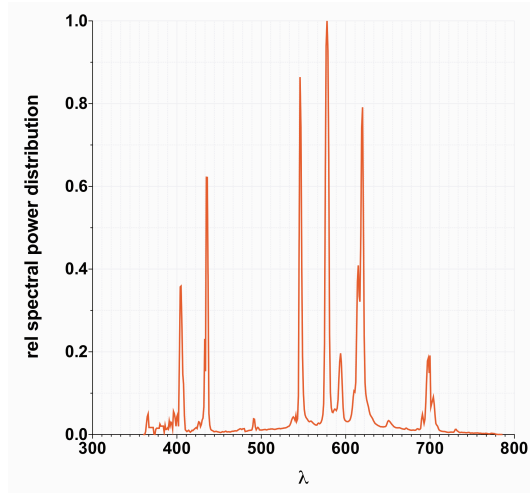
$$M = a_E P + (1 - a_E) (S/P) P \quad (6-24)$$

όπου: M, P, S η μεσοπική, η φωτοπική και η σκοτοπική λαμπρότητες.

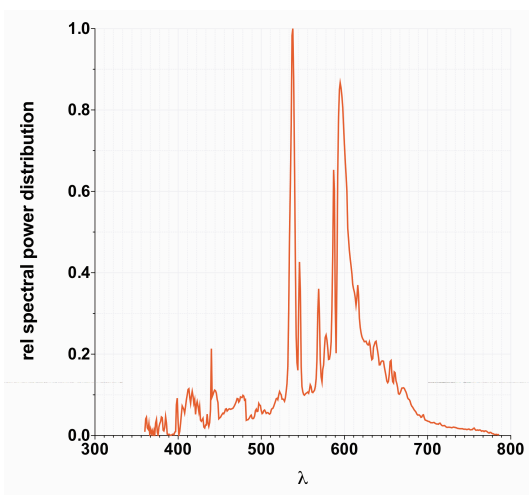
Οι τιμές του a_E υπολογίζονται από τους τύπους (6-13) και (6-14), χρησιμοποιώντας τις τιμές (6-21) και (6-22), όπου στην θέση του «E» – την ισχύ, η έκφραση «(E/P) P» μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά από το μοντέλο των Rea κλπ [34] και MOVE [35]. Οι λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται είναι: Νατρίου Υψηλής Πιέσεως («SON 250», S/P=0.433, E/P=545), Υδραργύρου Υψηλής Πιέσεως («Hg 400», S/P=0.868, E/P=704), Μεταλλικών Αλογονιδίων («MH 250», S/P=1.082, E/P=652 και «MH 400», S/P=1.490, E/P=710), το Ισοενεργειακό Λευκό (S/P=2.072, E/P=2167) και το CIE D65 (S/P=2.241, E/P=1106). Στο σχήμα 6-8 παρουσιάζονται οι φασματικές κατανομές της ισχύος αυτών των φωτεινών πηγών.



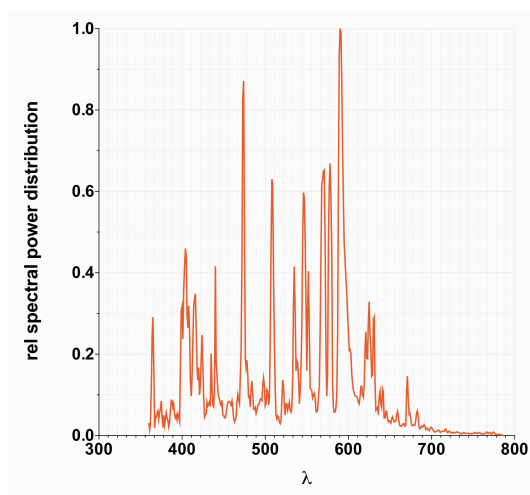
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 6-8. Φασματικές κατανομές ισχύος των λαμπτήρων (α) Νατρίου υψηλής πίεσης SON 250, (β) Υδραργύρου υψηλής πίεσης Hg 400, (γ) Μεταλλικών αλογονιδίων MH250, (δ) Μεταλλικών αλογονιδίων MH400.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6-4. Υπάρχουν πολύ μικρές διαφορές μεταξύ των μοντέλων. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους:

α) Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για αυτό το μοντέλο είναι τελείως διαφορετική από τις μεθόδους των δύο άλλων. Στο παρόν μοντέλο είναι χρωματομετρική, ενώ στα άλλα είναι κυρίως μέτρηση του χρόνου αντίδρασης. Σύμφωνα με την CIE, διαφορετικές μέθοδοι δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα.

β) Οι χρωματικές ταυτίσεις γίνονται σε οπτικό πεδίο 10° με σκοτεινό υπόβαθρο. Στα δύο άλλα μοντέλα το υπόβαθρο δεν ήταν σκοτεινό. Η επιρροή των ραβδίων λοιπόν, είναι διαφορετική.

Πίνακας 6-4. Σύγκριση των τιμών της μεσοπικής λαμπρότητας (cd/m^2) από το παρόν μοντέλο, με τις αντίστοιχες τιμές από τα μοντέλα των Rea κλπ [34] και MOVE [35], για λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσεως (SON 250), υδραργύρου υψηλής πίεσεως (Hg 400), μεταλλικών αλογονιδίων (MH 250 και MH 400), το ισοενεργειακό λευκό (EEW) και το CIE D65. Με P συμβολίζεται η φωτοπική λαμπρότητα σε cd/m^2 .

Lamp (S/P)	P	0.01	0.03	0.1	0.3	1	3	10
SON250 (0.433)	Παρόν	0.006	0.019	0.076	0.272	0.982	3	10
	Rea	0.004	0.014	0.055	0.236	1	3	10
	MOVE	0.005	0.016	0.074	0.251	0.906	2.858	9.908
Hg400 (0.868)	Παρόν	0.009	0.027	0.094	0.294	0.996	3	10
	Rea	0.009	0.027	0.091	0.289	1	3	10
	MOVE	0.009	0.027	0.094	0.288	0.976	2.964	9.983
MH250 (1.082)	Παρόν	0.011	0.032	0.104	0.304	1.003	3	10
	Rea	0.011	0.032	0.106	0.308	1	3	10
	MOVE	0.011	0.031	0.102	0.304	1.008	3.012	10.006
MH400 (1.490)	Παρόν	0.014	0.040	0.121	0.325	1.018	3	10
	Rea	0.015	0.043	0.130	0.336	1	3	10
	MOVE	0.014	0.038	0.120	0.339	1.043	3.112	10.056
EEW (2.072)	Παρόν	0.018	0.052	0.146	0.352	1.029	3	10
	Rea	0.020	0.056	0.158	0.366	1	3	10
	MOVE	0.018	0.048	0.139	0.380	1.163	3.247	10.121
CIE D65 (2.241)	Παρόν	0.019	0.054	0.151	0.355	1.020	3	10
	Rea	0.022	0.060	0.165	0.373	1	3	10
	MOVE	0.019	0.050	0.145	0.391	1.180	3.272	10.135

6.6.2. Εύρος χρήσεως του μοντέλου

Το παρόν μοντέλο φασματικής ευαισθησίας του οφθαλμού στην μεσοπική όραση είναι βασισμένο στις ίδιες παραδοχές, όπως και το μοντέλο των Rea κλπ (§ 2.2.4). Αυτό είναι

αποδεκτό γιατί και τα δύο μοντέλα βασίζονται σε προσθετικές πειραματικές μεθόδους. Το παρόν μοντέλο βασίζεται στον τύπο (6-3), ο οποίος είναι το μεσοπικό ανάλογο των αντιστοιχών φωτοπικού και σκοτοπικού τύπων. Αυτός ο τύπος βέβαια υποκρύπτει προσθετικότητα στην μεσοπική περιοχή. Γενικά δεχόμαστε, ότι σε υψηλές ισχύς η προσθετικότητα προσεγγιστικά διατηρείται.

Σαν φωτοπικό όριο της ισχύος για τους υπολογισμούς έχει θεωρηθεί η τιμή $10000 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$. Αυτή αντιστοιχεί σε φωτοπική λαμπρότητα πάνω από την τιμή 3 cd/m^2 για μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος από 455nm έως 650nm. Αυτό το διάστημα είναι μεγαλύτερο από το διάστημα από 520nm έως 580nm, το οποίο καλύπτει ένα εύρος τιμών του λόγου S/P από 3.055 έως 0.347.

Σαν κατώτερο όριο εφαρμογής του μοντέλου έχει ληφθεί η ισχύς $0.4 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$. Σε αυτή την ισχύ ο συντελεστής a_{E0} τείνει να γίνει σταθερός (σχήμα 6-7). Αυτή η τιμή αντιστοιχεί σε φωτοπική λαμπρότητα 0.0011 cd/m^2 για την μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος 555nm.

Άρα το παρόν μοντέλο δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα σε όλη την μεσοπική περιοχή οράσεως.

7. Μοντέλο για τον υπολογισμό της μεσοπικής χρωματικότητας, από τριχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης

7.1. Γενικά περί μετατροπής ενός τυχαίου χρωμοερεθίσματος από 4- χρωματικό σε 3-χρωματικό

Έστω το δοκιμαστικό χρωμοερέθισμα \mathbf{Q} και το τετραχρωματικό σύστημα μονοχρωματικών πρωτευόντων (\mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{C} , \mathbf{B}). Αν E_i είναι η ισχύς του i χρωμοερεθίσματος, τότε στην τετραχρωματική ταύτιση ισχύει:

$$\mathbf{Q} = r^{(4)}(\lambda_Q) \cdot \mathbf{R} + g^{(4)}(\lambda_Q) \cdot \mathbf{G} + c^{(4)}(\lambda_Q) \cdot \mathbf{C} + b^{(4)}(\lambda_Q) \cdot \mathbf{B} \quad (7-1)$$

όπου: $r^{(4)}(\lambda_Q) \equiv E_R / E_Q$, $g^{(4)}(\lambda_Q) \equiv E_G / E_Q$, $c^{(4)}(\lambda_Q) \equiv E_C / E_Q$, $b^{(4)}(\lambda_Q) \equiv E_B / E_Q$. Αυτό ισχύει για οποιαδήποτε ισχύ E_Q .

Η αντίστοιχη τριχρωματική ταύτιση στο σύστημα των μονοχρωματικών πρωτευόντων (\mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B}) στην ισχύ E_Q είναι:

$$\mathbf{Q} = r_E(\lambda_Q) \cdot \mathbf{R} + g_E(\lambda_Q) \cdot \mathbf{G} + b_E(\lambda_Q) \cdot \mathbf{B} \quad (7-2)$$

όπου: $r_E(\lambda_Q) \equiv E_R / E_Q$, $g_E(\lambda_Q) \equiv E_G / E_Q$, $b_E(\lambda_Q) \equiv E_B / E_Q$.

Σε αυτό το επίπεδο ισχύος $E_C = E_Q$ αναλύεται το \mathbf{C} στα υπόλοιπα τρία πρωτεύοντα:

$$\mathbf{C} = r_E(\lambda_C) \cdot \mathbf{R} + g_E(\lambda_C) \cdot \mathbf{G} + b_E(\lambda_C) \cdot \mathbf{B} \quad (7-3)$$

όπου: $r_E(\lambda_C) \equiv E_R / E_Q$, $g_E(\lambda_C) \equiv E_G / E_Q$, $b_E(\lambda_C) \equiv E_B / E_Q$.

Οι συντεταγμένες αυτές βρίσκονται είτε πειραματικά, είτε από συναρτήσεις, οι οποίες έχουν προσδιοριστεί από πειραματικά αποτελέσματα.

Με αντικατάσταση της (6-3) στην (6-1) και εξίσωση με την (6-2) λαμβάνουμε:

$$\begin{aligned} r_E(\lambda_Q) &= r^{(4)}(\lambda_Q) + c^{(4)}(\lambda_Q) \cdot r_E(\lambda_C), \\ g_E(\lambda_Q) &= g^{(4)}(\lambda_Q) + c^{(4)}(\lambda_Q) \cdot g_E(\lambda_C) \\ b_E(\lambda_Q) &= b^{(4)}(\lambda_Q) + c^{(4)}(\lambda_Q) \cdot b_E(\lambda_C) \end{aligned} \quad (7-4)$$

Αν απαιτείται και το Q αλλά και ο συνδυασμός των \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{C} , \mathbf{B} να έχουν την ίδια σκοτοπική λαμπρότητα, τότε, υπάρχει μια και μόνο μία λύση για τα $r^{(4)}$, $g^{(4)}$, $c^{(4)}$ και $b^{(4)}$, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο περί του τετραχρωματικού μοντέλου [73].

$$r^{(4)}(\lambda_Q) = r_E(\lambda_Q) - c^{(4)}(\lambda_Q) \cdot r_E(\lambda_C)$$

$$g^{(4)}(\lambda_Q) = g_E(\lambda_Q) - c^{(4)}(\lambda_Q) \cdot g_E(\lambda_C) \quad (7-5) \quad \text{και}$$

$$b^{(4)}(\lambda_Q) = b_E(\lambda_Q) - c^{(4)}(\lambda_Q) \cdot g_E(\lambda_C)$$

$$c^{(4)}(\lambda_Q) = \frac{r(\lambda_Q) \cdot S_R + g(\lambda_Q) \cdot S_G + b(\lambda_Q) \cdot S_B - S_Q}{r(\lambda_C) \cdot S_R + g(\lambda_C) \cdot S_G + b(\lambda_C) \cdot S_B - S_C} \quad (7-6)$$

όπου

$$S_Q = \int QV'(\lambda) d\lambda, \quad S_C = \int CV'(\lambda) d\lambda,$$

$$S_R = \int RV'(\lambda) d\lambda, \quad S_G = \int GV'(\lambda) d\lambda, \quad S_B = \int BV'(\lambda) d\lambda \quad (7-7)$$

Οι εξισώσεις (7-5) και (7-6) ισχύουν και στα φωτοπικά και στα μεσοπικά επίπεδα προσαρμογής του οφθαλμού. Το τετραχρωματικό σύστημα διατηρεί τους νόμους του Grassmann της αναλογικότητας και της υπέρθεσης [73]. Αυτές οι εξισώσεις έχουν εξαχθεί, θεωρώντας το \mathbf{Q} σαν μονοχρωματικό. Εν τούτοις όμως, επειδή ο τετραχρωματικός χώρος είναι γραμμικός, το \mathbf{Q} μπορεί να είναι οποιοδήποτε χρωμο-ερέθισμα, μονοχρωματικό ή πολυχρωματικό, πραγματικό ή φανταστικό.

Αν ο επιδιωκόμενος σκοπός είναι να βρεθούν οι τριχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης $r_E(\lambda_Q)$, $g_E(\lambda_Q)$, $b_E(\lambda_Q)$ στην μεσοπική όραση για ένα συγκεκριμένο σύστημα πρωτεύοντων \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} για κάθε ισχύ E_Q , τότε πρέπει πρώτα να προσδιορισθούν οι συντελεστές $r_E(\lambda_C)$, $g_E(\lambda_C)$, $b_E(\lambda_C)$.

Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να προσδιορισθούν οι μεσοπικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης $x_E(\lambda_Q)$, $y_E(\lambda_Q)$, $z_E(\lambda_Q)$. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι να μετασχηματισθούν οι $r_E(\lambda_C)$, $g_E(\lambda_C)$, $b_E(\lambda_C)$ σε $x_E(\lambda_Q)$, $y_E(\lambda_Q)$, $z_E(\lambda_Q)$.

Η διαδικασία για τον προσδιορισμό των τριχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης $r_E(\lambda_Q)$, $g_E(\lambda_Q)$, $b_E(\lambda_Q)$ στην μεσοπική όραση, είναι η εξής:

1) Επιλέγονται τρία μονοχρωματικά χρωμο-ερεθίσματα \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} σαν πρωτεύοντα. Ένα τέταρτο μονοχρωματικό χρωμο-ερέθισμα \mathbf{C} επιλέγεται σαν δοκιμαστικό. Πραγματοποιούνται

τριχρωματικές ταυτίσεις του **C** στην μεσοπική περιοχή. Οι τιμές των $r_E(\lambda_C)$, $g_E(\lambda_C)$, $b_E(\lambda_C)$ μετρώνται για διάφορες τιμές της πυκνότητας εκπεμπομένης ακτινοβολίας (W/m^2) του δοκιμαστικού **C**.

2) Υπολογίζονται οι τετρα-χρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης $r^{(4)}(\lambda)$, $g^{(4)}(\lambda)$, $c^{(4)}(\lambda)$, $b^{(4)}(\lambda)$ για τα τέσσερα χρωμο-ερεθίσματα **R**, **G**, **C**, **B** από τις εξισώσεις (7-5) και (7-6). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αυτές οι εξισώσεις ισχύουν και στην φωτοπική και στην μεσοπική περιοχή. Ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι φωτοπικές τιμές $r(\lambda_C)$, $g(\lambda_C)$, $b(\lambda_C)$ στους υπολογισμούς. Εννοείται, ότι αυτές οι φωτοπικές τιμές μπορούν να ευρεθούν πολύ εύκολα.

3) Οι μεσοπικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης $r_E(\lambda)$, $g_E(\lambda)$, $b_E(\lambda)$ υπολογίζονται από τις εξισώσεις (7-4) χρησιμοποιώντας τις πειραματικές τιμές, που βρίσκονται στο βήμα (1).

Και τα τέσσερα τα χρωμο-ερεθίσματα **R**, **G**, **C**, **B** είναι μονοχρωματικά. Έχουν επιλεγεί έτσι γιατί οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης της CIE 1964, είναι ορισμένες από μονοχρωματικά χρωμο-ερεθίσματα. Εν τούτοις, τίποτα δεν μας εμποδίζει να χρησιμοποιήσουμε πολυχρωματικά χρωμο-ερεθίσματα στις εξισώσεις, αντί για μονοχρωματικά. Οι εξισώσεις θα ισχύουν εξίσου.

7.2. Πειράματα τριχρωματικής ταύτισης με ανθρώπινα υποκείμενα στην μεσοπική όραση με στόχο να προσδιορισθούν οι μεσοπικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης

Ο σκοπός των πειραμάτων είναι να προσδιορισθούν οι συντελεστές $r_E(\lambda_C)$, $g_E(\lambda_C)$, $b_E(\lambda_C)$, οι οποίοι εμφανίζονται στις εξισώσεις (7-4).

Σε αυτή την σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν σαν πρωτεύοντα τα μονοχρωματικά χρωμο-ερεθίσματα **R**, **G**, **B** ($\lambda_R=621.00nm$, $\lambda_G=540.90nm$ και $\lambda_B=411.95nm$). Τριχρωματικές ταυτίσεις έγιναν με δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα το **C** ($\lambda_C=500.00nm$) σε διάφορα επίπεδα ισχύος, όλα αντιστοιχούντα στην μεσοπική περιοχή οράσεως. Το συγκεκριμένο δοκιμαστικό επιλέχτηκε γιατί ο οφθαλμός είναι αρκετά ευαίσθητος σε αυτό το μήκος κύματος. Τα συγκεκριμένα πρωτεύοντα επιλέχτηκαν τέτοια ώστε τα αντίστοιχα κλάσματα ισχύος (E_R/E_C , E_G/E_C , E_B/E_C) στην φωτοπική όραση να έχουν παραπλήσιες τιμές. Με αυτόν τον τρόπο ο οφθαλμός κάνει τις πιο ακριβείς ταυτίσεις. Με την συγκεκριμένη επιλογή τα κλάσματα αυτά

στα φωτοπικά επίπεδα έχουν τιμές $E_R/E_C=-0.33$, $E_G/E_C=0.61$, $E_B/E_C=0.41$. Οι διαφορές τους δεν είναι μεγάλες.

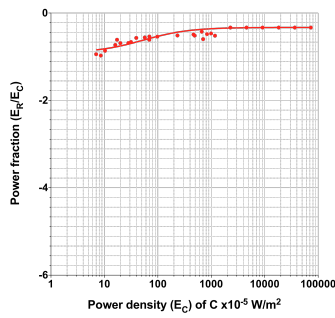
Τα πειράματα έγιναν με τον εξοπλισμό και την μεθοδολογία, που έχει περιγραφεί ανωτέρω. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ένα ανθρώπινο υποκείμενο (άντρας) με φυσιολογική όραση, αφού έγιναν πρώτα προκαταρκτικά πειράματα, για να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του στις ταυτίσεις. Και σε αυτή την σειρά πειραμάτων, το οπτικό πεδίο ήταν 10° και το υπόβαθρο σκοτεινό. Το υποκείμενο προσαρμόστηκε στο σκοτάδι για 15 περίπου λεπτά. Έκανε τριχρωματικές ταυτίσεις ατενίζοντας το κέντρο του οπτικού πεδίου, αλλά εστιάζοντας την προσοχή στην περιφέρεια του οπτικού του πεδίου. Αυτό, για να αποφευχθεί η κηλίδα του Maxwell. Έγιναν 22 χρωματικές ταυτίσεις συνολικά σε διάφορα επίπεδα πυκνότητας εκπεμπομένης ακτινοβολίας. Σε κάθε ταύτιση γινόταν μέτρηση της πυκνότητας εκπεμπομένης ακτινοβολίας, τόσο του δοκιμαστικού, όσο και των πρωτεύοντων. Σε κάθε επίπεδο ισχύος κάθε χρωμοερέθισμα μετράτο πέντε φορές και στο τέλος υπολογίζετο ο μέσος όρος, οποίος ελήφθη υπ' όψιν στους υπολογισμούς.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στο σχήμα 7-1. Σε αυτό το σχήμα συμπεριλαμβάνονται για σύγκριση και οι φωτοπικές τιμές (CIE 1964). Οι καμπύλες που φαίνονται στο σχήμα 7-1 είναι οι μή-γραμμικές προσαρμογές των πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι αρνητικές τιμές του R έχουν την έννοια, ότι το πρωτεύον αυτό πρέπει να προστεθεί στο δοκιμαστικό C για να επιτευχθεί η ταύτιση.

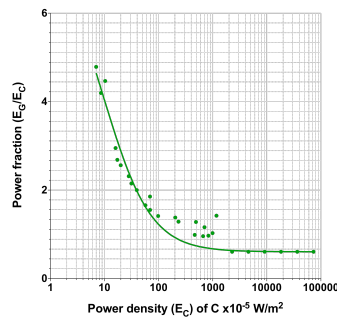
$$\text{Για το R: } E_R/E_C = -0.333 - \frac{31.14}{E_C + 53.54}$$

$$\text{Για το G: } E_G/E_C = 0.6060 + \frac{67.99}{E_C + 9.834} \quad (7-8)$$

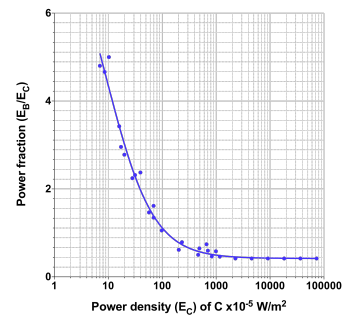
$$\text{Για το B: } E_B/E_C = 0.4200 + \frac{76.22}{E_C + 9.348}$$



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 7-1. Οι τιμές των κλασμάτων ισχύος (E_R/E_C , E_G/E_C , E_B/E_C) των τριών πρωτεύοντων **R**, **G**, **B** ($\lambda_R=621.00nm$, $\lambda_G=540.90nm$ και $\lambda_B=411.95nm$) για την ταύτιση του δοκιμαστικού **C** = 500 nm. (α) για R, (β) για G, (γ) για B. Τα σημεία που σχηματίζουν οριζόντια ευθεία, είναι οι φωτοπικές τιμές, όπως ευρίσκονται από τον τυπικό παρατηρητή CIE 1964.

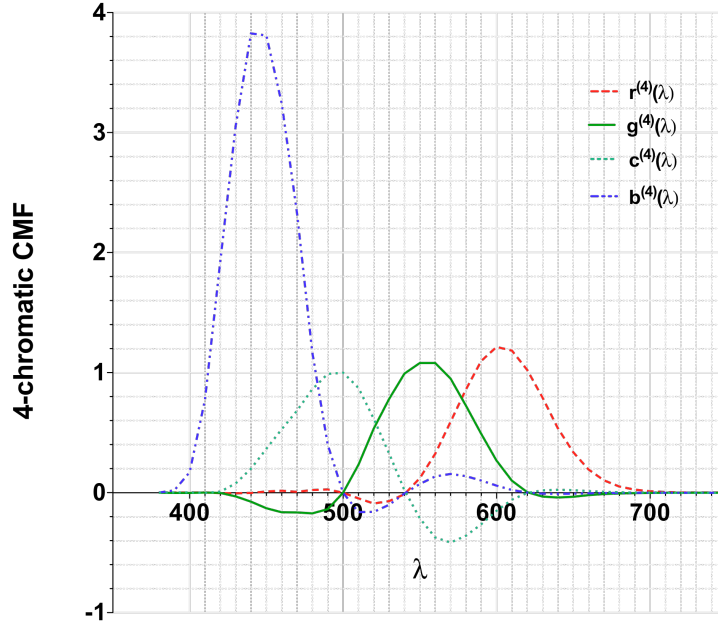
Όπως εύκολα διακρίνεται στο σχήμα 7-1, οι πειραματικές τιμές δεν διαφέρουν αισθητά (στο φωτοπικό όριο βεβαίως) από τις τιμές, που δίνει ο τυπικός παρατηρητής. Συνεπώς, αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν ότι έχουν προκύψει από έναν παρατηρητή ισοδύναμο με τον τυπικό παρατηρητή.

7.3. Υπολογισμός των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης

Οι τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης μπορούν να υπολογισθούν εύκολα για τα πρωτεύοντα **R**, **G**, **C**, **B** ($\lambda_R=621.00nm$, $\lambda_G=540.90nm$, $\lambda_C=500.00nm$ και $\lambda_B=411.95nm$) από τις εξισώσεις 7-5 και 7-6. Βέβαια, αντί για τις μεσοπικές $r_E(\lambda)$, $g_E(\lambda)$, $b_E(\lambda)$ θα χρησιμοποιηθούν οι φωτοπικές $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$. Στον πίνακα 7-1 παρουσιάζονται οι τιμές των τριχρωματικών και των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης. Διάγραμμα των τετραχρωματικών συναρτήσεων φαίνεται στο σχήμα 7-2.

Πίνακας 7-1. Οι τιμές των τριχρωματικών $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ και τετραχρωματικών $r^{(4)}(\lambda)$, $g^{(4)}(\lambda)$, $c^{(4)}(\lambda)$, $b^{(4)}(\lambda)$ συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης για τα πρωτεύοντα **R**, **G**, **C**, **B** ($\lambda_R=621.00nm$, $\lambda_G=540.90nm$, $\lambda_C=500.00nm$ και $\lambda_B=411.95nm$).

λ (nm)	$r(\lambda)$	$g(\lambda)$	$b(\lambda)$	$r^{(4)}(\lambda)$	$g^{(4)}(\lambda)$	$c^{(4)}(\lambda)$	$b^{(4)}(\lambda)$
380	0.000	0.000	0.001	0.000	-0.001	0.001	0.001
390	0.000	0.000	0.021	0.001	-0.001	0.002	0.020
400	0.001	0.000	0.171	0.002	-0.002	0.002	0.170
410	0.002	-0.001	0.774	0.001	0.001	-0.002	0.775
420	-0.006	0.002	1.933	-0.004	-0.003	0.008	1.930
430	-0.030	0.016	3.087	-0.005	-0.031	0.077	3.055
440	-0.068	0.046	3.909	-0.001	-0.075	0.200	3.825
450	-0.112	0.091	3.963	0.010	-0.130	0.366	3.810
460	-0.160	0.157	3.465	0.016	-0.164	0.528	3.244
470	-0.221	0.250	2.613	0.007	-0.164	0.683	2.326
480	-0.265	0.351	1.526	0.022	-0.172	0.863	1.164
490	-0.303	0.463	0.814	0.027	-0.137	0.990	0.399
500	-0.333	0.606	0.419	0.000	0.000	1.000	0.000
510	-0.338	0.762	0.203	-0.047	0.233	0.873	-0.162
520	-0.296	0.907	0.098	-0.091	0.534	0.615	-0.160
530	-0.179	0.979	0.036	-0.070	0.781	0.327	-0.101
540	-0.019	1.005	0.002	-0.012	0.992	0.021	-0.007
550	0.191	0.952	-0.016	0.120	1.081	-0.213	0.073
560	0.447	0.855	-0.022	0.323	1.081	-0.372	0.134
570	0.727	0.699	-0.018	0.589	0.951	-0.415	0.156
580	0.978	0.509	-0.013	0.858	0.727	-0.359	0.137
590	1.185	0.331	-0.008	1.098	0.490	-0.263	0.102
600	1.264	0.176	-0.004	1.214	0.267	-0.150	0.059
610	1.203	0.065	-0.002	1.184	0.100	-0.058	0.023
620	1.024	0.002	0.000	1.023	0.004	-0.002	0.001
630	0.785	-0.021	0.001	0.791	-0.032	0.019	-0.007
640	0.528	-0.025	0.001	0.536	-0.040	0.024	-0.009
650	0.331	-0.021	0.001	0.338	-0.033	0.020	-0.008
660	0.189	-0.013	0.000	0.193	-0.021	0.013	-0.005
670	0.101	-0.007	0.000	0.103	-0.012	0.007	-0.003
680	0.051	-0.004	0.000	0.052	-0.006	0.004	-0.001
690	0.025	-0.002	0.000	0.025	-0.003	0.002	-0.001
700	0.012	-0.001	0.000	0.012	-0.001	0.001	0.000
710	0.006	0.000	0.000	0.006	-0.001	0.000	0.000
720	0.003	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
730	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000



Σχήμα 7-2. Διάγραμμα των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης για τα πρωτεύοντα **R**, **G**, **C**, **B** ($\lambda_R=621.00nm$, $\lambda_G=540.90nm$, $\lambda_C=500.00nm$ και $\lambda_B=411.95nm$).

Από τις εξισώσεις 7-4 είναι τώρα δυνατόν να παραχθούν οι τριχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης για κάθε επίπεδο ισχύος.

7.4. Αλλαγή πρωτευόντων σε XYZ σε κάποια ισχύ

Είναι δυνατόν κατά προσέγγιση και καταχρηστικά, να προσδιοριστούν οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης ενός νέου συστήματος πρωτευόντων σε κάποια ισχύ E, αν είναι γνωστές οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης σε αυτή την ισχύ, με γραμμικό μετασχηματισμό.

Έστω $\mathbf{RGB}|_E$ το τρέχον σύστημα και $\mathbf{KMN}|_E$ το νέο σύστημα. Ο μετασχηματισμός γίνεται με τις σχέσεις:

$$k_E(\lambda) = r_E(\lambda) \cdot k_E(\lambda_R) + g_E(\lambda) \cdot k_E(\lambda_G) + b_E(\lambda) \cdot k_E(\lambda_B)$$

$$m_E(\lambda) = r_E(\lambda) \cdot m_E(\lambda_R) + g_E(\lambda) \cdot m_E(\lambda_G) + b_E(\lambda) \cdot m_E(\lambda_B) \quad (7-9)$$

$$n_E(\lambda) = r_E(\lambda) \cdot n_E(\lambda_R) + g_E(\lambda) \cdot n_E(\lambda_G) + b_E(\lambda) \cdot n_E(\lambda_B)$$

όπου $k_E(\lambda_R)$, $k_E(\lambda_G)$ κλπ. οι τιμές των παλαιών πρωτευόντων στο νέο σύστημα. Αυτά μπορούν να προσδιορισθούν πειραματικά.

Ειδικά στην περίπτωση που το νέο σύστημα είναι το $\mathbf{XYZ}|_E$ τα πράγματα δεν είναι απλά. Δεν μπορούμε να κάνουμε γραμμικό μετασχηματισμό από ένα σύστημα $\mathbf{RGB}|_E$ στο CIE XYZ 1964, θεωρώντας τα X, Y, Z σημεία σταθερά. Κάτι τέτοιο οδηγεί σε συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης με αρνητικές τιμές σε κάποια μήκη κύματος του φάσματος. Αυτό αντιβαίνει μια από τις βασικές αρχές κατασκευής του συστήματος CIE XYZ 1964.

Για να έχουμε ένα συνεπές $\mathbf{XYZ}|_E$ σύστημα, θα πρέπει να ισχύουν και για αυτό, οι προϋποθέσεις που έχουν τεθεί για το αντίστοιχο της φωτοπικής οράσεως, δηλαδή για το CIE XYZ 1964. Αυτές οι προϋποθέσεις είναι οι εξής:

(α) Η συνάρτηση χρωματικής ταύτισης $y(\lambda)$ πρέπει να ταυτίζεται με την καμπύλη φασματικής ευαισθησίας του οφθαλμού. Για την φωτοπική όραση είναι η $V_{10}(\lambda)$. Για την μεσοπική όραση πρέπει να είναι η αντίστοιχη μεσοπική καμπύλη αυτής της ισχύος.

(β) Και οι τρεις συναρτήσεις πρέπει να είναι μη αρνητικές.

(γ) Τα ολοκληρώματά τους πρέπει να είναι ίσα, ώστε το ισοενεργειακό λευκό να έχει ίσες τις tristimulus τιμές του. Αυτό όμως με κάποιες προϋποθέσεις.

Για έναν τέτοιο μετασχηματισμό οι παραπάνω σχέσεις (7-9) γράφονται:

$$x_E(\lambda) = r_E(\lambda) \cdot x_E(\lambda_R) + g_E(\lambda) \cdot x_E(\lambda_G) + b_E(\lambda) \cdot x_E(\lambda_B)$$

$$y_E(\lambda) = r_E(\lambda) \cdot y_E(\lambda_R) + g_E(\lambda) \cdot y_E(\lambda_G) + b_E(\lambda) \cdot y_E(\lambda_B) \quad (7-10)$$

$$z_E(\lambda) = r_E(\lambda) \cdot z_E(\lambda_R) + g_E(\lambda) \cdot z_E(\lambda_G) + b_E(\lambda) \cdot z_E(\lambda_B)$$

οι τιμές $x_E(\lambda_R)$, $x_E(\lambda_G)$ κλπ. οι τιμές των παλαιών πρωτευόντων στο $\mathbf{XYZ}|_E$ σύστημα δεν μπορούν να προσδιορισθούν πειραματικά. Μπορούν όμως να προσεγγισθούν με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

7.5. Ανάπτυξη του τριχρωματικού μοντέλου μεσοπικής χρωματομετρίας

Για την ανάπτυξη του μεσοπικού μοντέλου πρέπει να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

(α) Οι μεσοπικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης $x_E(\lambda)$, $y_E(\lambda)$, $z_E(\lambda)$ στην φωτοπική περιοχή οράσεως πρέπει να ταυτίζονται με τις τυποποιημένες $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ (CIE 1964).

(β) Η $y_E(\lambda)$ εφ' όσον ταυτίζεται με την εκάστοτε μεσοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας, θα πρέπει στο κατώφλι ενεργοποίησης των κωνίων να ταυτίζεται με την τυποποιημένη σκοτοπική καμπύλη $V'(\lambda)$.

(γ) Αυτό που μας ενδιαφέρει, είναι να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο, το οποίο να περιγράφει το πώς ο οφθαλμός αντιλαμβάνεται τα χρώματα στην μεσοπική όραση. Στην σκοτοπική όραση ο οφθαλμός δεν αντιλαμβάνεται χρώματα. Μόνο το αχρωματικό κανάλι λειτουργεί. Αυτό σημαίνει ότι στις πολύ χαμηλές ενέργειες, το μοντέλο πρέπει να δείχνει όλα τα χρώματα να πλησιάζουν τις συναρτήσεις χρωματικότητας, που ορίζουμε εμείς σαν αχρωματικό λευκό, δηλαδή το σημείο (0.33, 0.33). Επίσης οι tristimulus τιμές οποιουδήποτε χρωμο-ερεθίσματος πρέπει να έχουν την μέγιστη αβεβαιότητα. Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο αν οι $x_E(\lambda)$, $y_E(\lambda)$ και $z_E(\lambda)$ στο κατώφλι ενεργοποίησης των κωνίων ταυτίζονται μεταξύ τους. Άρα πρέπει όλες να ταυτίζονται με την τυποποιημένη σκοτοπική καμπύλη $V'(\lambda)$. Ίσως μεταξύ τους να διαφέρουν κατά μια πολλαπλασιαστική σταθερά.

(δ) Η απαίτηση και οι τρεις συναρτήσεις να έχουν ίσα ολοκληρώματα, ισχύει για το φωτοπικό και το σκοτοπικό όριο. Στην μεσοπική περιοχή όμως, τήρηση αυτής της απαίτησεως σημαίνει ότι το ισοενεργειακό λευκό θα βρίσκεται πάντοτε στο σημείο (0.33, 0.33) των συναρτήσεων χρωματικότητας. Αυτό σημαίνει ότι το ισοενεργειακό λευκό θα περιγράφεται πάντοτε από το μοντέλο σαν «λευκό». Στην πραγματικότητα βέβαια αυτό δεν πρέπει να ισχύει, διότι στα χαμηλά επίπεδα προσαρμογής το λευκό (μεταξύ των άλλων) αποκτά μια κυανή χροιά (Purkinje shift). Αυτή η κυανή χροιά πρέπει να φαίνεται σαν αλλαγή των συναρτήσεων χρωματικότητας στο μοντέλο. Άρα η απαίτηση των ίσων ολοκληρωμάτων δεν πρέπει να ισχύει στις μεσοπικές συνθήκες οράσεως.

Με αυτές τις παρατηρήσεις κατά νουν, θεωρούμε ότι οι συναρτήσεις $x_E(\lambda)$, $y_E(\lambda)$, $z_E(\lambda)$ είναι γραμμικός συνδυασμός των αντίστοιχων φωτοπικών τυποποιημένων συναρτήσεων $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ (CIE 1964) και της καμπύλης φασματικής ευαισθησίας στην σκοτοπική όραση $V'(\lambda)$. Αυτή η γραμμικότητα του συνδυασμού θα κάνει το μοντέλο πιο εύχρηστο. Έστω λοιπόν ότι:

$$k'' y_E(\lambda) = a_{yE} k y(\lambda) + (1 - a_{yE}) k' V'(\lambda)$$

$$k'' x_E(\lambda) = a_{xE} k x(\lambda) + (1 - a_{xE}) k' V'(\lambda) \quad (7-11)$$

$$k'' z_E(\lambda) = a_{zE} k z(\lambda) + (1 - a_{zE}) k' V'(\lambda)$$

όπου a_{xE} , a_{yE} , a_{zE} καθαροί αριθμοί που παίρνουν τιμές μεταξύ μηδέν και ένα και εξαρτώνται αποκλειστικά από την ισχύ E. Οι συντελεστές k, k' και k'' είναι οι συντελεστές φασματικής ευαισθησίας για την φωτοπική (=683 lm/W), την σκοτοπική (=1720 lm/W) και την μεσοπική (μεταβλητή) όραση. Σχέσεις όπως οι εξισώσεις 7-11 για το «γ» έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των καμπύλων φασματικής ευαισθησίας στην μεσοπική όραση σε κάποια μοντέλα [34-35], [89]. Σε αυτό το σημείο θα έπρεπε να αναφερθεί ότι αυτό το γραμμικό μοντέλο, αν και βολικό, δεν είναι υψίστης ακριβείας. Ένα μη γραμμικό μοντέλο θα ήταν πιο ακριβές. Ένα καλλίτερο μοντέλο στην θέση του 7-11 θα ήταν:

$$k'' y_E(\lambda) = a_{yE} k y(\lambda) + (1 - a_{yE}) [k y(\lambda)]^{\beta_y} [k' V'(\lambda)]^{1-\beta_y}$$

$$k'' x_E(\lambda) = a_{xE} k x(\lambda) + (1 - a_{xE}) [k x(\lambda)]^{\beta_x} [k' V'(\lambda)]^{1-\beta_x} \quad (7-12)$$

$$k'' z_E(\lambda) = a_{zE} k z(\lambda) + (1 - a_{zE}) [k z(\lambda)]^{\beta_z} [k' V'(\lambda)]^{1-\beta_z}$$

όπου β_y , β_x , β_z θετικοί αριθμοί. Αυτό το μοντέλο είναι παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο φασματικής ευαισθησίας του Μπισκετζή [92] για την μεσοπική όραση. Αυτές οι εξισώσεις 7-12 είναι ένας συνδυασμός των αντίστοιχων εξισώσεων των μοντέλων των Rea et al. [34] και MOVE [35] αφ' ενός και Ikeda et al. [28] και Sagawa et al. [93] αφ' ετέρου.

Εν τούτοις, τα μη γραμμικά μοντέλα δεν είναι πρακτικά. Αυτός είναι ο λόγος, που χρησιμοποιείται γραμμικό μοντέλο σε αυτή την διατριβή, όπως φαίνεται από τις εξισώσεις 7-11.

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 7-8 στις 7-7:

$$a_{yE} y(\lambda) + (1 - a_{yE}) V'(\lambda) = r_E(\lambda) [a_{yE} y(\lambda_R) + (1 - a_{yE}) V'(\lambda_R)] +$$

$$+ g_E(\lambda) [a_{yE} y(\lambda_G) + (1 - a_{yE}) V'(\lambda_G)] + b_E(\lambda) [a_{yE} y(\lambda_B) + (1 - a_{yE}) V'(\lambda_B)] \quad (7-13)$$

$$a_{xE} x(\lambda) + (1 - a_{xE}) V'(\lambda) = r_E(\lambda) [a_{xE} x(\lambda_R) + (1 - a_{xE}) V'(\lambda_R)] +$$

$$+ g_E(\lambda) [a_{xE} x(\lambda_G) + (1 - a_{xE}) V'(\lambda_G)] + b_E(\lambda) [a_{xE} x(\lambda_B) + (1 - a_{xE}) V'(\lambda_B)] \quad (7-14)$$

$$\begin{aligned}
a_{zE} z(\lambda) + (1 - a_{zE}) V'(\lambda) &= r_E(\lambda) [a_{zE} z(\lambda_R) + (1 - a_{zE}) V'(\lambda_R)] + \\
&+ g_E(\lambda) [a_{zE} z(\lambda_G) + (1 - a_{zE}) V'(\lambda_G)] + b_E(\lambda) [a_{zE} z(\lambda_B) + (1 - a_{zE}) V'(\lambda_B)] \quad (7-15)
\end{aligned}$$

Οι τιμές $x(\lambda_R)$, $x(\lambda_G)$, \dots , $z(\lambda_B)$, $V'(\lambda_R)$, $V'(\lambda_G)$, $V'(\lambda_B)$ υπολογίζονται εύκολα.

7.6. Προσδιορισμός των παραμέτρων a_{yE} , a_{xE} , a_{zE} .

Πρώτα θα υπολογισθεί η παράμετρος a_{yE} στην σχέση (7-13).

Για το σύστημα των μονοχρωματικών πρωτευόντων \mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B} ($\lambda_R=621.00\text{nm}$, $\lambda_G=540.90\text{nm}$ και $\lambda_B=411.95\text{nm}$), οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης $r_E(\lambda)$, $g_E(\lambda)$, $b_E(\lambda)$ υπολογίζονται για ένα μεγάλο αριθμό πυκνοτήτων ισχύος. Σε κάθε επίπεδο ισχύος (E) η εξίσωση 7-13 γράφεται για 20 μήκη κύματος.

$$\begin{aligned}
a_{yE} y(\lambda_i) + (1 - a_{yE}) V'(\lambda_i) &= r_E(\lambda_i) [a_{yE} y(\lambda_R) + (1 - a_{yE}) V'(\lambda_R)] + \\
&+ g_E(\lambda_i) [a_{yE} y(\lambda_G) + (1 - a_{yE}) V'(\lambda_G)] + b_E(\lambda_i) [a_{yE} y(\lambda_B) + (1 - a_{yE}) V'(\lambda_B)] \quad (7-16)
\end{aligned}$$

Έχουν επιλεγεί τα μήκη κύματος $\lambda_i = 400, 420, \dots, 780 \text{ nm}$. Για κάθε επίπεδο ισχύος λοιπόν, υπάρχουν 20 εξισώσεις με έναν άγνωστο το: a_{yE} . Με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζονται οι τιμές του a_{yE} για πολλές τιμές της πυκνότητας εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, από 0.1 έως $10000 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$. Αυτά τα όρια αντιστοιχούν περίπου για τη μονοχρωματική ακτινοβολία $\lambda_C=500.00\text{nm}$, στο άνω και κάτω όριο της μεσοπικής περιοχής οράσεως, δηλαδή από το κατώφλι ενεργοποίησης των κωνίων, μέχρι την αρχή της φωτοπικής περιοχής.

Ο ακριβής υπολογισμός της παραμέτρου « a_{yE} » είναι παρόμοιος με αυτό που έγινε στην παράγραφο §6.4. Τα a_{xE} και a_{zE} υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο.

Αν και δεν υπάρχει τρόπος να ελεγχθεί η ακρίβεια των « a_{xE} » και « a_{zE} », είναι πολύ εύκολο να γίνει για το « a_{yE} ». Οι τιμές του για διάφορα επίπεδα ισχύος θα συγκριθούν με τις αντίστοιχες τιμές της παραμέτρου « a_E », που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της φασματικής ευαισθησίας του οφθαλμού, στο κεφάλαιο 6. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 7-2. Η μη γραμμική προσαρμογή τους είναι:

$$a_{yE} = 1 + 0.5 \tanh[1.503 \ln(E) - 7.478] - 0.5$$

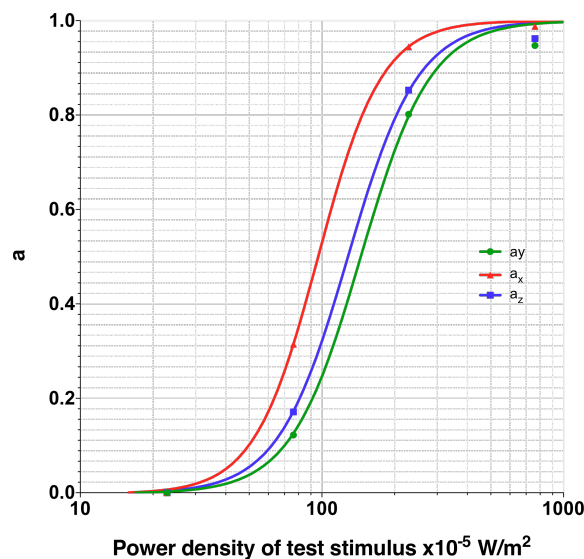
$$a_{xE} = 1 + 0.5 \tanh[1.649 \ln(E) - 7.531] - 0.5 \quad (7-17)$$

$$a_{zE} = 1 + 0.5 \tanh[1.501 \ln(E) - 7.285] - 0.5$$

Τα αποτελέσματα μαζί με τις γραμμές προσαρμογής φαίνονται στο σχήμα 7-3.

Πίνακας 7-2. Οι τιμές του συντελεστή « a_E » του κεφαλαίου 6 για κάποιες τιμές της πυκνότητας εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (E_C) σε μονάδες 10^{-5} W/m^2 του μονοχρωματικού δοκιμαστικού ($\lambda_C=500\text{nm}$), μαζί με τις αντίστοιχες φωτοπικές (P_C) και μεσοπικές (M_C) λαμπρότητες σε μονάδες cd/m^2 και οι τιμές των συντελεστών « a_{yE} », « a_{xE} » και « a_{zE} » όπως ορίζονται από την εξίσωση 7-16.

E_C	P_C	a_E	M_C	a_{yE}	a_{xE}	a_{zE}
7619.6967	10	1.0000	10.0000	0.9944	0.9973	0.9960
2285.9090	3	1.0000	3.0000	0.9825	0.9952	0.9874
761.9697	1	0.9996	1.0019	0.9471	0.9879	0.9617
228.5909	0.3	0.8882	0.4443	0.8016	0.9444	0.8527
76.1970	0.1	0.6353	0.2570	0.1225	0.3144	0.1714
22.8591	0.03	0.3532	0.1135	0.0000	0.0000	0.0000
7.6197	0.01	0.2345	0.0430	0.0000	0.0000	0.0000
2.2859	0.003	0.1871	0.0135	0.0000	0.0000	0.0000
0.7620	0.001	0.1701	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000



Σχήμα 7-3. Οι υπολογισθείσες τιμές των « a_{yE} », « a_{xE} » και « a_{zE} », που ορίζονται στις εξισώσεις 7-16 και 7-17.

Είναι προφανές ότι υπάρχει απόκλιση τιμών μεταξύ του « a_{yE} » και του « a_E » του μοντέλου του βου κεφαλαίου, προπαντός στα χαμηλά επίπεδα ισχύος. Αυτό οφείλεται στην υιοθέτηση γραμμικού μοντέλου για το $y_E(\lambda)$ στις εξισώσεις 7-11. Ως εκ τούτου, κάποιες τροποποιήσεις είναι αναγκαίες.

Οι τροποποιήσεις θα γίνουν με ανακλιμάκωση της μεταβλητής « E » κατά τέτοιον τρόπο, ώστε οι τιμές του « a_{yE} » να συμπίπτουν κατά το μάλλον ή ήττον με αυτές του « a_E ». Η μεταβλητή « E » θα αντικατασταθεί από την έκφραση « $u E^v + w$ ». Όπου « u », « v » και « w » είναι πραγματικοί αριθμοί. Οι συντελεστές « a_{xE} » και « a_{zE} » δυστυχώς δεν μπορούν να συγκριθούν με τίποτε, αλλά πρέπει να ανακλιμακωθούν με τον ίδιο τρόπο, έτσι ώστε οι αμοιβαίες σχέσεις και των τριών συντελεστών να μείνει σταθερή.

Η ανακλιμάκωση για το « y » γίνεται χρησιμοποιώντας τις τιμές:

$$u_y = 3.185, \quad v_y = 0.7724, \quad w_y = 82.97 \quad (7-18)$$

Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές, τα « a_{yE} » συμπίπτουν σε ικανοποιητικό βαθμό με τα « a_E » του μοντέλου του κεφαλαίου 6. Αυτές οι τιμές θα χρησιμοποιηθούν για την ανακλιμάκωση των δύο υπολοίπων συντελεστών « a_{xE} » και « a_{zE} ».

Αυτή η ανακλιμάκωση για το « a_{yE} » δεν αλλάζει το φωτοπικό του όριο (που συμβαίνει όταν $E \rightarrow \infty$, το οποίο είναι μονάδα), αλλά ασφαλώς αλλάζει το σκοτοπικό του όριο (όταν $E \rightarrow 0$, το οποίο είναι 0.156537), διότι αυτό πρέπει να συμπίπτει με το σκοτοπικό όριο του « a_E » του μοντέλου του βου κεφαλαίου. Κατά συνέπεια, τα σκοτοπικά όρια των « a_{xE} » και « a_{zE} » πρέπει να είναι τα ίδια με αυτό του « a_{yE} » ύστερα από την ανακλιμάκωση, όπως ήσαν πριν την ανακλιμάκωση, ώστε να διατηρείται η μεταξύ τους σχέση σταθερή. Έτσι πρέπει:

$$\lim_{E \rightarrow 0} a_{xE} = \lim_{E \rightarrow 0} a_{zE} = \lim_{E \rightarrow 0} a_{yE} = \lim_{E \rightarrow 0} a_E = 0.156537 \quad (7-19)$$

$$\text{Απαιτούνται λοιπόν οι τιμές: } w_x = 58.0069 \quad \text{και} \quad w_z = 73.3898 \quad (7-20)$$

Οι δύο λοιποί παράγοντες « u » και « v » θα πάρουν τις τιμές:

$$u_x = u_z = u_y = 3.185, \quad v_x = v_z = v_y = 0.7724 \quad (7-21)$$

Ύστερα λοιπόν από την ανακλιμάκωση, οι εξισώσεις 7-17 γίνονται:

$$a_{yE} = 1 + 0.5 \tanh[1.503 \ln(3.185 E^{0.7724} + 82.97) - 7.478] - 0.5$$

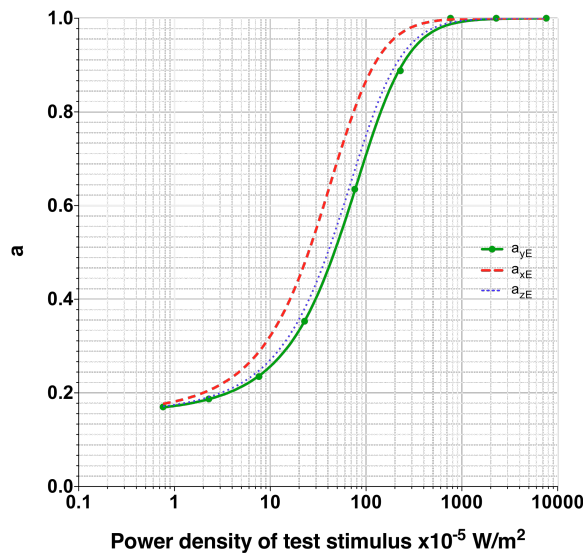
$$a_{xE} = 1 + 0.5 \tanh[1.649 \ln(3.185 E^{0.7724} + 58.01) - 7.531] - 0.5 \quad (7-22)$$

$$a_{zE} = 1 + 0.5 \tanh[1.501 \ln(3.185 E^{0.7724} + 73.39) - 7.285] - 0.5$$

Τα νέα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 7-3. Τα διαγράμματά τους φαίνονται στο σχήμα 7-4, στο οποίο περιλαμβάνονται και οι αντίστοιχες τιμές του « a_E ».

Πίνακας 7-3. Οι τιμές του συντελεστή « a_E » του μοντέλου του βου κεφαλαίου για διάφορες τιμές της πυκνότητας εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (E_C) σε μονάδες $10^{-5} W/m^2$ του μονοχρωματικού δοκιμαστικού χρωμο-ερεθίσματος ($\lambda_C=500nm$), περιλαμβανομένων και των αντίστοιχων τιμών της φωτοπικής (P_C) και μεσοπικής (M_C) λαμπρότητας σε μονάδες cd/m^2 και των τιμών των τροποποιημένων « a_{yE} », « a_{xE} » και « a_{zE} » συντελεστών, όπως ορίζονται στις εξισώσεις 7-22.

E_C	P_C	a_E	M_C	a_{yE}	a_{xE}	a_{zE}
7619.6967	10	1.000	10.0000	1.000	1.000	1.000
2285.9090	3	1.000	3.0000	0.999	1.000	0.999
761.9697	1	0.9996	1.0019	0.987	0.998	0.991
228.5909	0.3	0.8882	0.4443	0.894	0.967	0.916
76.1970	0.1	0.6353	0.2570	0.632	0.807	0.676
22.8591	0.03	0.3532	0.1135	0.354	0.477	0.380
7.6197	0.01	0.2345	0.0430	0.236	0.288	0.247
2.2859	0.003	0.1871	0.0135	0.187	0.205	0.192
0.7620	0.001	0.1701	0.0046	0.169	0.177	0.171



Σχήμα 7-4. Οι υπολογισμένες τιμές των « a_{yE} », « a_{xE} » και « a_{zE} », όπως ορίζονται στις εξισώσεις 7-22, περιλαμβανομένων των των αντιστοίχων τιμών του συντελεστή « a_E » του μοντέλου του βου κεφαλαίου.

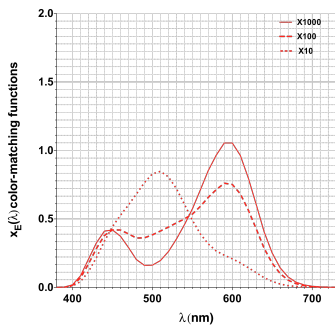
Ύστερα από αυτές τις τροποποιήσεις, αυτό που έχει επιτευχθεί, είναι:

- 1) Και οι τρεις συντελεστές « a_{yE} », « a_{xE} » και « a_{zE} » έχουν το ίδιο φωτοπικό όριο (=1).
- 2) Και οι τρεις συντελεστές « a_{yE} », « a_{xE} » και « a_{zE} » έχουν το ίδιο σκοτοπικό όριο, ίδιο με το σκοτοπικό όριο του « a_E » του μοντέλου του βου κεφαλαίου.
- 3) Οι τιμές του « a_{yE} » συμπίπτουν σε ικανοποιητικό βαθμό με τις τιμές του συντελεστή « a_E » του μοντέλου του βου κεφαλαίου.

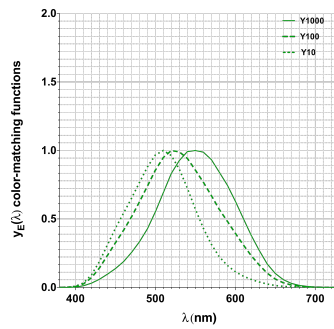
Ο στόχος έχει επιτευχθεί.

7.7. Υπολογισμός των μεσοπικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης $x_E(\lambda)$, $y_E(\lambda)$, $z_E(\lambda)$ και των συναρτήσεων χρωματικότητας.

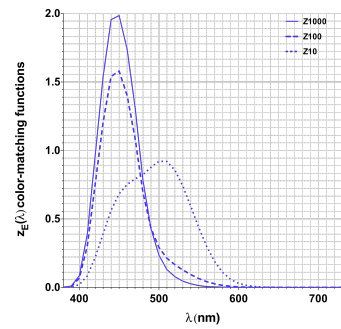
Έχοντας προσδιορίσει τους συντελεστές « a_{yE} », « a_{xE} » και « a_{zE} » όπως ορίστηκαν στις εξισώσεις 7-22, είναι δυνατόν να υπολογισθούν οι μεσοπικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης $x_E(\lambda)$, $y_E(\lambda)$, $z_E(\lambda)$ για κάθε τιμή της πυκνότητας εκπεμπομένης ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 7-11. Αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 7-5.



(α)



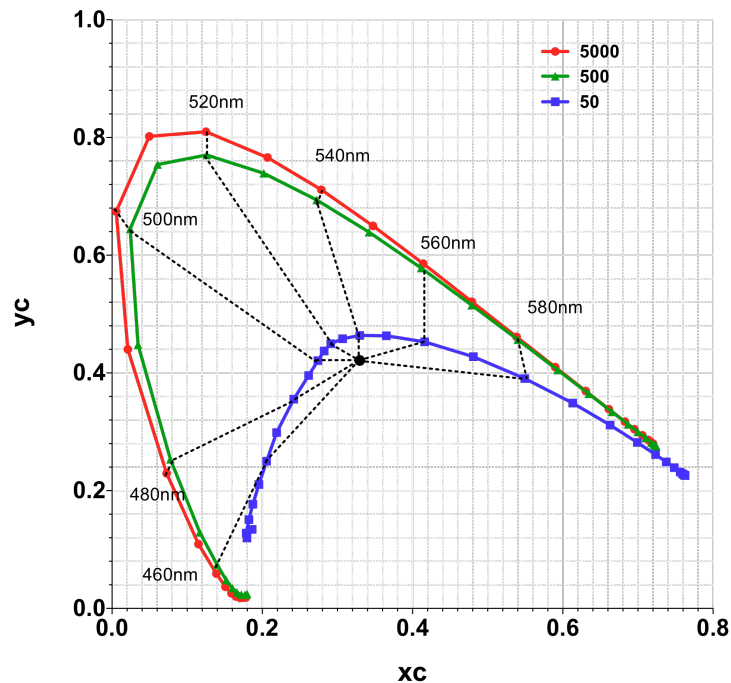
(β)



(γ)

Σχήμα 7-5. Οι μεσοπικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης $x_E(\lambda)$, $y_E(\lambda)$, $z_E(\lambda)$ για τα επίπεδα πυκνότητας εκπεμπομένης ακτινοβολίας $1000 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (συνεχής γραμμή), $100 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (διακεκομμένη) και $10 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (διάστικτη) (α) για $x_E(\lambda)$, (β) για $y_E(\lambda)$, (γ) για $z_E(\lambda)$.

Από αυτές τις συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης είναι πολύ εύκολο να υπολογισθούν οι συντεταγμένες χρωματικότητας για κάθε επίπεδο ισχύος στην μεσοπική περιοχή οράσεως. Στο σχήμα 7-6 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες χρωματικότητας για τρία επίπεδα πυκνότητας εκπεμπομένης ακτινοβολίας (50×10^{-5} , 500×10^{-5} και $5000 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$).



Σχήμα 7-6. Οι συντεταγμένες χρωματικότητας x_c και y_c για τρία επίπεδα πυκνότητας εκπεμπομένης ακτινοβολίας $50 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (εσωτερική γραμμή), $500 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (μεσαία) και $5000 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (εξωτερική).

Στο σχήμα 7-6 παρατηρούμε τα εξής:

(α) Όσο μικραίνει η ισχύς, τόσο μικραίνει το αντίστοιχο διάγραμμα. Στο κάτω όριο της μεσοπικής οράσεως το διάγραμμα καταλήγει στο σημείο $x_c=y_c=1/3$, το οποίο παριστάνεται με έναν μικρό κύκλο στο σχήμα. Αυτό σημαίνει ότι τα υψηλού κορεσμού χρωμοερεθίσματα, όσο μικραίνει η ισχύς, χάνουν βαθμηδόν τον κορεσμό τους. Στο κάτω όριο της μεσοπικής οράσεως όλα τα χρωμοερεθίσματα χάνουν την χρωματικότητά τους και συμπίπτουν με το ισοενεργειακό λευκό, οπότε φαίνονται γκριζα. Όπως ακριβώς ανεμένετο.

(β) Τα ακραία ερυθρά χρωμοερεθίσματα του ορατού φάσματος διατηρούν την χρωματικότητά τους ακόμα και σε πολύ χαμηλά επίπεδα ισχύος, όπου τα επίπεδα προσαρμογής πλησιάζουν την σκοτοπική όραση. Αυτό έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικά.

(γ) Στις χαμηλές ενέργειες, οι περιοχές των χρωμοερεθισμάτων που αντιστοιχούν σε πράσινο και κυανο-πράσινο χρώμα, συρρικνώνονται ιδιαίτερα και συγχρόνως μετατοπίζονται προς τις κυανές περιοχές. Αυτό φαίνεται να συμφωνεί με τα αποτελέσματα των πειραμάτων του Ishida σχετικά με αναγνώριση χρωμάτων στην μεσοπική όραση: «Σε φωτισμό 1 lx το πράσινο και το κιτρινο-πράσινο εξαφανίστηκαν. Το κυανό εισχώρισε στην πράσινη περιοχή. Σε φωτισμό 0.1 lx δεν υπήρχε αξιοπιστία. Εν τούτοις το κυανό παρέμενε και κάλυπτε το πράσινο. Το ερυθρό, το ροζ και το πορτοκαλλί συγχέοντο.»

7.8. Εφαρμογή του μοντέλου μεσοπικής χρωματομετρίας

Σαν παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου μεσοπικής χρωματομετρίας θα γίνει υποδειγματικός υπολογισμός των χρωματομετρικών μεγεθών για κάποιο χρωμο-ερέθισμα. Έστω ένα τυχαίο χρωμο-ερέθισμα Q με (φωτοπικές) συντεταγμένες χρωματικότητας « x_c » και « y_c » δεδομένες. Τα κλάσματα « E/P » (πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας διά λαμπρότητα) και « S/P » (σκοτοπική δια φωτοπική λαμπρότητα) είναι σταθερά για οποιαδήποτε συγκεκριμένη φωτεινή πηγή και μπορούν να υπολογισθούν εύκολα. Για κάθε τιμή της (φωτοπικής) λαμπρότητας « P » οι μεσοπικές συντεταγμένες χρωματικότητας της πηγής μπορούν να υπολογισθούν:

α) Έστω X, Y, Z οι (φωτοπικές) tristimulus τιμές του. Έστω:

$$Y=P, \text{ τότε: } X = \frac{xc}{yc} P, \quad Z = \frac{1-xc-yc}{yc} P \quad (7-23)$$

$$\beta) \text{ Έστω «S» η σκοτοπική του λαμπρότητα. Τότε: } S=(S/P) P \quad (7-24)$$

$$\gamma) \text{ Έστω «E» η πυκνότητα ενέργειάς του. Τότε: } E=(E/P) P \quad (7-25)$$

δ) Οι συντελεστές « a_{yE} », « a_{xE} » και « a_{zE} » υπολογίζονται με τις εξισώσεις 7-22.

ε) Οι μεσοπικές tristimulus τιμές υπολογίζονται με τις εξισώσεις 7-11, αλλά στην ολοκληρωτική τους μορφή (αυτό είναι και το όφελος του γραμμικού μοντέλου):

$$Y_E = a_{yE} P + (1-a_{yE}) S$$

$$X_E = a_{xE} X + (1-a_{xE}) S \quad (7-26)$$

$$Z_E = a_{zE} Z + (1-a_{zE}) S$$

στ) Τελικά, υπολογίζονται οι μεσοπικές συντεταγμένες χρωματικότητας:

$$xc_E = \frac{X_E}{X_E + Y_E + Z_E}, \quad yc_E = \frac{Y_E}{X_E + Y_E + Z_E} \quad (7-27)$$

7.9. Παράδειγμα υπολογισμού χρωματομετρικών μεγεθών χρωμοερεθισμάτων ύστερα από μεταβολή της ισχύος.

Χάρην παραδείγματος, θα υπολογισθούν οι μεσοπικές tristimulus τιμές και οι μεσοπικές συντεταγμένες χρωματικότητας δύο φωτεινών πηγών για μερικά επίπεδα πυκνότητας εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Οι φωτεινές πηγές είναι το ισοενεργειακό λευκό («EEW», $S/P=2.072$, $E/P=2167[(\times 10^{-5} \text{ W/m}^2)/(\text{cd/m}^2)]$), $xc=0.33$, $yc=0.33$) και η λάμπα νατρίου υψηλής πίεσεως («SON 250», $S/P=0.433$, $E/P=545[(\times 10^{-5} \text{ W/m}^2)/(\text{cd/m}^2)]$), $xc=0.569$, $yc=0.418$). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 7-4.

Πίνακας 7-4. Η χρωματικότητα του ισοενεργειακού λευκού (EEW) και της λάμπας νατρίου υψηλής πίεσης. Με «P» συμβολίζεται η φωτοπική λαμπρότητα σε μονάδες cd/m^2 . Με «E» η πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας $\times 10^{-5} W/m^2$. Με «S» η σκοτοπική λαμπρότητα σε cd/m^2 . Τα «X», «Z» είναι οι tristimulus τιμές σε cd/m^2 . Τα «Y_E», «X_E», «Z_E» είναι οι μεσοπικές tristimulus τιμές σε cd/m^2 . Τα «xc_E», «yc_E» είναι οι μεσοπικές συντεταγμένες χρωματικότητας.

Lamp (S/P)	P	0.01	0.03	0.1	0.3	1	3
EEW (2.072)	E	21.67	65.01	216.7	650.1	2167.0	6501.0
	S	0.021	0.062	0.207	0.622	2.072	6.216
	X	0.010	0.030	0.100	0.300	1.000	3.000
	Z	0.010	0.031	0.103	0.309	1.030	3.091
	a _{yE}	0.346	0.588	0.885	0.983	0.999	1.000
	a _{xE}	0.411	0.740	0.961	0.996	1.000	1.000
	a _{zE}	0.372	0.632	0.909	0.987	0.999	1.000
	Y _E	0.017	0.043	0.112	0.306	1.000	3.000
	X _E	0.016	0.038	0.104	0.301	1.000	3.000
	Z _E	0.017	0.042	0.112	0.313	1.031	3.091
	xc _E	0.325	0.309	0.317	0.327	0.330	0.330
	yc _E	0.339	0.349	0.341	0.332	0.330	0.330
SON 250 (0.433)	E	5.450	16.34	54.48	163.4	544.8	1634.3
	S	0.004	0.013	0.043	0.130	0.433	1.300
	X	0.014	0.041	0.136	0.409	1.363	4.088
	Z	0.000	0.001	0.003	0.009	0.031	0.093
	a _{yE}	0.218	0.307	0.540	0.831	0.976	0.997
	a _{xE}	0.205	0.348	0.685	0.934	0.995	1.000
	a _{zE}	0.227	0.328	0.583	0.863	0.982	0.998
	Y _E	0.006	0.018	0.074	0.271	0.986	2.996
	X _E	0.006	0.023	0.107	0.390	1.358	4.087
	Z _E	0.003	0.009	0.020	0.026	0.038	0.096
	xc _E	0.410	0.454	0.533	0.568	0.570	0.569
	yc _E	0.366	0.365	0.368	0.395	0.414	0.417

7.10. Παράδειγμα υπολογισμού χρωματομετρικών μεγεθών ενός χρωμο-ερεθίσματος, που προκύπτει από υπέρθεση δύο χρωμο-ερεθισμάτων.

Η έλλειψη προσθετικότητας στην μεσοπική όραση ερμηνεύτηκε στα προηγούμενα σαν αδυναμία υπολογισμού του χρώματος που θα προκύψει από την υπέρθεση δύο ή περισσότερων χρωμο-ερεθισμάτων. Αυτό βέβαια αποτελεί παραβίαση του νόμου της υπέρθεσης του Grassmann. Με το παρόν όμως χρωματομετρικό μοντέλο είναι δυνατόν να υπολογισθούν τα χρωματομετρικά μεγέθη ενός τέτοιου αθροίσματος.

Έστω, παραδείγματος χάριν, τα μονοχρωματικά χρωμο-ερεθίσματα **A** και **B**, που έχουν χαρακτηριστικά:

A) $\lambda_A=600\text{nm}$, $E_A=50\times 10^{-5}\text{W/m}^2$, $E/P=533.307$, $S/P=0.125$, $x_c=0.631$, $y_c=0.369$.

B) $\lambda_B=500\text{nm}$, $E_B=50\times 10^{-5}\text{W/m}^2$, $E/P=761.970$, $S/P=5.305$, $x_c=0.006$, $y_c=0.675$.

Με «P» συμβολίζεται η φωτοπική λαμπρότητα σε μονάδες cd/m^2 . Με «E» η πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας $\times 10^{-5}\text{ W/m}^2$. Με «S» η σκοτοπική λαμπρότητα σε cd/m^2 . Τα « Y_{ph} », « X_{ph} », « Z_{ph} » είναι οι φωτοπικές tristimulus τιμές σε cd/m^2 . Τα « Y_m », « X_m », « Z_m » είναι οι μεσοπικές tristimulus τιμές σε cd/m^2 . Τα « x_c », « y_c » είναι οι φωτοπικές συντεταγμένες χρωματικότητας. Τα « x_{cm} », « y_{cm} » είναι οι μεσοπικές συντεταγμένες χρωματικότητας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 7-5.

Τα χρωματομετρικά μεγέθη των A και B υπολογίζονται με βάση την πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας τους, που είναι $50\times 10^{-5}\text{W/m}^2$, για το κάθε ένα. Το υπέρθεμά τους όμως («500+600») έχει πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας $50+50=100\times 10^{-5}\text{W/m}^2$, και βάσει αυτού θα γίνουν οι υπολογισμοί. Παρατηρούμε ότι οι τιμές των συντελεστών a_y , a_x και a_z παίρνουν διαφορετικές τιμές στο υπέρθεμα, από ό,τι στα A και B. Εκεί ακριβώς έγκειται η παραβίαση του νόμου της υπέρθεσης του Grassmann. Αυτό, όπως είναι προφανές, μπορεί να γίνει μόνο στην μεσοπική περιοχή οράσεως, στην οποία και μόνο, μπορούν οι συντελεστές αυτοί να μεταβληθούν. Στον πίνακα 7-5 φαίνονται:

i) ποιές θα ήσαν οι τιμές των συντεταγμένων χρωματικότητας x_c και y_c του υπερθέματος «500+600» στην **φωτοπική** όραση, όπου δεν θα υπήρχε παραβίαση ούτε του νόμου της αναλογικότητας, ούτε του νόμου της υπέρθεσης του Grassmann

ii) ποιές θα ήσαν οι οι τιμές των συντεταγμένων χρωματικότητας x_{cm} και y_{cm} του υπερθέματος «500+600» στην **μεσοπική** όραση, αν γινόταν παραβίαση μόνο του νόμου της αναλογικότητας, αλλά όχι του της υπέρθεσης (τελευταία στήλη, που σημειώνεται με πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας «50»)

iii) ποιές θα ήσαν οι τιμές των συντεταγμένων χρωματικότητας x_c και y_c του υπερθέματος «500+600» στην **μεσοπική** όραση, αν γινόταν παραβίαση και του νόμου της αναλογικότητας και του της υπέρθεσης (η στήλη, που σημειώνεται με πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας «100»).

Πίνακας 7-5. Υπολογισμός των χρωματομετρικών μεγεθών για το χρωμο-ερέθισμα, που προκύπτει από την υπέρθεση των μονοχρωματικών $\lambda_A=600nm$, $E_A=50 \times 10^{-5} W/m^2$, και $\lambda_B=500nm$, $E_B=50 \times 10^{-5} W/m^2$. Η τελευταία στήλη δείχνει ποιά θα ήταν τα χρωματομετρικά μεγέθη, αν ίσχυε ο νόμος της υπέρθεσης του Grassmann.

	600nm	500nm	500+600	500+600
E=	50	50	100	50
E/P=	533.307	761.97	627.45	313.73
S/P=	0.125	5.305	2.258	2.258
x_c =	0.631	0.006	0.458	0.458
y_c =	0.369	0.675	0.454	0.454
Y_{ph} =	0.094	0.066	0.159	0.159
X_{ph} =	0.160	0.001	0.161	0.161
Z_{ph} =	0.000	0.031	0.031	0.031
S=	0.012	0.348	0.360	0.360
a_y =	0.5181	0.5181	0.7087	0.5181
a_x =	0.6940	0.6940	0.8664	0.6940
a_z =	0.5593	0.5593	0.7507	0.5593
Y_m =	0.054	0.202	0.218	0.256
X_m =	0.115	0.107	0.187	0.222
Z_m =	0.005	0.171	0.113	0.176
x_{c_m} =	0.659	0.223	0.362	0.339
y_{c_m} =	0.311	0.421	0.420	0.392

7.11. Αξιολόγηση του μοντέλου

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι ενώ στον τετραχρωματικό διανυσματικό χώρο ισχύει η προσθετικότητα, στον τριχρωματικό χώρο τυχαίας ισχύος E_Q , δεν ισχύει. Ήδη οι τύποι (7-4) υποκρύπτουν προσθετικότητα. Στους αντίστοιχους φωτοπικούς χώρους της CIE των 2° (CIE 1931) και των 10° (CIE 1964) δεχόμαστε ότι ισχύει. Έλλειψη προσθετικότητας σημαίνει αδυναμία υπολογισμού ολοκληρωμάτων και μετασχηματισμούς αλλαγής πρωτευόντων. Αυτό καθιστά τις τριχρωματικές συναρτήσεις ελάχιστα αξιοποιήσιμες. Η έλλειψη προσθετικότητας είναι πιο έντονη στις χαμηλές ενέργειες και λιγότερο έντονη στις υψηλές. Μπορούμε να δεχθούμε καταχρηστικά, ότι στις υψηλές ενέργειες η προσθετικότητα κατά προσέγγιση

ισχύει. Στις χαμηλές ενέργειες δεν μπορούμε να το δεχθούμε αυτό. Ίσως όμως τότε να μην έχει νόημα καθόλου αυτό το θέμα, γιατί η χρωματική αβεβαιότητα ενός χρωμοερεθίσματος γίνεται πολύ μεγάλη.

Θα πρέπει να επισημανθεί, ότι αυστηρά μιλώντας, οι μεσοπικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης x, y, z που προκύπτουν με αυτό το μοντέλο, δεν είναι οι ίδιες με τις αντίστοιχες του τυπικού παρατηρητή. Δεν έχει γίνει ένας απλός μετασχηματισμός από ένα κάποιο μεσοπικό σύστημα πρωτεύοντων $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ στο τυποποιημένο σύστημα $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$. Αντίθετα, ο μετασχηματισμός έγινε σε ένα μη τυποποιημένο σύστημα $\mathbf{X}', \mathbf{Y}', \mathbf{Z}'$. Αυτό έγινε διότι το τυποποιημένο σύστημα $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ έχει γίνει κάτω από κάποιες προϋποθέσεις, όπως περιγράφονται στην παράγραφο §7.5. Το σύστημα $\mathbf{X}', \mathbf{Y}', \mathbf{Z}'$ έχει γίνει κάτω από τις ίδιες προϋποθέσεις. Συνεπώς, αυτό που είναι αναγκαίο, είναι να διατηρηθούν οι προϋποθέσεις και όχι τα φανταστικά πρωτεύοντα $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$. Τα νέα φανταστικά πρωτεύοντα $\mathbf{X}', \mathbf{Y}', \mathbf{Z}'$ δεν συμπίπτουν με τα τυποποιημένα $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ παρά μόνο στο φωτοπικό όριο και οι θέσεις τους σε ένα διάγραμμα του τυποποιημένου XYZ συστήματος, εξαρτώνται από την ισχύ (ή την φωτοπική λαμπρότητα) του δοκιμαστικού χρωμο-ερεθίσματος.

Έχοντας υπολογίσει τις μεσοπικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης x, y, z , είναι εύκολο να υπολογισθούν οι tristimulus τιμές κάθε χρωμο-ερεθίσματος, όπως και τις συντεταγμένες χρωματικότητας. Η χρωματική εμφάνιση ενός χρωμο-ερεθίσματος μπορεί να περιγραφεί είτε με τις μεσοπικές tristimulus τιμές, είτε με τα $L^*a^*b^*$ ή Lu^*v^* (§2.3.13), τα οποία μπορούν εύκολα να υπολογισθούν.

Το μοντέλο που παρουσιάζεται σε αυτή την διατριβή, με τον τρόπο που κατασκευάστηκε αφ' ενός εκπληρώνει τις προϋποθέσεις της παραγράφου §7.3, αφ' ετέρου είναι εύχρηστο λόγω της γραμμικότητας του τύπου (7-11).

8. Συμπεράσματα

8.1. Ανακεφαλαίωση της διατριβής

Η μέχρι σήμερα ισχύουσα χρωματομετρία, έχει ορισθεί για την φωτοπική μόνον όραση. Σε αυτή την περιοχή οράσεως δεχόμαστε, ότι ισχύει η προσθετικότητα. Αυτό σημαίνει, ότι το αποτέλεσμα της επιπρόσθεσης δύο ή περισσότερων χρωμο-ερεθισμάτων μπορεί να προβλεφθεί. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να υπολογισθεί με την χρήση ολοκληρωμάτων.

Στην μεσοπική όραση, η προσθετικότητα δεν ισχύει. Το αποτέλεσμα της επιπρόσθεσης δύο ή περισσότερων χρωμο-ερεθισμάτων δεν μπορεί να προβλεφθεί. Η χρήση των ολοκληρωμάτων κατ' αναλογία με αυτά της φωτοπική οράσεως, δίνουν αποτελέσματα, που απέχουν λίγο ως πολύ από το παρατηρούμενο αποτέλεσμα. Αυτό οφείλεται στην σταδιακή επίδραση των ραβδίων στο οπτικό σύστημα. Η κατάσταση αυτή είναι σε μικρό βαθμό σε υψηλά επίπεδα ισχύος, κοντά στην φωτοπική όραση, αλλά σταδιακά εντείνεται, όσο τα επίπεδα προσαρμογής του οφθαλμού πλησιάζουν την σκοτοπική περιοχή. Είναι γνωστό από την καθημερινή μας εμπειρία, ότι όσο το επίπεδο προσαρμογής του οφθαλμού απομακρύνεται από την φωτοπική περιοχή οράσεως και πλησιάζει στην σκοτοπική, τόσο οφθαλμός αδυνατεί να ξεχωρίσει χρώματα. Στην σκοτοπική δε όραση, ή κοντά σε αυτή, ο οφθαλμός τα αντιλαμβάνεται όλα τα αντικείμενα σε διαβαθμίσεις του γκριζου. Η συνήθης χρωματομετρία δεν προβλέπει αυτή την κατάσταση.

Στην παρούσα διατριβή καταβλήθηκε προσπάθεια να επεκταθεί η ισχύς της χρωματομετρίας στην μεσοπική όραση. Αυτό έγινε σε τρία βήματα.

1) Κατασκευάστηκε ένα τετραχρωματικό μοντέλο χρωματομετρίας, κατάλληλο για την μεσοπική περιοχή οράσεως, αλλά που τυπικά να ισχύει σε όλο το εύρος της οράσεως, από την σκοτοπική μέχρι την φωτοπική περιοχή. Για την κατασκευή του μοντέλου αυτού χρησιμοποιήθηκαν οι συνήθεις συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης των 10° (CIE 1964) και η τυποποιημένη σκοτοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας $V'(\lambda)$.

Η ιδέα του τετραχρωματικού αυτού μοντέλου είναι ότι: εφ' όσον στην μεσοπική όραση εισέρχονται και τα σήματα των ραβδίων, πρέπει να εισαχθεί και μια ακόμα ανεξάρτητη μεταβλητή, η οποία ακριβώς να εκφράζει αυτή την συνεισφορά των ραβδίων. Αυτή η επιπλέον μεταβλητή είναι το ποσοστό συμμετοχής ενός τέταρτου πρωτεύοντος χρωμο-ερεθίσματος, το οποίο εισάγεται επί πλέον των τριών της τριχρωματικής χρωματομετρίας. Αυτό το δημιουργηθέν τετραχρωματικό σύστημα επανακτά και εξασφαλίζει την χαμένη

προσθετικότητα στην μεσοπική όραση. Με αυτό το σύστημα, είναι πιά δυνατόν να προβλεφθεί το αποτέλεσμα της επιπρόσθεσης δύο ή περισσότερων χρωμο-ερεθισμάτων στην μεσοπική περιοχή.

Άμεσα συμπεράσματα αυτού του βήματος είναι:

(α) Εφ' όσον τριχρωματικές ταυτίσεις είναι δυνατές σε όλο το εύρος της μεσοπική όρασης, συνεπάγεται ότι τρία είναι τα χρωματικά κανάλια στο οπτικό σύστημα του ανθρώπου.

(β) Εφ' όσον απαιτείται και τέταρτο πρωτεύον για την διατήρηση της προσθετικότητας, συνεπάγεται ότι τα ραβδία δεν δρουν σε ένα ξεχωριστό χρωματικό κανάλι, αλλά μοιράζονται ένα ή περισσότερα κανάλια με τα σήματα από τα κωνία. Η δράση μάλιστα των ραβδίων είναι ανταγωνιστική αυτής των κωνίων.

(γ) Ένα χρωμο-ερέθισμα μπορεί να ορισθεί πλήρως σε όλο το εύρος της οράσεως από την φωτοπική έως την σκοτοπική, με τέσσερις ανεξάρτητες συνιστώσες, σε τέσσερα πρωτεύοντα. Αυτά τα τέσσερα πρωτεύοντα μπορεί να είναι πραγματικά ή φανταστικά και θα δίνουν τέσσερις ανεξάρτητες συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης. Είναι δυνατόν σαν τα τέσσερα πρωτεύοντα να ληφθούν αυτά τα φανταστικά χρωμο-ερεθίσματα, που να δίνουν συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης τις τυποποιημένες $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $V'(\lambda)$ και $z(\lambda)$. Συνεπώς ένα τυχαίο χρωμο-ερέθισμα, μπορεί να ορισθεί πλήρως, αν καθορισθούν οι x και y χρωματικές του συνιστώσες, η φωτοπική του λαμπρότητα (P) και ο λόγος S/P φωτοπική διά σκοτοπική λαμπρότητα.

(δ) Εφ' όσον ένα χρωμο-ερέθισμα καθορίζεται πλήρως από τέσσερις ανεξάρτητες μεταβλητές, συνεπάγεται ότι και κάθε άλλη οπτική δραστηριότητα μπορεί κατ' αρχήν να προσδιοριστεί, με αυτές τις μεταβλητές. Άλλες οπτικές δραστηριότητες μπορεί να είναι, επί παραδείγματι, η οπτική οξύτητα, η αίσθηση της φωτεινότητας, η μεταβολή της διαμέτρου της κόρης κλπ. Ο χρόνος αντίδρασης εν μέρει μόνο μπορεί να καλυφθεί, γιατί είναι ψυχο-κινητικό φαινόμενο.

(ε) Κάθε μία από τις τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης δεν είναι δυνατόν να έχει περιοχές αρνητικού προσήμου, περισσότερες από δύο τον αριθμό. Είναι μάλιστα δυνατόν, να ευρεθούν τέτοια πρωτεύοντα, ώστε να δίνουν τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης θετικές παντού.

(στ) Είναι δυνατόν να ευρεθεί μια τετράδα πραγματικών πρωτευόντων, τέτοια ώστε οι παραγόμενες από αυτά τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης να έχουν όλες την ίδια μέγιστη τιμή, ίση με τη μονάδα. Σε αυτή την περίπτωση: (i) η ισχύς των πρωτευόντων, που απαιτείται για ταύτιση, είναι η ελάχιστη δυνατή και σίγουρα μικρότερη από την ισχύ του δοκιμαστικού χρωμο-ερεθίσματος, και (ii) αυτή η τετράδα πρωτευόντων καλύπτει το μεγαλύτερο εύρος, την μεγαλύτερη γκάμα χρωμο-ερεθισμάτων παραγομένων από τον συνδυασμό τους.

2) Εφόσον η φωτομετρία είναι αναπόσπαστο κομμάτι της χρωματομετρίας, ο δρόμος για μια μεσοπική χρωματομετρία περνάει αναγκαστικά και από την μεσοπική φωτομετρία.

Κατασκευάστηκε ένα φωτομετρικό μοντέλο φασματικής ευαισθησίας του οφθαλμού κατάλληλο για την μεσοπική περιοχή οράσεως. Αυτό έγινε με χρωματομετρική μέθοδο, η οποία για την φωτοπική όραση δίνει προσθετικά αποτελέσματα. Υποτέθηκαν οι ίδιες προϋποθέσεις, που έχουν υποτεθεί και σε άλλα μοντέλα, που προέκυψαν από προσθετικές μεθόδους (πχ. Rea [34], MOVE [35], κλπ). Χάριν απλότητας θεωρήθηκε ότι η μεσοπική λαμπρότητα ενός χρωμο-ερεθίσματος είναι ένας γραμμικός συνδυασμός της φωτοπικής (P) και της σκοτοπικής (S) λαμπρότητάς του. Αυτός ο συνδυασμός όμως παραμετροποιείται με έναν συντελεστή, οποίος εξαρτάται μη γραμμικά από την ισχύ, άρα από την φωτοπική λαμπρότητα και από τον λόγο S/P του φωτο-ερεθίσματος.

Για την ανάγκη απλότητας του μοντέλου, θεωρήθηκε ότι για κάθε φωτο-ερέθισμα, το φωτοπικό όριο είναι το διεθνώς αποδεκτό 3cd/m^2 , και το σκοτοπικό όριο το καθιερωμένο 0.001cd/m^2 . Το μοντέλο αυτό, από τον τρόπο που κατασκευάστηκε, έχει ισχύ για φωτο-ερεθίσματα από $S/P=3$ έως $S/P=0.3$ σε όλο το εύρος της μεσοπικής περιοχής οράσεως. Καλύπτει δηλαδή όλο το εύρος των εμπορικών λαμπτήρων, που χρησιμοποιούνται στον οδοφωτισμό. Τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου είναι συγκρίσιμα με αυτά των άλλων μοντέλων, που επίσης χρησιμοποιούν προσθετικές μεθόδους.

3) Με την βοήθεια λοιπόν του τετραχρωματικού μοντέλου είναι δυνατόν να προσδιορισθεί το χρωμο-ερέθισμα, που προκύπτει από υπέρθεση δύο ή περισσότερων χρωμο-ερεθισμάτων. Το τετραχρωματικό μοντέλο προβλέπει την διατήρηση των ταυτίσεων στην μεσοπική περιοχή, αλλά δεν προβλέπει τίποτα για την μεταβολή της αντιλήψεως του χρώματος ενός χρωμο-ερεθίσματος, στην μεσοπική περιοχή. Η μελέτη αυτού του φαινομένου, αποτελεί το τρίτο και τελευταίο βήμα της παρούσης διατριβής.

Για κάθε τιμή της ισχύος του δοκιμαστικού χρωμο-ερεθίσματος το χρώμα, υπό το οποίο το αντιλαμβανόμαστε, αλλάζει, διότι σε αυτή την ισχύ αντιστοιχούν διαφορετικές τριχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης. Αναγκαστικά λοιπόν οδηγούμαστε στην αναγωγή των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης σε τριχρωματικές, για κάθε τιμή της ισχύος του δοκιμαστικού.

Κατασκευάστηκε ένα τριχρωματικό χρωματομετρικό μοντέλο, το οποίο προκύπτει από το τετραχρωματικό με αναγωγή, για χρήση στην μεσοπική όραση. Η ιδέα είναι να εκφραστεί το ένα από τα τέσσερα πρωτεύοντα συναρτήσει των τριών άλλων, σε κάθε επίπεδο ισχύος στην μεσοπική περιοχή. Το προκύπτον τριχρωματικό σύστημα μεταβάλλεται διαρκώς συναρτήσει της ισχύος.

Προϋποθέσεις για την δημιουργία του μοντέλου είναι:

(α) Στο φωτοπικό όριο οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης πρέπει να ταυτίζονται με τις αντίστοιχες φωτοπικές.

(β) Στο σκοτοπικό όριο πρέπει οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης να παύουν να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, για να δικαιολογηθεί η αβεβαιότητα των χρωματικών ταυτίσεων στην σκοτοπική όραση.

(γ) Τα ολοκληρώματα των συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης πρέπει να είναι ίσα μεταξύ τους στο φωτοπικό και το σκοτοπικό όριο, αλλά όχι αναγκαστικά και ενδιάμεσα. Αυτό, για να προβλεφθεί η αντίληψη της μετατόπισης του Purkinje.

(δ) Η μεταβολή των συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης $x(\lambda)$ και $z(\lambda)$ πρέπει να γίνεται με ανάλογο τρόπο, όπως η μεταβολή της $y(\lambda)$, όπως μελετήθηκε στο προηγούμενο μοντέλο της μεσοπικής λαμπρότητας.

Άμεσα συμπεράσματα του μοντέλου αυτού είναι:

(α) Στο κάτω όριο της μεσοπικής οράσεως όλα τα χρωμοερεθίσματα χάνουν την χρωματικότητά τους και συμπίπτουν με το ισοενεργειακό λευκό, οπότε φαίνονται γκριζα.

(β) Τα ακραία ερυθρά χρωμοερεθίσματα του ορατού φάσματος διατηρούν την χρωματικότητά τους ακόμα και σε πολύ χαμηλά επίπεδα ισχύος, όπου τα επίπεδα προσαρμογής πλησιάζουν την σκοτοπική όραση.

(γ) Στις χαμηλές ενέργειες, οι περιοχές των χρωμοερεθισμάτων που αντιστοιχούν σε πράσινο και κυανο-πράσινο χρώμα, συρρικνώνονται ιδιαίτερα και συγχρόνως μετατοπίζονται προς τις κυανές περιοχές.

(δ) Το ισοενεργειακό χρωμοερέθισμα, το οποίο στην φωτοπική όραση φαίνεται σαν λευκό, στις χαμηλότερες ενέργειες μετατοπίζεται προς το κυανό. Στις πολύ χαμηλές ενέργειες όμως επανέρχεται στο (αχρωματικό) λευκό.

8.2. Συμβολή της διατριβής

Η συμβολή αυτής της διατριβής συνοψίζεται ως εξής:

(α) Επιβεβαιώνεται ο τρόπος που δρουν τα ραβδία. Αυτό συμβάλλει στην καλλίτερη κατανόηση του φαινομένου της ανθρώπινης όρασης.

(β) Αποδεικνύεται ότι κάθε χρωμο-ερέθισμα απαιτεί τέσσερις το πολύ μεταβλητές για τον πλήρη καθορισμό του. Αυτό καθορίζει το πλήθος των παραγόντων που απαιτούνται, για την μοντελοποίηση των διαφόρων οπτικών δραστηριοτήτων (πχ. οπτική οξύτητα, χρόνος αντίδρασης κλπ.).

(γ) Ευρίσκεται τρόπος προσδιορισμού του χρωμο-ερεθίσματος, που προκύπτει από υπέρθεση δύο ή περισσότερων χρωμο-ερεθισμάτων στην μεσοπική όραση. Με αυτόν τον τρόπο λύνεται ένα άλλο μέχρι τότε πρόβλημα: λόγω μη γραμμικότητας στην μεσοπική όραση, δεν ήταν δυνατόν να υπολογισθεί με ακρίβεια το υπέρθεμα δύο ή περισσότερων χρωμο-ερεθισμάτων. Αυτό αναμένεται έχει εφαρμογές στον τρόπο φωτισμού μουσείων και πινακοθηκών, ώστε να αναδεικνύονται πιστικότερα τα χρώματα των εκθεμάτων.

(δ) Ευρίσκεται τετράδα πρωτευόντων χρωμο-ερεθισμάτων, η οποία παρέχει μεταμερικά τη μεγαλύτερη γκάμα παραγομένων χρωμο-ερεθισμάτων με την μικρότερη ενέργεια, σε όλο το εύρος της οράσεως, από την σκοτοπική έως την φωτοπική. Αυτό ίσως είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην κατασκευή αποδοτικότερων μόνιτορ. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να ευρεθούν φθορίζοντα υλικά, τα οποία να εκπέμπουν ακτινοβολίες κοντά στις μονοχρωματικές ελαχίστης ισχύος. Αυτό θα σήμαινε ότι θα είχαν μεγαλύτερη απόδοση σε φωτεινή ισχύ ανά μονάδα ηλεκτρικής ισχύος και συγχρόνως θα απέδιδαν το μεγαλύτερο εύρος (ποικιλία) χρωμάτων, σε μεσοπικές συνθήκες. Ασφαλώς αυτό θα τύχαινε θερμής υποδοχής στις γραφικές τέχνες.

(ε) Υποδεικνύεται τρόπος υπολογισμού της μεσοπικής λαμπρότητας ενός φωτο-ερεθίσματος, που αντιστοιχεί στο παραγόμενο από τους εμπορικούς λαμπτήρες οδοφωτισμού. Με αυτή την μέθοδο μπορεί να επιτευχθεί οικονομία στην κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος στους δρόμους μέσης και χαμηλής κυκλοφορίας. Επί παραδείγματι, σε περιπτώσεις οδοφωτισμού, είναι πλέον δυνατόν να επιλεγεί το είδος του φωτιστικού σώματος εκείνο, για το οποίο η οπτική ικανότητα που μας ενδιαφέρει γίνεται μέγιστη. Αυτό σημαίνει εγκαταστάσεις φωτισμού με λιγότερο κόστος και την ίδια απόδοση, ή με το ίδιο κόστος αλλά με καλλίτερη απόδοση.

(στ) Υποδεικνύεται τρόπος προσδιορισμού της χρωματικότητας ενός χρωμο-ερεθίσματος καθώς μεταβάλλεται η ισχύς του στην μεσοπική όραση. Αυτό θα μπορούσε να γίνει αντικείμενο εκμεταλλεύσεως για κατασκευή διατάξεων (π.χ. για γραφικές τέχνες), όπου τα χρώματα σε μεσοπικές συνθήκες να περιγράφονται ρεαλιστικότερα. Επίσης ο κλάδος των διαφημίσεων και η βιομηχανία παραγωγής κινουμένων σχεδίων στον κινηματογράφο, θα μπορούν να αποδώσουν ρεαλιστικότερα τα χρώματα, όπως φαίνονται σε μεσοπικές συνθήκες. Το έδαφος είναι παρθένο για καινοτόμες εφαρμογές.

8.3. Επέκταση της διατριβής

Πιθανές επεκτάσεις της παρούσης διατριβής θα μπορούσαν να είναι:

(α) Στο μοντέλο μεσοπικής λαμπρότητας να ληφθεί υπ' όψιν τα φωτοπικά και σκοτοπικά όρια των φωτο-ερεθισμάτων με διαφορετικό λόγο S/P, ώστε αυτό το μοντέλο να ισχύει όχι μόνο για τις εμπορικές φωτεινές πηγές, αλλά για κάθε φωτεινή πηγή. Βέβαια με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο θα χάσει την απλότητά του.

β) Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή είναι γραμμικά. Αυτό έγινε για λόγους ευκολίας εφαρμογής τους. Για επιστημονικούς και καθαρά ερευνητικούς λόγους θα μπορούσαν να υιοθετηθούν μή γραμμικά μοντέλα: για την μεσοπική λαμπρότητα, την μεσοπική χρωματικότητα και τελικά συνεπώς και για το τετραχρωματικό. Αυτό μάλιστα το τελευταίο θα ήταν εξαιρετικά ενδιαφέρον να διερευνηθεί.

(γ) Θα ήταν ενδιαφέρον να ελεγχθεί τί είδους μεσοπική χρωματομετρία ισχύει για οπτικό πεδίο 2° αντί 10°. Σε αυτή την περίπτωση η επίδραση των ραβδίων θα είναι ελάχιστη, ενώ θα μπορούσε να αποκαλυφθεί η σχέση αλληλεπιδράσεως των κωνίων μεταξύ τους, στην μεσοπική περιοχή οράσεως.

Βιβλιογραφία

- [1] W. M. M.D. Hart, «*Adler's Physiology of the Eye: Clinical Application*», Mosby–Yearbook Inc., 1992. ISBN 0801621070.
- [2] J. Ferwerda, S. Pattanaik, P. Shirley, D. Greenberg, «*A Model of Visual Adaptation for Realistic Image Synthesis*», <http://www.graphics.cornell.edu>.
- [3] S. Plainis, K. Chauhan, I.J. Murray, W.N. Charman, «*Retinal adaptation under night-time driving conditions*», <http://www.umist.ac.uk/optometry>.
- [4] C. Lilley, F. Lin, W.T. Hewitt, T.L.J. Howard, «*Color in Computer Graphics – Student Notes*», the University of Manchester, 2000.
- [5] Commission Internationale de l' Eclairage, «*Spectral luminous efficiency functions based upon brightness matching for monochromatic point sources, 2° and 10° fields*», publication No. 75, 1978.
- [6] K. Sagawa, «*70 years of photometry*», CIE publication x009-1995.
- [7] J D. B. Judd, «*Report of U.S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight*», In Proceedings of the Twelfth Session of the CIE, Stockholm, vol. 1, 1951.
- [8] J. Vos, «*Colorimetric and Photometric Properties of a 2-deg Fundamental Observer*», Color Research and Application, 3, 125-128, 1978.
- [9] S. Berman, «*Implications of rod sensitivity to interior lighting practice*», CIE publication No. x009-1995.
- [10] Berman, R. Clear, «*Additivity constraints and visual task considerations in mesopic photometry*», Journal of the Illuminating Engineering Society of North America, winter 2001.
- [11] M. Kalloniatis, C. Luu, «*Psychophysics of Vision*», doi.wiley.com /10.1002/glia.20044.
- [12] Commission Internationale de l' Eclairage, «*Light as a true visual quantity: principles of measurement*», publication No. 41, 1978.
- [13] Peter Lennie, «*Luminance*», Journal of the Optical Society of America, Vol. 10, No. 6, June 1993.
- [14] <http://www.yorku.ca/research/vision/eye/flicker.htm>.
- [15] <http://www.yorku.ca/research/vision/eye/bright.htm>.
- [16] <http://www.yorku.ca/research/vision/eye/absothre.htm>.
- [17] <http://www.yorku.ca/research/vision/eye/increthr.htm>.
- [18] <http://www.yorku.ca/research/vision/eye/mdb.htm>.

- [19] <http://webvision.med.utah.edu>, Eye, Vision & Visibility, «*sensitivity of the visual system*».
- [20] M. Bornstein, L. Marks, «*Photopic luminosity measured by the method of critical frequency*», Vision Research, Vol. 12, 1972.
- [21] <http://www.yorku.ca/research/vision/eye/cff.htm>.
- [22] <http://www.yorku.ca/research/vision/eye/electrop.htm>.
- [23] Commission Internationale de l' Eclairage, «*Mesopic photometry. history, special problems and practical solutions*», publication No. 81, 1989.
- [24] W. Adrian, «*Spectral sensitivity of the pupillary system*», Clinical and Experimental Optometry, vol. 86, No 4, pp. 235-238, 2003.
- [25] W. Adrian, «*Equivalence luminance its numerical description and its meaning for the basic visual functions*», CIE publications, x009, 1995.
- [26] D. A. Palmer, «*A system of mesopic photometry*», Nature, vol. 209, pp 276-281, 1966.
- [27] D. A. Palmer, «*Mesopic photometry with non-monochromatic lights*», Journal of the Optical Society of America, vol. 64, 1386. 1974.
- [28] M. Ikeda, H. Shimozono, «*Mesopic luminous-efficiency functions*», Journal of the Optical Society of America, Vol. 71, No. 3, March 1981.
- [29] K. Sagawa, K. Takeichi, «*Spectral luminous efficiency functions for a ten-degree field in the mesopic range*», Journal of Light Vision and Environment, vol 7, pp. 37-44, 1983.
- [30] K. Sagawa, K. Takeichi, «*Spectral luminous efficiency functions in the mesopic range*», Journal of the Optical Society of America A, vol. 3, pp. 71-75, 1986.
- [31] S. Kokoschka, «*Concept and application of the equivalent luminance in photometry*», CIE publication No. x009-1995.
- [32] P. Trezona, «*Equivalent luminance from photopic to scotopic levels*», CIE publication No. x009-1995.
- [33] Y. He, M. Rea, A. Bierman, J. Bullough, «*Evaluating light source efficacy under mesopic conditions using reaction time*», Journal of the Illuminating Engineering Society of North America, Vol. 26, No.1, 1997.
- [34] Rea MS, Bullough JD, Freyssinier-Nova JP, Bierman A. «*A proposed unified system of photometry*». Lighting Research and Technology, 36(2): 85-111, 2004
- [35] Goodman T, Forbes A, Walkey H, Eloholma M, Halonen L, Alferdinck J, Freiding A, Bodrogi P, Varady G, Szalmas A. «*Mesopic visual efficiency IV: a model with relevance to nighttime driving and other applications*». Lighting Research and Technology, 39: 365-392, 2007

- [36] Viikari M, Ekrias A, Eloholma M, Halonen L. «*Modeling spectral sensitivity at low light levels based on mesopic visual performance*». *Clinical Ophthalmology*, 2(1): 173-185, 2008
- [37] Walkey HC, Harlow JA, Barbur JL. «*Characterising mesopic spectral sensitivity from reaction times*». *Vision Research*, 46: 4232-4243, 2006
- [38] H. Davon, «*The Eye*», vol. 2, London, Academic Press, 1962.
- [39] Wyszecki G, Stiles WS. «*Color Science*». New York:John Wiley & Sons;1982. 633 p.
- [40] E. Chichilnisky, B. Wandell «*Trichromatic opponent color classification*», *Vision Research*, 1999.
- [41] P. W. Trezona, «*Rod participation in the Blue mechanism and its effects on color matching*», *Vision Research*. Vol. 10, pp. 317-332, 1970.
- [42] Thornton WA. «*Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part I*». *Color Research and Application*, 17:79-122, 1992
- [43] Thornton WA. «*Toward a more accurate and extensible Colorimetry. Part II*». *Color Research and Application*, 17:162–186, 1992
- [44] Thornton WA. «*Toward a more accurate and extensible Colorimetry. Part III*». *Color Research and Application*, 17:240 –262, 1992
- [45] Thornton WA. «*Toward a more accurate and extensible Colorimetry. Part IV*». *Color Research and Application*, 22:189 –198, 1997
- [46] Thornton WA. «*Toward a more accurate and extensible Colorimetry. Part V*». *Color Research and Application*, 23: 92–103, 1998
- [47] Thornton WA. «*Toward a more accurate and extensible colorimetry. Part VI*». *Color Research and Application*, 23:226 –233, 1998
- [48] Oulton DP. «*The properties of multiple colour matching functions determinations using alternative primary sets. Part I: Evidence and modeling*». *Color Research and Application*, 29(4):438-450, 2004
- [49] Arthur D. Broadbent, «*A Critical Review of the Development of the CIE1931 RGB Color-Matching Functions*», *Color Research and Application*, Vol 29, No 4, August 2004.
- [50] Lozano RD, Palmer DA. «*The additivity of large-field colour matching functions*». *Vision Research*, 7: 929-937, 1967
- [51] P.W. Trezona, R.P. Parkins, «*Derivation of the 1964 colorimetric standards*», *Color Research and Application*, Vol 23, No 4, Aug 1998.

- [52] P.W. Trezona, «*Derivation of the 1964 CIE 10⁰ XYZ Colour-Matching Functions and Their Applicability in Photometry*», Color Research and Application, Vol 26, No 1, Feb 2001.
- [53] G. Wyszecki, W.S. Stiles, «*Color Science*», John Wiley & Sons, 1982. §3.3.4
- [54] G. Wyszecki, W.S. Stiles, «*Color Science*», John Wiley & Sons, 1982. §3.3.9
- [55] <http://cvision.ucsd.edu/database/text/intros/introdichro.htm>.
- [56] G. Wyszecki, W.S. Stiles, «*Color Science*», John Wiley & Sons, 1982.
- [57] D. Farnsworth, «*A temporal factor in colour discrimination*», Visual problems in vision, Vol. II, p. 429, 1958.
- [58] Joseph W. Weinberg, «*The geometry of colors*», General Relativity and Gravitation, Vol 7, No 1, pp 135-169, 1976.
- [59] Ralph W. Pridmore, Manuel Melgosa, «*Effect of Luminance of Samples on Color Discrimination Ellipses: Analysis and Prediction of Data*», Color Research and Application, Vol 30, No 3, June 2005.
- [60] I. Abramov, J. Gordon, «*Color vision in the peripheral retina. I. Spectral sensitivity*», Journal of the Optical Society of America, Vol. 67, No. 2, February 1977.
- [61] J. Gordon, I. Abramov, «*Color vision in the peripheral retina. II. Hue and saturation*», Journal of the Optical Society of America, Vol. 67, No. 2, February 1977.
- [62] Trezona P., «*The tetrachromatic color match as a colorimetric technique*», Vision Research, Vol. 13, pp. 9-25, 1973.
- [63] M. Brill, «*Mesopic color matching. Some theoretical issues*», Journal of the Optical Society of America, Vol. 7, No. 10, October 1990.
- [64] P.W. Trezona, «*Additivity in the tetrachromatic colour matching system*», Vision Research Vol 14, pp 1291-1303, 1974.
- [65] RWG Hunt, «*An improved predictor of colorfulness in a model of color vision*», Color Research and Application, 19, pp 23-26, 1994.
- [66] S. L. Buck, R. F. Knight and J. Bechtold: Vision Research, 40, 3333, 2000
- [67] JC Shin, N Matsuki, H Yaguchi, S Shioiri, «*A Color Appearance Model Applicable in Mesopic Vision*», Optical Review, Vol. 11, No. 4, 272–278, 2004
- [68] JC Shin, N Matsuki, H Yaguchi, S Shioiri, «*Change of Color Appearance in Photopic, Mesopic and Scotopic Vision*», Optical Review, Vol. 11, No. 4, 265–271, 2004
- [69] Ishida T. «*Color Identification Data Obtained from Photopic to Mesopic Illuminance Levels*». Color Research and Application, 27(4): 252-259, 2002

- [70] W.D.Write, «*A colorimetric equipment for research on vision*», Trans. Opt. Soc.,29, 1927-28, p. 225
- [71] K.W.Houser, X.Hu, «*The UNL trichromatic colorimeter*», Color Research and Application, Vol 30, No 3, June 2005.
- [72] G. Wyszecki, W.S. Stiles, «*Color Science*», John Wiley & Sons, p 478, 1982.
- [73] Polymeropoulos G, Bisketzis N, Topalis FV. «*A tetrachromatic model for colorimetric use in mesopic vision*». Υπό εκτύπωση στο Color Research and Application.
- [74] G. Wyszecki, W.S. Stiles, «*Color Science*», John Wiley & Sons, p 368, 1982.
- [75] P.J.Pardo, A.L.Perez, M.I.Suero, «*An example of sex-linked color vision differences*», Color Research and Application, V 32, N 6, 2007.
- [76] F. Perez-Ocon, E.Hita, J.Himenez del Barco, J.L.Nieves, «*Contribution to the Experimental Review of the Colorimetric Standard Observer*», Color Research and Application, Vol 24, No 5, Oct 1999.
- [77] G. Wyszecki, W.S. Stiles, «*Color Science*», John Wiley & Sons, p 345, 1982.
- [78] Beninoff NI, Schneider S, Hood DC. «*Interactions between rod and cone channels above threshold: A test of various models*». Vision Research, 22(9):1133-1140, 1982
- [79] Blick DW, MacLeod DIA. «*Rod threshold: Influence of neighboring cones*». Vision Research, 18(12):1611-1616, 1978
- [80] DeValois. «*A multi-stage color model*». Vision Research, 33:1053-1065, 1993
- [81] Guth SL. «*Model for color vision and light adaptation*». Journal of the Optical Society of America A, 8(6):976-993, 1991
- [82] Alpern M, Lee GB, Maaseidvaag F, Miller SS. «*Colour vision in blue-cone 'monochromacy'*». The journal of Physiology, 212:211-233, 1971
- [83] Michaelides M, Johnson S, Simunovic MP, Bradshaw K, Holder G, Mollon JD, Moore AT, Hunt DM. «*Blue cone monochromatism: A phenotype and genotype assessment with evidence of progressive loss of cone function in older individuals*». Eye, 19:2-10, 2005
- [84] Eisner W, MacLeod DIA. «*Blue-sensitive cones do not contribute to luminance*». Journal of the Optical Society of America A Letters, 70(1):121-123, 1980
- [85] Verdon W, Adams AJ. «*Short-wavelength-sensitive cones do not contribute to mesopic luminosity*». Journal of the Optical Society of America A, 4(1):91-95, 1987
- [86] Naarendorp F, Rice KS, Sieving PA. «*Summation of rod and S-cone signals at threshold in human observers*». Vision Research, 36(17):2681-2688, 1996
- [87] M.H.Brill, «*A theorem on prime-color wavelength*», Color research and application, Vol 21, pp 239-240, 1996
- [88] M.H.Brill, J.A.Worthey, «*Color Matching Functions when one primary wavelength is changed*», Color Research and Application, Vol 32, No 1, Feb 2007.

- [89] Polymeropoulos G, Topalis FV. «*Mesopic spectral sensitivity curves with a colour matching method*». Υπό εκτύπωση στο Lighting Research and Technology.
- [90] W. S. Stiles and J. M. Burch, «*N.P.L. colour-matching investigation: Final report (1958)*», Journal of Modern Optics, 6:1,1 — 26, 1959.
- [91] Trezona PW. «*Theoretical aspects of mesopic photometry and their implication in data assessment and investigation planning*». Color Research and Applications, 23(5): 264-273, 1998
- [92] Μπισκετζής Ν. «*Ανάπτυξη μοντέλου στην μεσοπική όραση*». Διδακτορική διατριβή. ΕΜΠ. Αθήνα, 2009.
- [93] Sagawa K, Takeichi K. «*System of mesopic photometry for evaluating lights in terms of comparative brightness relationships*». Journal of the Optical Society of America A, 9(8): 1240-1246, 1992

Παράρτημα

Φωτομετρικά μεγέθη

Ορατή ακτινοβολία ονομάζεται το τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που ερεθίζει τον οφθαλμό και παράγει την αίσθηση της οράσεως.

Ενέργεια ακτινοβολίας (radiant energy) Q_e ορίζεται ως η ποσότητα ενέργειας που εκπέμπεται, μεταφέρεται ή απορροφάται υπό μορφή ακτινοβολίας από συγκεκριμένη επιφάνεια σε ορισμένο χρόνο.

Ροή ακτινοβολίας (radiant flux, radiant power) Φ_e (μονάδα Watt) ορίζεται ως η ισχύς που ακτινοβολείται, μεταφέρεται ή λαμβάνεται υπό μορφή ακτινοβολίας:

$$\Phi_e = dQ_e/dt$$

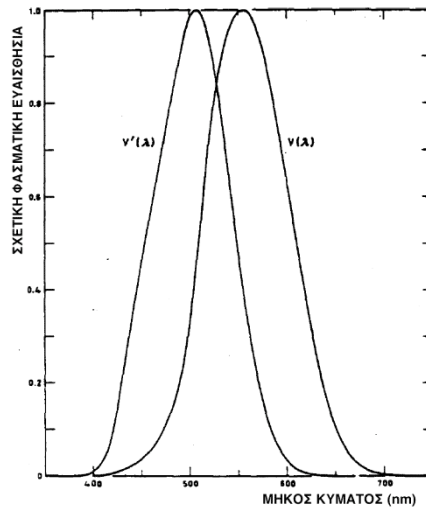
Φασματική ένταση ακτινοβολίας $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ (μονάδα Watt/nm) ορίζεται ως το πηλίκο της ακτινοβολουμένης ισχύος, όταν λαμβάνεται σε ένα απειροστό εύρος μήκους κύματος, δια αυτό το εύρος. Η φασματική συγκέντρωση της ακτινοβολουμένης ισχύος μπορεί να εκφραστεί σαν $d\Phi_e/d\lambda$ και η μονάδα της είναι Watt ανά μέτρο (W/m), και συνήθως συμβολίζεται με $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ και ονομάζεται φασματική κατανομή.

Η ροή ακτινοβολίας συνδέεται με την φασματική ένταση ακτινοβολίας με το ολοκλήρωμα:

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$$

Φασματική ευαισθησία: Η ένταση της αισθήσεως της οράσεως του ανθρώπινου οφθαλμού (spectral luminous efficiency), που παράγεται από μια μονοχρωματική ακτινοβολία εξαρτάται και από το μήκος κύματος αυτής. Για μια μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος λ , είναι ο λόγος της ροής κάποιας άλλης μονοχρωματικής ακτινοβολίας αναφοράς σε μήκος κύματος λ_m , προς την υπό εξέταση ακτινοβολία, έτσι ώστε και οι δύο ακτινοβολίες να παράγουν την ίδια αίσθηση φωτεινότητας κάτω από συγκεκριμένες φωτομετρικές συνθήκες. Το λ_m επιλέγεται έτσι ώστε η μέγιστη τιμή αυτού του λόγου να είναι 1.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι η φασματική ευαισθησία επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες: τον παρατηρητή, την κατάσταση προσαρμογής του οφθαλμού, το άνοιγμα του οπτικού πεδίου και την θέση του ειδώλου της πηγής στον αμφιβληστροειδή. Για να υπάρχει λοιπόν μια σταθερή βάση για την σύγκριση ακτινοβολιών διαφορετικών μηκών κύματος, η CIE υιοθέτησε δύο συναρτήσεις φασματικής ευαισθησίας, που ορίζονται από τιμές σε πίνακες. Η μια είναι η $V(\lambda)$ που εφαρμόζεται στην φωτοπική όραση, και η άλλη είναι η $V'(\lambda)$ για την σκοτοπική. Γραφική παράσταση αυτών των δύο καμπύλων φαίνεται στο σχήμα Π-1.



Σχήμα Π-1. Οι καμπύλες $V(\lambda)$ και $V'(\lambda)$

Τυπικός παρατηρητής της CIE ονομάζεται ένας οποιοσδήποτε ανιχνευτής ακτινοβολίας, ο οποίος συμμορφώνεται με την $V(\lambda)$ (ή την $V'(\lambda)$) για την φωτοπική (ή την σκοτοπική) όραση. Οι ηλεκτρονικοί ανιχνευτές μπορούν να πλησιάζουν πολύ τον τυπικό παρατηρητή με την βοήθεια φίλτρων, ενώ ο ανθρώπινος οφθαλμός μπορεί μόνο προσεγγιστικά, αν είναι φυσιολογικός και πάλι κάτω από ορισμένες συνθήκες. Για την μεσοπική δεν υπάρχει ακόμη οριστικό αποτέλεσμα.

Φωτεινή ροή (luminous flux) Φ_v (φωτοπική), Φ'_v (σκοτοπική) μονάδα lumen ορίζεται ως η ισχύς ακτινοβολίας στην περιοχή του ορατού φάσματος, η οποία για την περίπτωση της φωτοπικής οράσεως (φωτοπική φωτεινή ροή), ορίζεται από το ολοκλήρωμα:

$$\Phi_v = K_m \int_{360nm}^{830nm} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

K_m είναι παράγων κανονικοποίησης, που έχει την τιμή:

$$K_m = 683.002 \text{ lm/W}$$

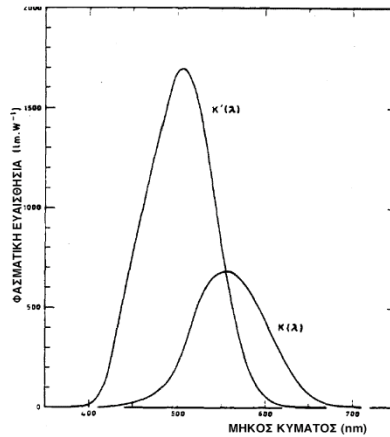
Ομοίως, για την περίπτωση της σκοτοπικής οράσεως (σκοτοπική φωτεινή ροή) από το ολοκλήρωμα:

$$\Phi'_v = K'_m \int_{380nm}^{780nm} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda$$

K'_m είναι παράγων κανονικοποίησης, που έχει την τιμή:

$$K'_m = 1700.06 \text{ lm/W}$$

Γραφική παράσταση των καμπύλων $K(\lambda)$ και $K'(\lambda)$ φαίνεται στο σχήμα Π-2.



Σχήμα Π-2. Οι καμπύλες $K(\lambda) = 683 V(\lambda)$ και $K'(\lambda) = 1700 V'(\lambda)$.

Ένταση ακτινοβολίας (Radiant intensity) I_e (μονάδα Watt/steradian) ορίζεται ως το πηλίκο της ροής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την πηγή και διαδίδεται μέσα σε μια στοιχειώδη στερεά γωνία, προς την στοιχειώδη αυτή στερεά γωνία

$$I_e = d\Phi_e/d\Omega$$

Όπου $d\Omega$ η στοιχειώδης στερεά γωνία.

Φωτοβολία (luminous intensity) I_v (μονάδα candela) ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από την πηγή και διαδίδεται μέσα σε μια στοιχειώδη στερεά γωνία, προς την στοιχειώδη αυτή στερεά γωνία:

$$I_v = d\Phi_v/d\Omega$$

Η φωτοβολία σχετίζεται με την ένταση ακτινοβολίας ως εξής:

$$I_v = K_m \int I_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Μία candela ισοδυναμεί με ένα lumen ανά στερακτίνο.

Η candela στο σύστημα μονάδων SI ορίζεται από το 1979 σαν η φωτοβολία σε δεδομένη διεύθυνση μιας πηγής, που εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία συχνότητας 540×10^{12} Hz και που έχει ένταση ακτινοβολίας σε αυτή την διεύθυνση $1/683$ Watt ανά στερακτίνο.

Ακτινοβολία (radiance) L_e (μονάδα Watt/ (steradian m^2)) ορίζεται ως η ροή ακτινοβολίας, που εκπέμπεται σε μια ορισμένη κατεύθυνση, ανά μονάδα στερεάς γωνίας και ανά μονάδα επιφανείας καθέτου στην κατεύθυνση διαδόσεως:

$$L_e = d\Phi_e/d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta$$

Όπου dA το εμβαδόν στοιχειώδους επιφανείας που περιέχει το συγκεκριμένο σημείο, θ η γωνία μεταξύ της καθέτου στην επιφάνεια και της συγκεκριμένης διεύθυνσεως και $d\Omega$ η στοιχειώδης στερεά γωνία που περιέχει αυτή την διεύθυνση και μέσα στην οποία μια στοιχειώδης ροή ακτινοβολίας $d\Phi_e$ διαδίδεται.

Λαμπρότητα (luminance) L_v (μονάδα candela/m^2) ορίζεται ως η φωτεινή ροή, που εκπέμπεται σε μια ορισμένη κατεύθυνση, ανά μονάδα στερεάς γωνίας και ανά μονάδα επιφανείας καθέτου στην κατεύθυνση διαδόσεως:

$$L_v = d\Phi_v/d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta$$

με την ακτινοβολία συνδέεται με την σχέση:

$$L_v = K_m \int L_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Ισοδύναμη λαμπρότητα (equivalent luminance) L_{eq} μονάδα candela ανά τετραγωνικό μέτρο (cd/m^2) μιας πηγής ονομάζεται η λαμπρότητα μιας πηγής αναφοράς (συνήθως η μονοχρωματική ακτινοβολία συχνότητας 540×10^{12} Hz), που έχει το ίδιο οπτικό αποτέλεσμα με την υπό εξέταση πηγή. Η ισοδύναμη λαμπρότητα χρησιμοποιείται σε ταύτιση φωτεινότητας καθώς και σε μεσοπικές και σκοτοπικές συνθήκες οράσεως.

Επιφανειακή πυκνότητα ακτινοβολίας (irradiance) E_e (μονάδα Watt/m^2) ορίζεται ως η ποσότητα που ορίζεται ως το πηλίκο της ροής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα σημείο μιας επιφάνειας, προς το εμβαδόν αυτής της στοιχειώδους επιφάνειας.

$$E_e = d\Phi_e/dA$$

Όπου dA η στοιχειώδης επιφάνεια.

Φωτισμός (illuminance) E_v (μονάδα lux) ορίζεται ως η ποσότητα που ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία στοιχειώδη επιφάνεια, προς το εμβαδόν αυτής της στοιχειώδους επιφάνειας.

$$E_n = d\Phi_n/dA$$

Όπου dA η στοιχειώδης επιφάνεια.

Φωτισμός αμφιβληστροειδή (retinal illuminance) (μονάδα Troland) ορίζεται ως το γινόμενο της λαμπρότητας επί το εμβαδόν της κόρης του οφθαλμού εκφρασμένης σε mm^2 .

$$1\text{Td} = 1 (\text{cd} / \text{m}^2) 1 \text{mm}^2.$$

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 2-1. Ο οφθαλμός.	5
Σχήμα 2-2. Οι συνδέσεις των κυττάρων του αμφιβληστροειδή.	7
Σχήμα 2-3. Πυκνότητες των φωτο-υποδοχέων συναρτήσει της εκκεντρότητας.	9
Σχήμα 2-4. Προσαρμογή στο φως των κωνίων και των ραβδίων.	10
Σχήμα 2-5. Προσαρμογή στο σκοτάδι σε τρία μεσοπικά επίπεδα και ένα σκοτοπικό.	11
Σχήμα 2-6. Φασματική ευαισθησία των κωνίων.	12
Σχήμα 2-7. Φασματική ευαισθησία των κωνίων σε λογαριθμικό διάγραμμα.	12
Σχήμα 2-8. Ποιοτικό διάγραμμα επεξεργασίας των ηλεκτρικών σημάτων στον οφθαλμό.	13
Σχήμα 2-9. Οι τυποποιημένες φωτοπικές καμπύλες της CIE.	14
Σχήμα 2-10. Δεν ισχύει η αναλογικότητα στην μεσοπική περιοχή οράσεως.	17
Σχήμα 2-11. Ψυχομετρική καμπύλη με τη διαδικασία ναι-όχι.	19
Σχήμα 2-12. Ψυχομετρική καμπύλη με τη διαδικασία 2AFC (αριστερά) και με τη διαδικασία 4AFC (δεξιά).	19
Σχήμα 2-13. Σχήματα Snellen.	22
Σχήμα 2-14. Καθορισμός αποστάσεων και οπτικών πεδίων.	22
Σχήμα 2-15. Η διαφορά καταωφλίου αντιληπτικότητας διαφοράς μήκους κύματος, συναρτήσει του μήκους κύματος.	28
Σχήμα 2-16. Τα αποτελέσματα του ελέγχου της προθετικότητας, κατά τον Guth.	32
Σχήμα 2-18. Το επίπεδο $X+Y+Z = 1$.	37
Σχήμα 2-19. Η προβολή του χρωματικού διαγράμματος στο επίπεδο $X+Y+Z=1$.	38
Σχήμα 2-20. Το χρωματικό διάγραμμα στο επίπεδο $X+Y+Z=1$.	38

Σχήμα 2-21: Οι συσχετισμένες θερμοκρασίες χρώματος σε διάγραμμα συντεταγμένων χρωματικότητας xy.	41
Σχήμα 2-21. Μία από τις πινακίδες του Ishihara (α) όπως την βλέπει ένας κανονικός τριχρωμάτωπας και (β) όπως την βλέπει ένας πρωτόνωπας.	46
Σχήμα 2-22. Σχηματισμός των ελλείψεων του MacAdam.	47
Σχήμα 2-23. Οι ελλείψεις του MacAdam στο χρωματικό διάγραμμα CIE 1931.	48
Σχήμα 2-24. Ομογενής χρωματομετρικός χώρος κατά Farnsworth.	49
Σχήμα 2-25. Οι τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης της Trezona.	52
Σχήμα 4-1. Η πειραματική διάταξη για χρωματικές ταυτίσεις.	56
Σχήμα 4-2. Το φάσμα ανακλάσεως της επίστρωσης στο εσωτερικό των ολοκληρωνόντων χώρων.	56
Σχήμα 4-3. Τριχρωματικές ταυτίσεις των δοκιμαστικών $t_1=520\text{nm}$ και $t_2=419\text{nm}$ σε διάφορα μεσοπικά επίπεδα ισχύος, με πρωτεύοντα τα $R=641.82\text{nm}$, $G=560.5\text{nm}$ και $B=441.2\text{nm}$.	59
Σχήμα 5-1 α, β, γ, δ. Σύγκριση των θεωρητικών $u(\lambda)$, $v(\lambda)$, $p(\lambda)$, $w(\lambda)$ (διακεκομμένες) με τις πειραματικές $R4(\lambda)$, $Y4(\lambda)$, $C4(\lambda)$, $B4(\lambda)$ των δύο παρατηρητών της Trezona (πλήρεις). (α) για $u(\lambda)$ έναντι $R4(\lambda)$, (β) για $v(\lambda)$ έναντι $Y4(\lambda)$, (γ) για $p(\lambda)$ έναντι $C4(\lambda)$, (δ) για $w(\lambda)$ έναντι $B4(\lambda)$.	65
Σχήμα 5-2. Σύγκριση των κλασμάτων ισχύος v/t , u/t , p/t , w/t (πλήρεις) των τετραχρωματικών ταυτίσεων με τις αντίστοιχες τριχρωματικές r/t , g/t , b/t (διακεκομμένες) για το χρωμο-ερέθισμα 451 nm. (α) Για $-v/t$, (β) για u/t έναντι r/t , (γ) για p/t έναντι g/t , (δ) για w/t έναντι b/t .	71

Σχήμα 5-3. Σύγκριση των κλασμάτων ισχύος v/t , u/t , p/t , w/t (πλήρεις) των τετραχρωματικών ταυτίσεων με τις αντίστοιχες τριχρωματικές r/t , g/t , b/t (διακεκομμένες) για το χρωμο-ερέθισμα 500 nm. (α) Για v/t , (β) για u/t έναντι r/t , (γ) για p/t έναντι g/t , (δ) για w/t έναντι b/t	72
Σχήμα 5-4. Σύγκριση των κλασμάτων ισχύος v/t , u/t , p/t , w/t (πλήρεις) των τετραχρωματικών ταυτίσεων με τις αντίστοιχες τριχρωματικές r/t , g/t , b/t (διακεκομμένες) για το χρωμο-ερέθισμα 580 nm. (α) Για p/t , (β) για u/t έναντι r/t , (γ) για v/t έναντι g/t , (δ) για w/t έναντι b/t .	73
Σχήμα 5-5. Χρωματικό διάγραμμα xy (CIE 1964) όπου φαίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες δυνατές τιμές του λόγου S/P (σκοτοπική διά φωτοπική λαμπρότητα). Οι γραμμές παριστάνουν ίσες τιμές του λόγου. (α) οι μέγιστες δυνατές τιμές του S/P, (β) οι ελάχιστες δυνατές τιμές του S/P.	85
Σχήμα 5-6. Το στερεό, που ορίζεται από τα σημεία με συντεταγμένες χρωματικότητας (x, y) και τα όρια της δυνατής κυμάνσεως του λόγου S/P.	86
Σχήμα 5-7. Ο φασματικός τόπος στον χώρο των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικότητας ($u_s(\lambda)$, $v_s(\lambda)$, $w_s(\lambda)$), με πρωτεύοντα τα μονοχρωματικά $\lambda_R = 642\text{nm}$, $\lambda_G = 561\text{nm}$, $\lambda_P = 520\text{nm}$ και $\lambda_B = 441\text{nm}$.	89
Σχήμα 5-8. Το άθροισμα των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης σαν συνάρτηση του μήκους κύματος (λ).	90
Σχήμα 5-9. Ο φασματικός τόπος στον χώρο των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικότητας ($u_s(\lambda)$, $v_s(\lambda)$, $w_s(\lambda)$), με πρωτεύοντα αυτά, που αντιστοιχούν στις συναρτήσεις $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $V'(\lambda)$, $z(\lambda)$.	91
Σχήμα 5-10. Οι τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης με πρωτεύοντα ελάχιστης ισχύος στον τετραχρωματικό χώρο.	93
Σχήμα 5-11. Οι τετραχρωματικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης με πρωτεύοντα ελάχιστης ισχύος στον τριχρωματικό χώρο.	95

Σχήμα 6-1. Τα πειραματικά αποτελέσματα της B συνιστώσας του δοκιμαστικού $Q_3=520\text{nm}$, μαζί με την γραμμή προσαρμογής τους.	103
Σχήμα 6-2. Οι ισχείς των τριών πρωτευόντων για ταύτιση του δοκιμαστικού $Q_1=419.80\text{nm}$ (α) για το R, (β) για το G, (γ) για το B.	105
Σχήμα 6-3. Οι ισχείς των τριών πρωτευόντων για ταύτιση του δοκιμαστικού $Q_2=451\text{nm}$ (α) για το R, (β) για το G, (γ) για το B.	105
Σχήμα 6-4. Οι ισχείς των τριών πρωτευόντων για ταύτιση του δοκιμαστικού $Q_3=500\text{nm}$ (α) για το R, (β) για το G, (γ) για το B.	105
Σχήμα 6-5. Οι ισχείς των τριών πρωτευόντων για ταύτιση του δοκιμαστικού $Q_4=520\text{nm}$ (α) για το R, (β) για το G, (γ) για το B.	106
Σχήμα 6-6. Οι ισχείς των τριών πρωτευόντων για ταύτιση του δοκιμαστικού $Q_5=580\text{nm}$ (α) για το R, (β) για το G, (γ) για το B.	106
Σχήμα 6-7. Διάγραμμα μεταβολής του a_E συναρτήσει της ισχύος. Η ισχύς είναι ($\times 10^{-5} \text{ W/m}^2$).	110
Σχήμα 6-8. Φασματικές κατανομές ισχύος των λαμπτήρων (α) Νατρίου υψηλής πίεσεως SON 250, (β) Υδραργύρου υψηλής πίεσεως Hg 400, (γ) Μεταλλικών αλογονιδίων MH250, (δ) Μεταλλικών αλογονιδίων MH400.	115
Σχήμα 7-1. Οι τιμές των κλασμάτων ισχύος (E_R/E_C , E_G/E_C , E_B/E_C) των τριών πρωτευόντων R, G, B ($\lambda_R=621.00\text{nm}$, $\lambda_G=540.90\text{nm}$ και $\lambda_B=411.95\text{nm}$) για την ταύτιση του δοκιμαστικού C =500 nm. (α) για R, (β) για G, (γ) για B. Τα σημεία που σχηματίζουν οριζόντια ευθεία, είναι οι φωτοπικές τιμές, όπως ευρίσκονται από τον τυπικό παρατηρητή CIE 1964.	123
Σχήμα 7-2. Διάγραμμα των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης για τα πρωτεύοντα R, G, C, B ($\lambda_R=621.00\text{nm}$, $\lambda_G=540.90\text{nm}$, $\lambda_C=500.00\text{nm}$ και $\lambda_B=411.95\text{nm}$).	125

- Σχήμα 7-3. Οι υπολογισθείσες τιμές των « a_{yE} », « a_{xE} » και « a_{zE} », που ορίζονται στις εξισώσεις 7-16 και 7-17. 130
- Σχήμα 7-4. Οι υπολογισμένες τιμές των « a_{yE} », « a_{xE} » και « a_{zE} », όπως ορίζονται στις εξισώσεις 7-22, περιλαμβανομένων των των αντιστοιχών τιμών του συντελεστή « a_E » του μοντέλου του βου κεφαλαίου. 133
- Σχήμα 7-5. Οι μεσοπικές συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης $x_E(\lambda)$, $y_E(\lambda)$, $z_E(\lambda)$ για τα επίπεδα πυκνότητας εκπεμπομένης ακτινοβολίας $1000 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (συνεχής γραμμή), $100 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (διακεκομμένη) και $10 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (διάστικτη) (α) για $x_E(\lambda)$, (β) για $y_E(\lambda)$, (γ) για $z_E(\lambda)$. 134
- Σχήμα 7-6. Οι συντεταγμένες χρωματικότητας x_c και y_c για τρία επίπεδα πυκνότητας εκπεμπόμενης ακτινοβολίας $50 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (εσωτερική γραμμή), $500 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (μεσαία) και $5000 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ (εξωτερική). 134

Πίνακας πινάκων

- Πίνακας 5-1. Οι τιμές των **θεωρητικών** τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης με πρωτεύοντα **R=644nm**, **G=588nm**, **P=509nm** και **B=468nm** (του συστήματος της Trezona) για διάφορα μήκη κύματος (λ). 62
- Πίνακας 5-2. Οι τιμές των **πειραματικών** συναρτήσεων τετραχρωματικής ταύτισης της Trezona, χρησιμοποιώντας τα πρωτεύοντα **R=644nm**, **G=588nm**, **P=509nm** και **B=468nm** για κάθε έναν από τους δύο παρατηρητές (α) και (β). 64
- Πίνακας 5-3. Πειραματικά αποτελέσματα από **τριχρωματικές** ταυτίσεις για το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα **451nm** με πρωτεύοντα **R=641.82nm**, **G=560.5nm** και **B=441.2nm**, από διάφορα ανθρώπινα υποκείμενα. Η ισχύς του δοκιμαστικού (t) και οι ισχύεις των πρωτευόντων είναι σε μονάδες ($\times 10^{-5}$ W/m^2). Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι το πρωτεύον προστίθεται στο δοκιμαστικό. 67
- Πίνακας 5-4. Πειραματικά αποτελέσματα από **τετραχρωματικές** ταυτίσεις για το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα **451nm** με πρωτεύοντα **R=641.82nm**, **G=560.5nm**, **P=520nm** και **B=441.2nm**, από διάφορα ανθρώπινα υποκείμενα. Η ισχύς του δοκιμαστικού (t) και οι ισχύεις των πρωτευόντων είναι σε μονάδες ($\times 10^{-5}$ W/m^2). Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι το πρωτεύον προστίθεται στο δοκιμαστικό. 68
- Πίνακας 5-5. Πειραματικά αποτελέσματα από **τριχρωματικές** ταυτίσεις για το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα **500nm** με πρωτεύοντα **R=641.82nm**, **G=560.5nm** και **B=441.2nm**, από διάφορα ανθρώπινα υποκείμενα. Η ισχύς του δοκιμαστικού (t) και οι ισχύεις των πρωτευόντων είναι σε μονάδες ($\times 10^{-5}$ W/m^2). Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι το πρωτεύον προστίθεται στο δοκιμαστικό. 69

- Πίνακας 5-6. Πειραματικά αποτελέσματα από **τετραχρωματικές** ταυτίσεις για το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα **500nm** με πρωτεύοντα R=641.82nm, G=560.5nm, P=520nm και B=441.2nm, από διάφορα ανθρώπινα υποκείμενα. Η ισχύς του δοκιμαστικού (t) και οι ισχύεις των πρωτευόντων είναι σε μονάδες ($\times 10^{-5}$ W/m²). Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι το πρωτεύον προστίθεται στο δοκιμαστικό. 69
- Πίνακας 5-7. Πειραματικά αποτελέσματα από **τριχρωματικές** ταυτίσεις για το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα **580nm** με πρωτεύοντα R=641.82nm, G=560.5nm και B=441.2nm, από διάφορα ανθρώπινα υποκείμενα. Η ισχύς του δοκιμαστικού (t) και οι ισχύεις των πρωτευόντων είναι σε μονάδες ($\times 10^{-5}$ W/m²). 70
- Πίνακας 5-8. Πειραματικά αποτελέσματα από **τετραχρωματικές** ταυτίσεις για το δοκιμαστικό χρωμο-ερέθισμα **580nm** με πρωτεύοντα R=641.82nm, G=560.5nm, P=520nm και B=441.2nm, από διάφορα ανθρώπινα υποκείμενα. Η ισχύς του δοκιμαστικού (t) και οι ισχύεις των πρωτευόντων είναι σε μονάδες ($\times 10^{-5}$ W/m²). Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι το πρωτεύον προστίθεται στο δοκιμαστικό. 70
- Πίνακας 5-9. Για κάθε σημείο Q(x, y) του χρωματικού διαγράμματος δείχνονται τα μήκη κύματος των δύο χρωμοερεθισμάτων λ_A και λ_B , τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό του Q, καθώς και την αναλογία ενεργειών τους (A/B) και τέλος την **μέγιστη** τιμή του λόγου S/P για το Q. 78
- Πίνακας 5-10. Για κάθε σημείο Q(x, y) του χρωματικού διαγράμματος δείχνονται τα μήκη κύματος των δύο χρωμοερεθισμάτων λ_A και λ_B , τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό του Q, καθώς και την αναλογία ενεργειών τους (A/B) και τέλος την **ελάχιστη** τιμή του λόγου S/P για το Q. 80
- Πίνακας 5-11. Για κάθε σημείο Q'(r, g, b) του τριχρωματικού χώρου δείχνονται τα μήκη κύματος των τριών πρωτευόντων λ_R , λ_G και λ_B , τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της **μέγιστης** τιμής του λόγου S/P για το Q', καθώς και οι ισχύεις τους (r, g, b). 85

Πίνακας 5-12. Τα πρόσημα των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης u , v , p , w κατά μήκος ολόκληρου του ορατού φάσματος, κατά σειρά αυξανόμενου λ . Τα B, P, G, R είναι τα μονοχρωματικά πρωτεύοντα, ενώ τα UV και IR είναι τα ακραία σημεία του ορατού φάσματος.	87
Πίνακας 5-13. Τα πρόσημα των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης u , v , p , w σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες τριχρωματικές κατά μήκος ολόκληρου του ορατού φάσματος, κατά σειρά αυξανόμενου λ . Τα B, P, G, R είναι τα μονοχρωματικά πρωτεύοντα, ενώ τα UV και IR είναι τα ακραία σημεία του ορατού φάσματος.	88
Πίνακας 5-14. Οι τιμές των μεγίστων, των ελαχίστων και των ολοκληρωμάτων των τετραχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης ελάχιστης ισχύος.	93
Πίνακας 5-15. Οι τιμές των μεγίστων, των ελαχίστων και των ολοκληρωμάτων των τριχρωματικών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης ελάχιστης ισχύος με την προσθήκη του τέταρτου πρωτεύοντος P .	94
Πίνακας 6-1. Οι συντελεστές Intercept, Slope και D για τις συνιστώσες R, G, B των δοκιμαστικών Q_i , όπως εμφανίζονται στον τύπο (6-12).	107
Πίνακας 6-2. Οι τιμές του συντελεστή a_E που ευρέθηκαν με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, για διάφορες τιμές της ισχύος (E) σε μονάδες ($\times 10^{-5}$ W/m ²).	109
Πίνακας 6-3. Οι τιμές των τεσσάρων παραμέτρων, που χρησιμοποιήθηκαν για την βελτίωση του a_E , για κάποια μονοχρωματικά χρωμο-ερεθίσματα.	113
Πίνακας 6-4. Σύγκριση των τιμών της μεσοπικής λαμπρότητας (cd/m ²) από το παρόν μοντέλο, με τις αντίστοιχες τιμές από τα μοντέλα των Rea κλπ [34] και MOVE [35] models, για λαμπτήρες Νατρίου Υψηλής Πιέσεως (SON 250), Υδραργύρου Υψηλής Πιέσεως (Hg 400), Μεταλλικών Αλογονιδίων (MH 250 και MH 400), το Ισοενεργειακό Λευκό (EEW) και το CIE D65. Με P συμβολίζεται η φωτοπική λαμπρότητα σε cd/m ² .	116

Πίνακας 7-1. Οι τιμές των τριχρωματικών $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ και τετραχρωματικών $r^{(4)}(\lambda)$, $g^{(4)}(\lambda)$, $c^{(4)}(\lambda)$, $b^{(4)}(\lambda)$ συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης για τα πρωτεύοντα **R**, **G**, **C**, **B** ($\lambda_R=621.00\text{nm}$, $\lambda_G=540.90\text{nm}$, $\lambda_C=500.00\text{nm}$ και $\lambda_B=411.95\text{nm}$). 124

Πίνακας 7-2. Οι τιμές του συντελεστή « a_E » του κεφαλαίου 6 για κάποιες τιμές της πυκνότητας εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (E_C) σε μονάδες 10^{-5} W/m^2 του μονοχρωματικού δοκιμαστικού ($\lambda_C=500\text{nm}$), μαζί με τις αντίστοιχες φωτοπικές (P_C) και μεσοπικές (M_C) λαμπρότητες σε μονάδες cd/m^2 και οι τιμές των συντελεστών « a_{yE} », « a_{xE} » και « a_{zE} » όπως ορίζονται από την εξίσωση 7-16. 130

Πίνακας 7-3. Οι τιμές του συντελεστή « a_E » του μοντέλου του βου κεφαλαίου για διάφορες τιμές της πυκνότητας εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (E_C) σε μονάδες 10^{-5} W/m^2 του μονοχρωματικού δοκιμαστικού χρωμο-ερεθίσματος ($\lambda_C=500\text{nm}$), περιλαμβανομένων και των αντίστοιχων τιμών της φωτοπικής (P_C) και μεσοπικής (M_C) λαμπρότητας σε μονάδες cd/m^2 και των τιμών των τροποποιημένων « a_{yE} », « a_{xE} » και « a_{zE} » συντελεστών, όπως ορίζονται στις εξισώσεις 7-22. 132

Πίνακας 7-4. Η χρωματικότητα του ισοενεργειακού λευκού (EEW) και της λάμπας νατρίου υψηλής πίεσεως. Με «P» αμβολίζεται η φωτοπική λαμπρότητα σε μονάδες cd/m^2 . Με «E» η πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας $\times 10^{-5} \text{ W/m}^2$. Με «S» η σκοτοπική λαμπρότητα σε cd/m^2 . Τα «X», «Z» είναι οι tristimulus τιμές σε cd/m^2 . Τα « Y_E », « X_E », « Z_E » είναι οι μεσοπικές tristimulus τιμές σε cd/m^2 . Τα « x_{CE} », « y_{CE} » είναι οι μεσοπικές συντεταγμένες χρωματικότητας. 137

Πίνακας 7-5. Υπολογισμός των χρωματομετρικών μεγεθών για το χρωμο-ερέθισμα, που προκύπτει από την υπέρθεση των μονοχρωματικών $\lambda_A=600\text{nm}$, $E_A=50 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$, και $\lambda_B=500\text{nm}$, $E_B=50 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$. Η τελευταία στήλη δείχνει ποιά θα ήταν τα χρωματομετρικά μεγέθη, αν ίσχυε ο νόμος της υπέρθεσης του Grassmann. 139