



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

**Ανάπτυξη μοντέλου στην περιοχή της μεσοπικής
οράσεως**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Νικολάου Β. Μπισκετζή

Επιβλέπων καθηγητής: Φραγκίσκος Τοπαλής

Αθήνα 2009



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

Ανάπτυξη μοντέλου στην περιοχή της μεσοπικής οράσεως

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Νικολάου Β. Μπισκετζή

Συμβουλευτική Επιτροπή : Φ. Β. Τοπαλής

Ι. Α. Σταθόπουλος

Σ. Ν. Μανιάς

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 13-11-2009

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Ιωάννης Α. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Στέφανος Ν. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

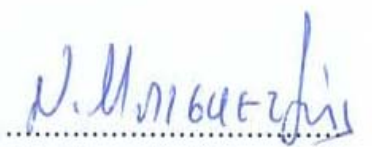
.....
Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Δημήτριος Κουτσούρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Αριστέιδης Τσαγκρασούλης
Επικουρος Καθηγητής
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

.....
Σταυρούλα Καβατζά
Λέκτωρ Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2009



Νικόλαος Β. Μπισκετζής

Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

© , 2009- All rights reserved.

Περίληψη

Αντικείμενο της διατριβής είναι η μελέτη της ανθρώπινης όρασης σε χαμηλά επίπεδα φωτισμού. Το αίσθημα της όρασης προκαλείται από την ενεργοποίηση των φωτοανιχνευτών του ανθρώπινου οφθαλμού, τα κωνία και τα ραβδία. Σε πολύ χαμηλά επίπεδα φωτισμού (έναστρος ουρανό) ενεργά είναι μόνο τα ραβδία και η απόκριση του ανθρώπινου οφθαλμού περιγράφεται από τη σκοτοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου. 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. Στην ενδιάμεση περιοχή, τη μεσοπική, η όραση οφείλεται στη συνδυασμένη δράση κωνίων και ραβδίων. Η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας στη περιοχή αυτή εξαρτάται από τα επίπεδα λαμπρότητας.

Η παρούσα διατριβή έχει δύο στόχους. Ο πρώτος εξετάζει την εξάρτηση της κεντρικής όρασης από τη φασματική κατανομή της φωτίζουσας ακτινοβολίας. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή μετρήσεων με ανθρώπινα υποκείμενα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων πιστοποιούν μια τέτοια εξάρτηση. Ο δεύτερος και κύριος στόχος της διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός νέλου για τη μεσοπική όραση με χρήση πειραματικών μεθόδων που να βασίζονται σε καθαρά οπτικά κριτήρια. Σχεδιάστηκε πρωτότυπη πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή μετρήσεων με ανθρώπινα υποκείμενα. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην ομοιομορφία υποβάθρου και στην αποφυγή ανάμιξης των ακτινοβολιών οι οποίες δημιουργούν το οπτικό υπόβαθρο, το ερέθισμα αναφοράς και το ελεγχόμενο ερέθισμα. Η μαθηματική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων οδήγησε στη κατασκευή ενός μη γραμμικού μοντέλου που περιγράφει την μεσοπική όραση. Το μοντέλο ελέγχθηκε και συγκρίθηκε με άλλα ήδη υπάρχοντα, κυρίως όμως έγινε σύγκριση σε όλα τα επίπεδα με τα γραμμικά μοντέλα. Τέλος γίνεται και εφαρμογή του μοντέλου σε μελέτες φωτισμού δρόμων.

Λέξεις κλειδιά:

Μεσοπική όραση, μεσοπικά μοντέλα, κεντρική όραση, περιφερειακή όραση, οπτική οξύτητα, γραμμικά μοντέλα, φωτισμός δρόμων, προδιαγραφές φωτισμού.

Abstract

The aim of this dissertation was the study of human vision in low lighting levels. The vision sense is provoked by the activation of the photoreceptors of the human eye, cones and rods. At very low lighting levels (clear sky during night) only rods are active and the adaptation level of the human eye is given by the scotopic luminous efficiency function. At high lighting levels (daylight) only cones are active and the adaptation level of the human eye is given by the photopic luminous efficiency function. In the intermediate region, which is named mesopic region, vision sense is due to the activation of both cones and rods. The spectral luminous efficiency function of the human eye in this region is luminance dependent.

The goals of this dissertation are two. The first is to investigate the dependence of the central vision on the spectral power distribution of the lighting source. For this purpose an experimental apparatus was designed in order to make measurements with the help of human observers. The results of these measurements imply such dependence.

The second and primary aim is to develop a model suitable for the mesopic vision, using experimental methods based on purely optical criteria. A novel experimental apparatus was designed in order to make measurements with the help of human observers. There was paid a lot of attention to the uniformity of the background and to the avoidance of the mixture of the radiations which create the background, the reference and the test stimuli. The mathematical elaboration of the results led to the construction of a non linear model which describes the mesopic vision. This model was compared with other models, especially with the linear ones. At last there are applications of this model in street lighting.

Keywords:

Mesopic vision, mesopic model, central vision, peripheral vision, optical acuity, linear models, street lighting, photometrical standards.

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..

Επίσης ιδιαίτερες ευχαριστίες, στον κ. Χ. Κ. Ηλία ο οποίος με ευχαρίστηση αφιέρωσε πάρα πολλές ώρες από τον χρόνο του, για να κατασκευάσει ή να προσφέρει τις γνώσεις και την πείρα του στην κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων της πειραματικής διάταξης.

Ευχαριστώ και τα μέλη των Εργαστηρίων Υψηλών Τάσεων και Φωτοτεχνίας, 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. Γ. Ι. Πολυμερόπουλο και κ. Κ.Α. Μπορούση 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.

Περιεχόμενα.

| | |
|---|----|
| Εισαγωγή | 7 |
| Κεφάλαιο 1: Φυσιολογία του ανθρώπινου οφθαλμού | 11 |
| 1.1 Γενικά χαρακτηριστικά | 11 |
| 1.2 Ειδικά χαρακτηριστικά | 12 |
| 1.2.1 Η κόρη | 12 |
| 1.2.2 Ο Αμφιβληστροειδής | 13 |
| 1.2.3 Φωτοανιχνευτές | 14 |
| 1.2.4 Φακός | 20 |
| 1.3 Φαινόμενα τα οποία χαρακτηρίζουν την λειτουργία του ανθρώπινου οφθαλμού | 21 |
| 1.4 Οπτικές συναρτήσεις που χαρακτηρίζουν τον ανθρώπινο οφθαλμό | 23 |
| 1.5 Μηχανισμοί που εξηγούν την αίσθηση της όρασης | 24 |
| Κεφάλαιο 2: Φωτομετρία | 27 |
| 2.1 Εισαγωγή | 27 |
| 2.2 Κατασκευή των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας | 28 |
| 2.3 Δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά την πειραματική κατασκευή των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας | 30 |
| 2.4 Πειραματικές μέθοδοι | 31 |
| 2.4.1 Οπτικά κατώφλια | 31 |
| 2.4.2 Φωτομετρία μαρμαρυγής (Flicker Photometry) | 34 |
| 2.4.3 Άμεση Ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας (Direct Heterochromatic Brightness Matching) | 35 |
| 2.4.4 Βήμα προς βήμα ταύτιση φωτεινότητας (Step-by-Step Brightness Matching) | 35 |
| 2.4.5 Ελαχιστοποίηση διαχωριστικού ορίου (Minimally Distinct Border) | 36 |

| | | |
|---|---|----|
| 2.4.6 | Οπτική οξύτητα (Visual Acuity) | 36 |
| 2.4.7 | Κρίσιμη συχνότητα μαρμαρυγής (Critical flicker frequency) | 37 |
| 2.4.8 | Συγκρίσεις μεθόδων | 37 |
| 2.5 | Φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού | 38 |
| 2.6 | Προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την χρήση των $V(\lambda)$ και $V'(\lambda)$ | 41 |
| 2.7 | Διόρθωση Judd-Vos | 42 |
| 2.8 | Άλλες καμπύλες σχετικής φασματικής ευαισθησίας | 44 |
| 2.9 | Χρωματομετρία | 45 |
| 2.9.1 | Η τριχρωματική θεωρία | 46 |
| 2.9.2 | Ο τυπικός παρατηρητής (CIE 1931) | 47 |
| 2.9.3 | Φωτεινές πηγές | 49 |
| 2.9.5 | Το διάγραμμα X, Y, Z (CIE 1931) | 49 |
| 2.9.6 | Θερμοκρασία χρώματος | 51 |
| Κεφάλαιο 3: Μεσοπική όραση | | 53 |
| 3.1 | Γενικά | 53 |
| 3.2 | Φαινόμενα που επηρεάζουν την μεσοπική όραση | 54 |
| 3.3 | Ισοδύναμη λαμπρότητα | 55 |
| 3.4 | Προσθετικότητα στην μεσοπική περιοχή | 56 |
| Κεφάλαιο 4: Ανάλυση και συγκριτική αντιπαράθεση των μοντέλων της μεσοπικής όρασης | | 59 |
| 4.1 | Το μοντέλο του S. L. Guth | 60 |
| 4.2 | Το μοντέλο του W. Adrian | 62 |
| 4.3 | Το μοντέλο του S.Kokoschka | 69 |
| 4.4 | Το μοντέλο του I. Lewin | 79 |
| 4.5 | Το μοντέλο του A. Lewis | 82 |
| 4.6 | Το μοντέλο του M. Ikeda | 84 |

| | | |
|---|---|-----|
| 4.7 | Το μοντέλο του K. Sagawa | 89 |
| 4.8 | Το μοντέλο της Palmer | 97 |
| 4.9 | Το μοντέλο P. Trezona | 98 |
| 4.10 | Το μοντέλο του M. Rea | 104 |
| 4.11 | Το πρόγραμμα MOVE | 111 |
| 4.12 | Σύγκριση και σχολιασμός των αναφερθέντων μοντέλων | 115 |
| Κεφάλαιο 5: Θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη μοντέλου στη μεσοπική όραση | | 119 |
| 5.1 | Γενικά | 119 |
| 5.2 | Εξάρτηση της φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού από τη φασματική κατανομή της φωτεινής πηγής | 123 |
| 5.3 | Κατασκευή καμπύλων φασματικής ευαισθησίας στη μεσοπική περιοχή με πειραματική διαδικασία | 127 |
| 5.4 | Κατασκευή καμπύλων φασματικής ευαισθησίας στη μεσοπική περιοχή ως συνάρτηση της φωτοπικής και της σκοτοπικής λαμπρότητας – γραμμικά μοντέλα | 129 |
| 5.5 | Κεντρική όραση | 133 |
| 5.6 | Συμπεράσματα | 134 |
| Κεφάλαιο 6: Μελέτη της κεντρικής όρασης σε μεσοπικές συνθήκες φωτισμού | | 137 |
| 6.1 | Γενικά | 137 |
| 6.2 | Πειραματική διάταξη | 137 |
| 6.3 | Πειραματική διαδικασία. | 142 |
| 6.4 | Παρουσίαση αποτελεσμάτων | 144 |
| 6.5 | Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. | 148 |
| 6.6 | Συμπεράσματα | 149 |
| Κεφάλαιο 7: Διαμόρφωση μοντέλου για τη μεσοπική όραση | | 151 |
| 7.1 | Συνθήκες που πρέπει να ικανοποιεί ένα μοντέλο για τη μεσοπική όραση | 151 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.2 | Η μορφή του μοντέλου της μεσοπικής όρασης | 153 |
| 7.3 | Πειραματική διάταξη | 157 |
| 7.3.1 | Περιγραφή | 157 |
| 7.3.2 | Χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης | 159 |
| 7.3.3 | Όργανα μέτρησης | 161 |
| 7.3.4 | Φωτεινές πηγές | 161 |
| 7.3.5 | Οπτικά φίλτρα | 162 |
| 7.3.6 | Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας | 162 |
| 7.3.7 | Καθορισμός των χαρακτηριστικών των λαμπτήρων που χρησιμοποιήθηκαν | 163 |
| 7.4 | Έλεγχος της πειραματικής διάταξης | 166 |
| 7.5. | Πειραματικά αποτελέσματα | 171 |
| 7.6 | Πρόταση μοντέλου για τη μεσοπική όραση | 194 |
| 7.7 | Έλεγχος συμφωνίας πειραματικών δεδομένων και θεωρητικά υπολογισμένων τιμών | 204 |
| 7.8 | Έλεγχος συμπεριφοράς του μοντέλου στη μεσοπική περιοχή | 207 |
| 7.9 | Ανάλυση του μοντέλου | 212 |
| 7.9.1 | Υπολογισμός μεσοπικής λαμπρότητας. | 214 |
| 7.9.2 | Σχέσεις μεσοπικής και φωτοπικής λαμπρότητας για τους τρεις τύπους λαμπτήρων | 216 |
| 7.9.3 | Μέθοδος αντικατάστασης ενός εκ των τριών μελετηθέντων λαμπτήρων σε μια εφαρμογή με οποιοδήποτε άλλο λαμπτήρα ώστε να επιτυγχάνονται τα ίδια οπτικά αποτελέσματα | 222 |
| 7.9.4 | Εύρεση της σχέσης μεσοπικής και φωτοπικής λαμπρότητας για οποιοδήποτε λαμπτήρα | 223 |
| 7.9.5 | Παραδείγματα εφαρμογής του μοντέλου σε περιπτώσεις φωτισμού δρόμων | 228 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 7.9.5.1 | Παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου σε μελέτη φωτισμού δρόμου που δείχνει την ανάγκη αναμόρφωσης των προδιαγραφών | 228 |
| 7.9.5.2 | Παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου σε μελέτη φωτισμού δρόμου, με χρήση των διεθνών προδιαγραφών | 232 |
| Κεφάλαιο 8: | Σχολιασμός του μοντέλου | 235 |
| 8.1 | Σύγκριση με τα μοντέλα άλλων ερευνητών | 235 |
| 8.1.1 | Σύγκριση ισοδυνάμων λαμπροτήτων HPS/MH | 235 |
| 8.1.2 | Σύγκριση των τιμών μεσοπικής λαμπρότητας οι οποίες δίνονται από τα τρία μοντέλα συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας | 238 |
| 8.1.3 | Σύγκριση του τρόπου μεταβολής της ροής κατά τη μετάβαση από τη φωτοπική στη σκοτοπική όραση | 246 |
| 8.1.4 | Σύγκριση χρηστικότητας των μοντέλων | 257 |
| Κεφάλαιο 9: | Συμπεράσματα | 259 |
| 9.1 | Ανακεφαλαίωση της διατριβής | 259 |
| 9.2 | Συμβολή της διατριβής | 264 |
| 9.3 | Επέκταση της διατριβής | 266 |
| | Βιβλιογραφία | 267 |
| | Παράρτημα I: Εισαγωγή | 275 |
| I.1 | Βασικές έννοιες και μεγέθη της ραδιομετρίας | 275 |
| I.2 | Βασικές έννοιες και μεγέθη του τυποποιημένου φωτομετρικού συστήματος | 278 |
| | Πίνακας σχημάτων | 283 |
| | Πίνακας πινάκων | 293 |

Εισαγωγή

Το αίσθημα της όρασης προκαλείται από τα αισθητήρια (φωτοανιχνευτές) του ανθρώπινου οφθαλμού. Αυτά κατατάσσονται σε δύο τύπους: τα κωνία και τα ραβδία. Τα ραβδία διακρίνονται για την πολύ μεγάλη ευαισθησία τους με αποτέλεσμα να διεγείρονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα φωτισμού (π.χ. έναστρος ουρανός) ενώ η απόκρισή τους φθάνει στον κορεσμό όταν αυξηθεί ο φωτισμός. Η όραση που οφείλεται στα ραβδία ονομάζεται σκοτοπική. Τα κωνία διεγείρονται σε σχετικά υψηλότερα επίπεδα φωτισμού (φως ημέρας) και η όραση που οφείλεται σε αυτά ονομάζεται φωτοπική, δηλαδή υπό συνθήκες φωτός, φυσικού ή τεχνητού. Στα κωνία οφείλεται πρακτικά η όραση του ανθρώπου.

Όταν αρχίζει να αυξάνεται το επίπεδο φωτισμού τότε αρχίζει σταδιακά να μεταπίπτει η όραση από σκοτοπική σε φωτοπική. Αυτή η ενδιάμεση περιοχή ονομάζεται μεσοπική. Τα ραβδία δεν έχουν φτάσει στον κορεσμό ενώ τα κωνία αρχίζουν να ενεργοποιούνται. Άρα στη μεσοπική όραση μετέχουν και οι δύο τύποι αισθητήρων, τα ραβδία και τα κωνία.

Το γεγονός ότι η ανθρώπινη όραση είναι κυρίως φωτοπική οδήγησε τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE) στην τυποποίηση ενός φωτομετρικού συστήματος την εποχή του μεσοπολέμου που βασίζεται αποκλειστικά στη φωτοπική όραση. Η τυποποίηση αυτή έγινε αποδεκτή από όλους τους οργανισμούς τυποποίησης με συνέπεια όλα τα φωτομετρικά μεγέθη, οι εφαρμογές του φωτισμού και λειτουργία των οργάνων μέτρησης φωτισμού να βασίζονται στη φωτοπική όραση.

Τα τελευταία χρόνια άρχισαν να διατυπώνονται αμφιβολίες για το κατά πόσον η εφαρμογή του τυποποιημένου φωτομετρικού συστήματος σε συνθήκες μεσοπικού φωτισμού δίνει αποτελέσματα σύμφωνα με αυτά που αντιλαμβάνεται στην πραγματικότητα ο παρατηρητής. Η αμφιβολία αυτή έχει λογική βάση διότι το τυποποιημένο φωτομετρικό σύστημα βασίζεται αποκλειστικά στη φωτοπική όραση.

Οι αμφιβολίες αυτές έχουν εγερθεί μετά από παρατηρήσεις, και μετρήσεις στην περιοχή της μεσοπικής όρασης. Επίσης μπορεί να αμφισβητηθεί και η καταλληλότητα των οργάνων μέτρησης, εφ' όσον αυτά είναι βαθμονομημένα σύμφωνα με το

τυποποιημένο φωτομετρικό σύστημα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το επίπεδο φωτισμού δρόμων, μικρής και μεσαίας κυκλοφορίας, εντάσσεται στη μεσοπική περιοχή. Εγείρεται επομένως το ερώτημα εάν ο φωτισμός που μετράται στους δρόμους είναι αυτός που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής ή είναι κάτι διαφορετικό, λιγότερο ή περισσότερο. Δυστυχώς, οι παρατηρήσεις πιστοποιούν την άποψη, ότι αυτό που μετράται στους δρόμους με την χρήση οργάνων, βαθμονομημένων με το τυποποιημένο φωτομετρικό σύστημα, δεν είναι αυτό που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής.

Η διαφοροποίηση της ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού στη μεσοπική όραση πιστοποιήθηκε πρώτα από την J. Kinney το 1958. Στην συνέχεια αρκετοί ερευνητές εργάστηκαν στον τομέα αυτόν. Όμως δεν έχει καταστεί δυνατή η κατασκευή ενός μοντέλου, γενικώς αποδεκτού, για τη μεσοπική όραση. Τα μοντέλα που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα, έχουν μελετηθεί διεξοδικά, στα πλαίσια της παρούσης διδακτορικής διατριβής. Έχουν εντοπισθεί οι αδυναμίες και οι ασυνέπειες τις οποίες παρουσιάζει το κάθε μοντέλο. Ιδιαίτερα έχει εντοπισθεί η εξάρτηση του κάθε μοντέλου από την ακολουθούμενη πειραματική μέθοδο. Αυτό έχει ως συνέπεια τα αποτελέσματα που δίνει η εφαρμογή του κάθε μοντέλου να παρουσιάζουν σοβαρές αποκλίσεις μεταξύ τους.

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί τα μοντέλα των Rea και του προγράμματος MOVE. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε μετρήσεις χρόνων αντίδρασης. Ένα κριτήριο όχι καθαρά οπτικό. Οι φωτεινές πηγές ταξινομούνται με βάση το λόγο σκοτοπικής προς φωτοπική λαμπρότητα. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζουν αυτά τα δύο μοντέλα είναι αρκετά μεγάλες.

Επίσης στη κεντρική όραση, δηλαδή οπτικό πεδίο μέχρι δύο μοίρες, σύμφωνα με τη φυσιολογία του ανθρώπινου οφθαλμού, δεν θα έπρεπε να υφίσταται μεσοπική όραση, υπό την έννοια που θεωρείται μέχρι τώρα. Υπάρχουν όμως πειράματα στη βιβλιογραφία που υποδεικνύουν το αντίθετο.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει δύο στόχους. Ο πρώτος δίνει απάντηση στο ερώτημα, αν στη κεντρική όραση είναι δυνατό κάποιο είδος μεσοπικής όρασης που θα οφείλεται σε διαφορετικές αιτίες από αυτές που οφείλεται η περιφερειακή μεσοπική όραση. Για το σκοπό αυτό έγινε σειρά πειραμάτων τα οποία εξετάζουν την επίδραση της φασματικής κατανομής της φωτίζουσας ακτινοβολίας στη κεντρική όραση, σε μεσοπικά

επίπεδα φωτισμού. Αυτή η εξάρτηση, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 6, οδηγεί στη αποδοχή της κεντρικής μεσοπικής όρασης.

Ο δεύτερος και κύριος στόχος της διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου για τη μεσοπική όραση με χρήση πειραματικών μεθόδων που να βασίζονται σε καθαρά οπτικά κριτήρια, σε αντίθεση με τα μοντέλα Rea και MOVE που χρησιμοποιούν μη οπτικά κριτήρια. Προς τούτο, χρησιμοποιούνται προσθετικές μέθοδοι ταύτισης λαμπροτήτων. Με τον όρο προσθετικές, εννοείται ότι αν ένα οπτικό ερέθισμα A προκαλεί οπτική ανταπόκριση α και ένα οπτικό ερέθισμα B προκαλεί οπτική ανταπόκριση β , τότε το οπτικό ερέθισμα $A+B$ θα προκαλεί οπτική ανταπόκριση $\alpha+\beta$. Το προτέρημα των προσθετικών μεθόδων είναι ότι τα αποτελέσματα των ταυτίσεων δεν εξαρτώνται από το χρωματισμό του οπτικού ερεθίσματος. Σχεδιάστηκε πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή μετρήσεων με ανθρώπινα υποκείμενα. Στη διάταξη αυτή δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην ομοιομορφία υποβάθρου και στην αποφυγή ανάμιξης των ακτινοβολιών οι οποίες δημιουργούν το οπτικό υπόβαθρο, το ερέθισμα αναφοράς και το ελεγχόμενο ερέθισμα. Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας επεξεργάστηκαν και οδήγησαν στη κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου που να περιγράφει την μεσοπική όραση.

Το μοντέλο ελέγχθηκε και συγκρίθηκε με άλλα ήδη υπάρχοντα, κυρίως όμως έγινε σύγκριση σε όλα τα επίπεδα με τα γραμμικά μοντέλα. Επίσης γίνεται και εφαρμογή του μοντέλου σε μελέτες φωτισμού δρόμων.

Η διατριβή είναι διαρθρωμένη σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος (κεφάλαια 1 έως 4) συγκεντρώνονται όλα τα καταρχήν απαραίτητα στοιχεία για την έρευνα στη μεσοπική περιοχή. Αυτό γιατί το αντικείμενο είναι πολύ ειδικό και η εύρεση της κατάλληλης βιβλιογραφίας και θεματολογίας αρκετά δύσκολη. Η συγκέντρωση αυτών των στοιχείων, η αξιολόγηση και η ταξινόμησή τους αποδείχθηκαν πολύ χρονοβόρα και κοπιώδη. Στο δεύτερο μέρος (κεφάλαια 5 έως 9) αναπτύσσεται η πρόταση της διδακτορικής διατριβής.

Πιο συγκεκριμένα η διάρθρωση της παρούσας πρότασης διδακτορικής διατριβής είναι η εξής:

Στα κεφάλαια 1 και 2 αναφέρονται τα βασικά στοιχεία φυσιολογίας και φωτομετρίας αντίστοιχα.

Στο κεφάλαιο 3 ορίζεται η μεσοπική όραση καθώς και οι παράμετροι που την επηρεάζουν.

Στο κεφάλαιο 4 εξετάζονται και συγκρίνονται οι κυριότερες εργασίες ερευνητών που έχουν γίνει στην μεσοπική όραση.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται μια θεωρητική ανάλυση της μεσοπικής όρασης. Στα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης εδράζεται η ανάπτυξη του μοντέλου της διατριβής.

Στο κεφάλαιο 6 μελετάται πειραματικά η κεντρική όραση σε μεσοπικές συνθήκες. Περιγράφεται η πειραματική διάταξη, δίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα και διατυπώνονται τα επιμέρους συμπεράσματα.

Στο κεφάλαιο 7 περιγράφονται οι θεωρητικές συνθήκες τις οποίες πρέπει να πληροί ένα μοντέλο μεσοπικής όρασης. Περιγράφεται η πειραματική διάταξη και διαδικασία. Δίνονται τα αποτελέσματα και αναπτύσσεται το προτεινόμενο μοντέλο για τη μεσοπική περιοχή. Ελέγχεται η συμπεριφορά του στη μεσοπική περιοχή και δίνονται παραδείγματα εφαρμογής του.

Στο κεφάλαιο 8 γίνεται σχολιασμός του μοντέλου και σύγκριση με τα μοντέλα άλλων ερευνητών.

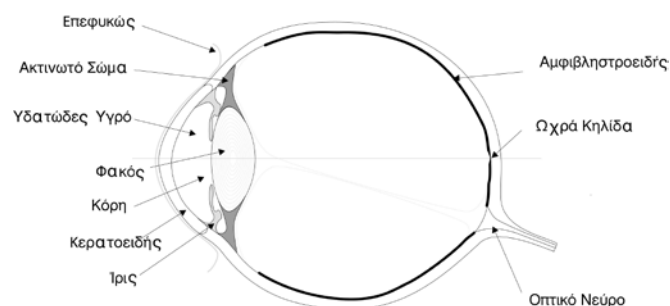
Στο κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διατριβής.

Τέλος στο παράρτημα αναφέρονται οι βασικές έννοιες, μεγέθη και μονάδες της φωτομετρίας.

Κεφάλαιο 1: Φυσιολογία του ανθρώπινου οφθαλμού

Η μελέτη της ανθρώπινης όρασης, από φυσική σκοπιά, προϋποθέτει γνώση της κατασκευής του ανθρώπινου οφθαλμού. Η πλήρης εξήγηση της λειτουργίας της ανθρώπινης όρασης δεν έχει γίνει δυνατή μέχρι σήμερα. Το είδος της συνεισφοράς κάθε τμήματος του οφθαλμού στην διαδικασία της όρασης έχει καθορισθεί, αλλά δεν είναι γνωστός ο ακριβής μηχανισμός με την βοήθεια του οποίου δημιουργείται το αίσθημα της όρασης.

1.1 Γενικά χαρακτηριστικά



Σχήμα 1.1 Ο ανθρώπινος οφθαλμός [1].

Στον ανθρώπινο οφθαλμό [1] διακρίνουμε τρία ομόκεντρα στρώματα, τούς χιτώνες (σχήμα 1.1). Αυτοί είναι οι εξής:

A) Ο Εξωτερικός ή Ινώδης χιτώνας ο οποίος χωρίζεται:

- στον κερατοειδή χιτώνα και
- στον σκληρό χιτώνα.

B) Ο Μέσος χιτώνας ο οποίος χωρίζεται σε τρία μέρη:

- Το χοροειδές, η κύρια λειτουργία του οποίου είναι η διατροφή των εξωτερικών στρωμάτων του αμφιβληστροειδούς.
- Το ακτινωτό σώμα, η κύρια λειτουργία του οποίου μεταβάλλει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φακού, του ανθρώπινου οφθαλμού, ώστε να είναι δυνατή η εστίαση του ειδώλου επίσης παράγει το υδατώδες υγρό στο εξωτερικό διαμέρισμα του οφθαλμού. Το υδατώδες υγρό βοηθά στην διάθλαση και στο φιλτράρισμα του φωτός.

- Την ίριδα, η οποία μέσω της μεταβολής της διαμέτρου της κόρης, ελέγχει την ποσότητα του φωτός που εισέρχεται στον οφθαλμό και βοηθά στην αύξηση του βάθους της εστίασεως.

Γ) Ο Εσωτερικός ή Νευρίνος χιτώνας, ο οποίος διαιρείται

- στον αμφιβληστροειδή χιτώνα και
- στην ζήνναιο Ζώνη.

1.2 Ειδικά χαρακτηριστικά

Στην συνέχεια εξετάζονται τα ειδικά χαρακτηριστικά των τμημάτων του ανθρώπινου οφθαλμού, τα οποία έχουν κεντρικό ρόλο στην δημιουργία της όρασης. Η θεώρηση τους γίνεται κάτω από το πρίσμα των φυσικών τους χαρακτηριστικών, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο προσδιορίζουν την απόκριση του οφθαλμού σε ένα εξωτερικό ερέθισμα.

1.2.1 Η κόρη

Η διάμετρος της κόρης αλλάζει κατά κύριο λόγο αναλόγως προς τον διάχυτο φωτισμό. Η συστολή και η διαστολή της κόρης δεν γίνεται με το ίδιο ρυθμό. Η κόρη είναι δυνατόν να συσταλθεί σε δευτερόλεπτα, αλλά για την διαστολή της απαιτούνται λεπτά. Η συστολή είναι εντονότερη όταν ο φωτισμός είναι πλούσιος σε μικρά μήκη κύματος. Η οριζόντια διάμετρος μπορεί να μεταβληθεί από 2 mm έως 8 mm. Η επιφάνειά της δηλαδή μπορεί να μεταβληθεί με λόγο 1:16, με συνέπεια η φωτεινή ροή που εισέρχεται στον οφθαλμό να μεταβάλλεται κατά το ίδιο ποσό. Η μεταβολή της διαμέτρου της κόρης συντελεί στην διόρθωση των οπτικών σφαλμάτων του οφθαλμού. Σε ισχυρό φωτισμό συστέλλεται η κόρη, έτσι ώστε ο οφθαλμός να χαρακτηρίζεται από περισσότερη ευκρίνεια. Σε χαμηλό όμως φωτισμό, όπου πιο σημαντική είναι η αντίχνευση των αντικειμένων παρά η ευκρίνεια των ειδώλων τους και η ανάλυση της εικόνας, η κόρη διαστέλλεται, για να δεχθεί ο οφθαλμός περισσότερο φως.

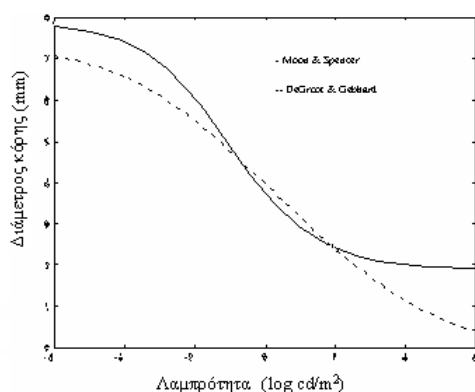
Ο τρόπος με το οποίο μεταβάλλεται η διάμετρος της κόρης σε σχέση με την λαμπρότητα έχει μελετηθεί πειραματικά, και έχουν εξαχθεί εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες περιγράφουν το φαινόμενο. Αυτές είναι:

Moon & Spencer [2]: $D = 4.9 - 3 \tanh[0.4(\log L + 1.0)]$

DeGroot & Gebgard [3]: $D = 10^{[0.8558 - 0.000401 \cdot (\log L + 8.6)^3]}$

όπου D η διάμετρος της ανθρώπινης κόρης και L η λαμπρότητα στην οποία εκτίθεται.

Οι γραφικές τους παραστάσεις δίδονται στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 Διάμετρος κόρης σε σχέση με την λαμπρότητα [4].

1.2.2 Ο Αμφιβληστροειδής

Στον αμφιβληστροειδή από άποψη φυσιολογίας διακρίνουμε:

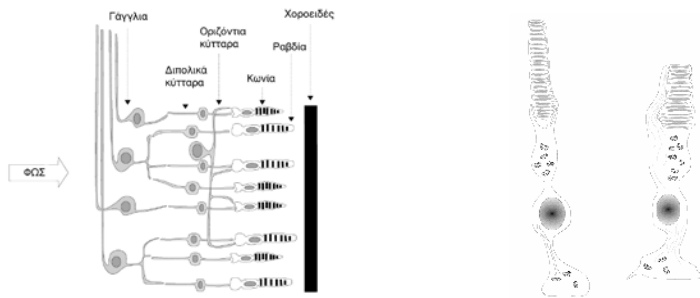
- Το τυφλό σημείο, το σημείο όπου καταλήγει το οπτικό νεύρο, σε αυτή την περιοχή δεν υπάρχουν φωτοευαίσθητα κύτταρα και
- Την ωχρά κηλίδα, μία λέπτυνση στον Αμφιβληστροειδή διαμέτρου 1.5 mm. Το κεντρικό μέρος της Ωχράς κηλίδας (διαμέτρου 0.4 mm) είναι η περιοχή όπου η όραση είναι περισσότερο ευκρινής και η χρωματική αντίληψη η καλύτερη δυνατή.

Ο Αμφιβληστροειδής είναι η περιοχή του οφθαλμού, στην οποία ευρίσκονται τα φωτοευαίσθητα κύτταρα (φωτοανιχνευτές). Τα κύτταρα αυτά είναι εξειδικευμένα νευρικά κύτταρα, τα οποία έχουν εξελικτική και μορφολογική σχέση με τα εγκεφαλικά κύτταρα. Τα φωτοευαίσθητα κύτταρα σε αντίθεση με τα άλλα νευρικά κύτταρα, τα οποία παράγουν σήματα σε ψηφιακή (ναι-όχι) μορφή, παράγουν σήματα αναλογικά, εξαρτώμενα από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τα φωτοευαίσθητα κύτταρα είναι στραμμένα προς το χοροειδές το οποίο έχει χαμηλό συντελεστή ανάκλασης, εξουδετερώνοντας τις εσωτερικές ανακλάσεις. Οι φωτοανιχνευτές είναι συνδεδεμένοι μέσω διπολικών κυττάρων με τα γάγγλια

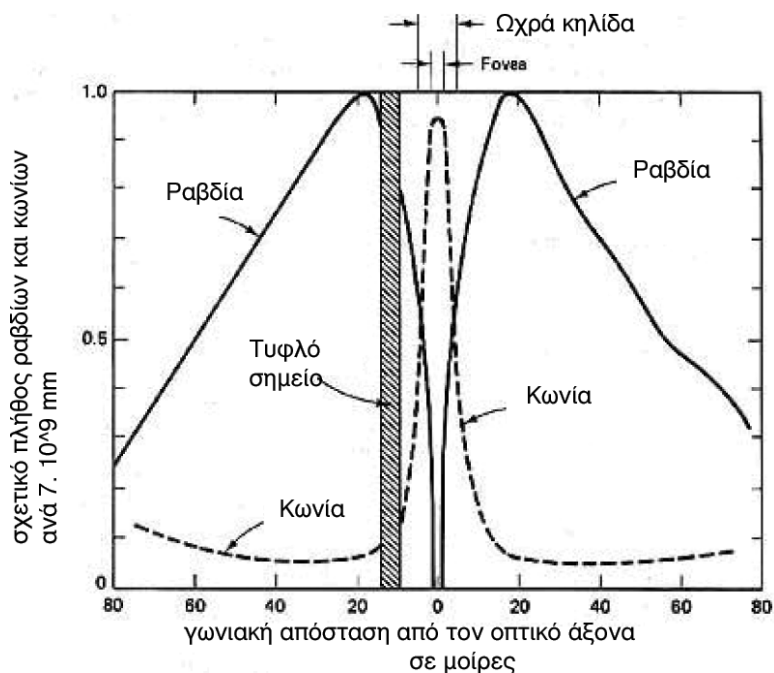
(νευρικά κύτταρα). Υπάρχουν επίσης και τα οριζόντια κύτταρα, τα οποία συνδέουν μικρές ομάδες φωτοανιχνευτών.

1.2.3 Φωτοανιχνευτές

Οι φωτοανιχνευτές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα ραβδία και τα κωνία. Η κατασκευή τους είναι παρόμοια. Αποτελούνται από ένα κεντρικό πυρήνα, πολλά μιτοχόνδρια για την παροχή χημικής ενέργειας, και μία συστοιχία από δίσκους, που περιέχουν την φωτοευαίσθητη χρωστική. Η μορφή τους και η διάταξη τους φαίνονται στο σχήμα 1.3. Η κατανομή τους δεν είναι ομοιόμορφη. Στο σχήμα 1.4 φαίνεται η κατανομή των ραβδίων και κωνίων στον ανθρώπινο οφθαλμό.



Σχήμα 1.3 Διάταξη και μορφή των φωτοανιχνευτών [1].



Σχήμα 1.4 Κατανομή ραβδίων-κωνίων [1].

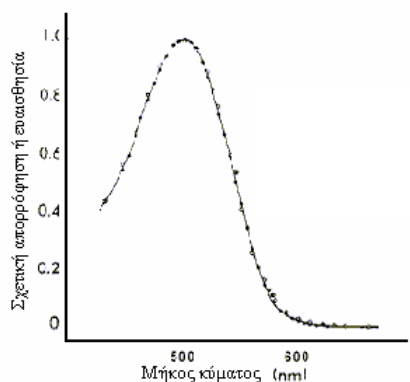
Ραβδία

Τα ραβδία έχουν πολύ χαμηλά κατώφλια ενεργοποίησης, αλλά φθάνουν στην μέγιστη απόδοσή τους σε μέτρια επίπεδα φωτισμού. Περαιτέρω αύξηση του φωτισμού δεν επιδρά στην απόδοσή τους, επέρχεται κορεσμός. Ο κορεσμός αρχίζει από λαμπρότητες 10 cd/m^2 περίπου και ολοκληρώνεται στις 300 cd/m^2 .

Η χρωστική των ραβδίων είναι η ροδοψίνη. Ραβδία δεν υπάρχουν στην ωχρά κηλίδα. Η πυκνότητά τους αρχίζει να αυξάνεται μόλις έξω από αυτήν και δεν παρουσιάζει κυκλική συμμετρία. Οι υψηλότερες πυκνότητες ραβδίων παρατηρούνται κατά μήκος ενός ελλειπτικού δακτυλίου σε γωνιακή απόσταση 20° από τον οπτικό άξονα και είναι περίπου $176.000 \text{ ραβδία/mm}^2$. Το συνολικό πλήθος των ραβδίων στον οφθαλμό είναι 10^8 .

Είναι συνδεδεμένα κατά χιλιάδες πάνω στην ίδια νευρική απόληξη. Αυτό το είδος συνδέσεως επιτρέπει μόνο χαμηλής ποιότητας οπτική ευκρίνεια. Παράλληλα όμως αυτό το είδος σύνδεσης αυξάνει την ικανότητα αντίληψης κίνησης.

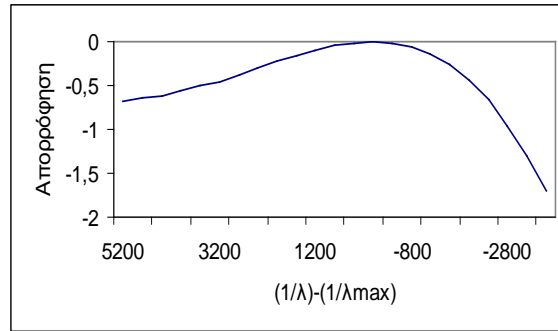
Στο σχήμα 1.5 απεικονίζεται το φάσμα απορρόφησης της ροδοψίνης μετρημένη σε αιώρημα από ραβδία, συγκρινόμενη με αυτήν που συνάγεται από μετρήσεις φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού στη σκοτοπική περιοχή. Οι τελευταίες μετρήσεις περιλαμβάνουν είτε μετρήσεις διορθωμένες για σφάλματα φακού, είτε μετρήσεις οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί σε οφθαλμούς χωρίς φακούς.



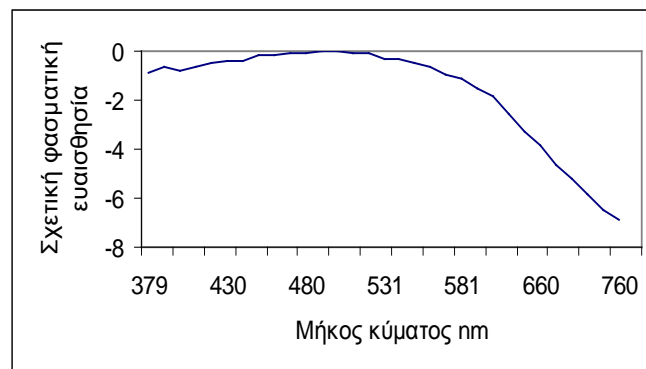
Σχήμα 1.5 Φάσμα απορρόφησης ροδοψίνης [5].

Στο σχήμα 1.6 παριστάνεται η σχετική απορρόφηση των ραβδίων σε λογαριθμικές μονάδες σε σχέση με την διαφορά $\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\max}}$, όπου λ το μήκος κύματος

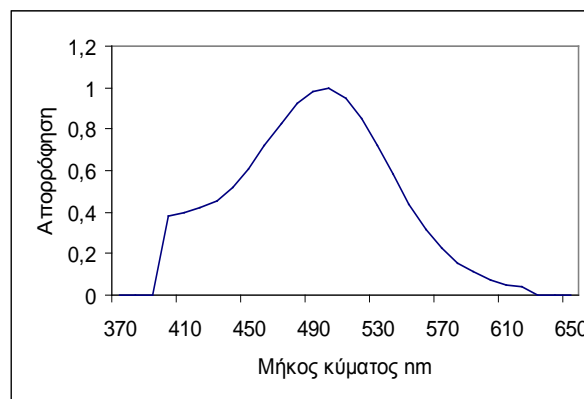
και λ_{\max} το μήκος κύματος της μέγιστης ευαισθησίας [6]. Στο σχήμα 1.7 παρουσιάζεται η φασματική ευαισθησία των ραβδίων σε λογαριθμικές μονάδες σε σχέση με το μήκος κύματος [7]. Η απορρόφηση των ραβδίων είναι δυνατόν να προσδιορισθεί πειραματικά με μικρο-φασματοσκοπία (micro-spectroscopy) [8], σχήμα 1.8



Σχήμα 1.6 Σχετική απορρόφηση των ραβδίων σε λογαριθμικές μονάδες [6].



Σχήμα 1.7 Φασματική ευαισθησία ραβδίων, σε λογαριθμικές μονάδες, σε σχέση με το μήκος κύματος [7].



Σχήμα 1.8 Απορρόφηση ραβδίων [8].

Κωνία

Τα κωνία έχουν υψηλότερα κατόφλια ενεργοποίησης και πρακτικά δεν παρουσιάζουν φαινόμενα κορεσμού.

Η πυκνότητα κατανομής των κωνίων είναι μέγιστη στην ωχρά κηλίδα ($1,6 \times 10^5$ κωνία/mm²), και μειώνεται ταχύτατα όσο απομακρυνόμαστε από αυτή (σχήμα 1.4). Η κατανομή δεν είναι κυκλικά συμμετρική. Υψηλότερες πυκνότητες κωνίων παρατηρούνται στο τεταρτημόριο μεταξύ μύτης και μετώπου.

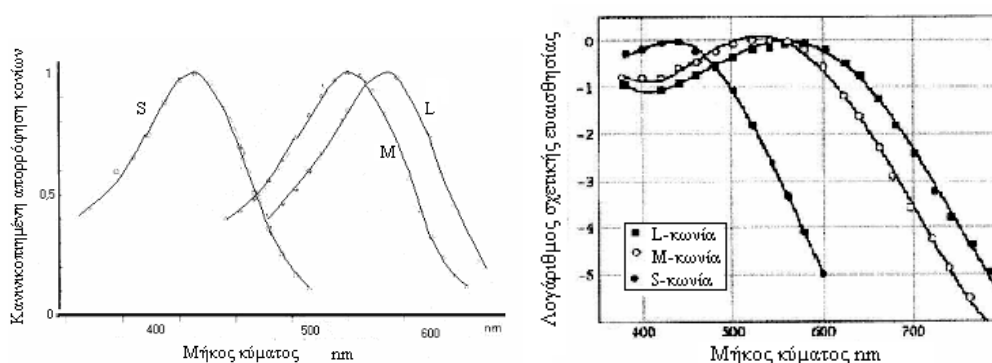
Το συνολικό πλήθος των κωνίων στον οφθαλμό είναι $5 \cdot 10^6$. Η κατασκευή των κωνίων δεν είναι ομοιόμορφη. Στην περιοχή της ωχράς κηλίδας, ο λόγος του μήκους των κωνίων προς την διάμετρο τους είναι 60:1. Όσο όμως αυξάνει η απόσταση από αυτήν ο λόγος αυτός μειώνεται φθάνοντας την τιμή 40:7. Τα κωνία διακρίνονται σε τρία είδη

- Τα S (Short-wavelength) κωνία, με μέγιστο απορρόφησης στα 450nm.
- Τα M (Medium-wavelength) κωνία, με μέγιστο απορρόφησης στα 535nm.
- Τα L (Long-wavelength) κωνία, με μέγιστο απορρόφησης στα 570 nm.

Οι φασματικές τους ευαισθησίες παρουσιάζονται στο σχήμα 1.9.

Από αυτό συνάγεται, ότι:

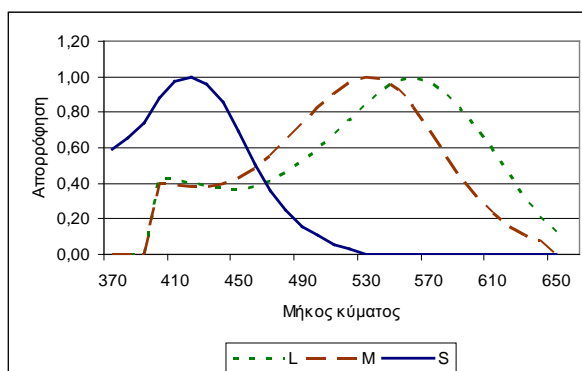
- οι ευαισθησίες των L και M κωνίων είναι παρόμοιες.
- η ευαισθησία S κωνίων πολύ μικρή μετά τα 550nm.
- και τα τρία είδη έχουν παρόμοια ευαισθησία στην κυανή και την ιώδη περιοχή.



Σχήμα 1.9 Κανονικοποιημένη φασματική ευαισθησία των κωνίων (S,M,L) [9] (αριστερά) και Σχετική φασματική ευαισθησία κωνίων σε λογαριθμικές μονάδες (δεξιά)

Χρησιμοποιώντας δεδομένα από μικρο-φασματομετρία [8], οι Darnall, Bowmaker και Mollon το 1983 κατασκεύασαν τις καμπύλες απορρόφησης των τριών ειδών κωνίων (σχήμα 1.10). Τα μέγιστα απορρόφησης που παρουσιάζονται για κάθε είδος κωνίων είναι

- L κωνία: $558.4 \pm 5.2\text{nm}$,
- M κωνία: $530.8 \pm 3.5\text{nm}$,
- S κωνία: $419.0 \pm 3.6\text{nm}$.



Σχήμα 1.10 Απορροφήσεις κωνίων [8].

Είναι δυνατόν επίσης να κατασκευασθούν οι φασματικές ευαισθησίες των κωνίων, χρησιμοποιώντας τις τριχρωματικές συναρτήσεις που έχει εισάγει η C.I.E. Οι συναρτήσεις αυτές όπως και η $V(\lambda)$ ορίζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2. Υπάρχουν πολλά τέτοια μοντέλα, τα κυριότερα είναι των Vos-Walraven, των Smith και Pokorny και των Stockman, MacLeod and Johnson 10^ο (1993).

1) Μοντέλο των Vos-Walraven

Οι Vos και Walraven [10] παρήγαγαν τις φασματικές ευαισθησίες των κωνίων, για άνοιγμα 2^ο από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$S(\lambda) = 0.0073215 \cdot \bar{z}(\lambda)$$

$$M(\lambda) = -0.1551646\bar{x}(\lambda) + 0.4569237\bar{y}(\lambda) + 0.0296946\bar{z}(\lambda)$$

$$L(\lambda) = 0.1551646\bar{x}(\lambda) + 0.5430763\bar{y}(\lambda) - 0.0370161\bar{z}(\lambda)$$

όπου $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ είναι οι τροποποιημένες κατά Judd-Vos χρωματικές συναρτήσεις της CIE, 2^ο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι: $L(\lambda) + M(\lambda) + S(\lambda) = V(\lambda)$

Οι φασματικές ευαισθησίες απεικονίζονται στο σχήμα 1.11

2) Μοντέλο των Smith και Pokorny

Οι Smith και Pokorny [11] παρήγαγαν τις οπτικές ευαισθησίες των κωνίων, για 2° οπτικό άνοιγμα, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις

$$S(\lambda) = 0.00801 \cdot \bar{z}(\lambda)$$

$$M(\lambda) = -0.1551646\bar{x}(\lambda) + 0.45684\bar{y}(\lambda) + 0.03286\bar{z}(\lambda)$$

$$L(\lambda) = 0.155164\bar{x}(\lambda) + 0.54312\bar{y}(\lambda) - 0.03286\bar{z}(\lambda)$$

όπου $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ είναι οι τροποποιημένες κατά Judd-Vos, χρωματικές συναρτήσεις της CIE. Και πάλι ισχύει: $L(\lambda) + M(\lambda) + S(\lambda) = V(\lambda)$

Οι φασματικές ευαισθησίες απεικονίζονται στο σχήμα 1.12

3) Μοντέλο των Stockman, MacLeod and Johnson

Οι Stockman, MacLeod and Johnson [12], πρότειναν τις φασματικές ευαισθησίες για γωνιακό άνοιγμα 10°, βασισμένοι στις χρωματικές συναρτήσεις της CIE για άνοιγμα οπτικού πεδίου 10° του 1964. Οι εξισώσεις από τις οποίες αυτές παράγονται είναι:

$$S(\lambda) = 0.040557 \cdot \bar{x}_{10}(\lambda) + 0.019683 \cdot \bar{y}_{10}(\lambda) - 0.486195 \cdot \bar{z}_{10}(\lambda)$$

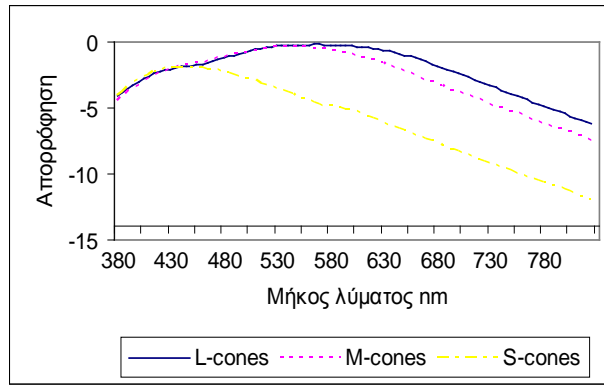
$$M(\lambda) = -0.431117 \cdot \bar{x}_{10}(\lambda) + 1.206922 \cdot \bar{y}_{10}(\lambda) + 0.090020 \cdot \bar{z}_{10}(\lambda)$$

$$L(\lambda) = 0.236157 \cdot \bar{x}_{10}(\lambda) + 0.826427 \cdot \bar{y}_{10}(\lambda) - 0.045710 \cdot \bar{z}_{10}(\lambda)$$

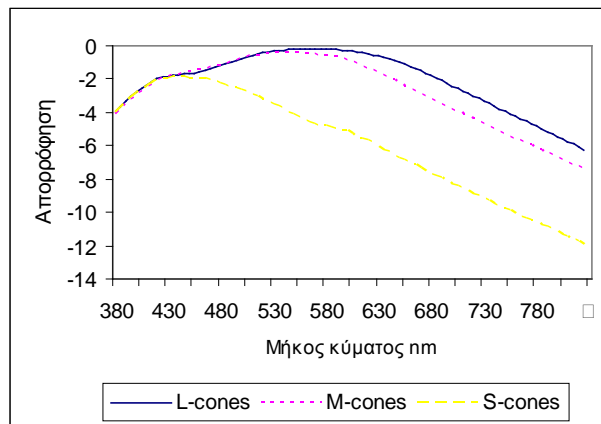
όπου $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ είναι οι τροποποιημένες κατά Judd-Vos χρωματικές συναρτήσεις της CIE.

Οι ευαισθησίες των S κωνίων έχουν επεκταθεί σε μήκη κύματος μεγαλύτερα των 520nm με χρήση της εξίσωσης: $\log[S(\lambda)] = \frac{10402.1}{\lambda} - 21.7185$

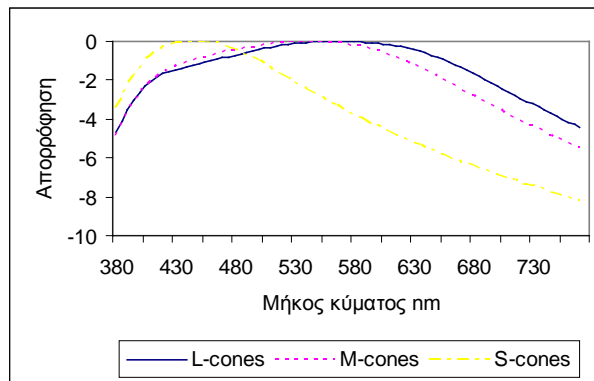
Οι φασματικές ευαισθησίες απεικονίζονται στο σχήμα 1.13



Σχήμα 1.11 Φασματικές ευαισθησίες κωνίων κατά Vos, Walraven [10].



Σχήμα 1.12 Φασματικές ευαισθησίες κωνίων κατά Smith and Pokorny [11].



Σχήμα 1.13 Φασματικές ευαισθησίες κωνίων κατά Stockman, MacLeod and Johnson [12].

1.2.4 Φακός

Ο φακός του ανθρώπινου οφθαλμού προφανώς αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό του οπτικού συστήματος. Τυχόν ελαττώματα προκαλούν οφθαλμικές

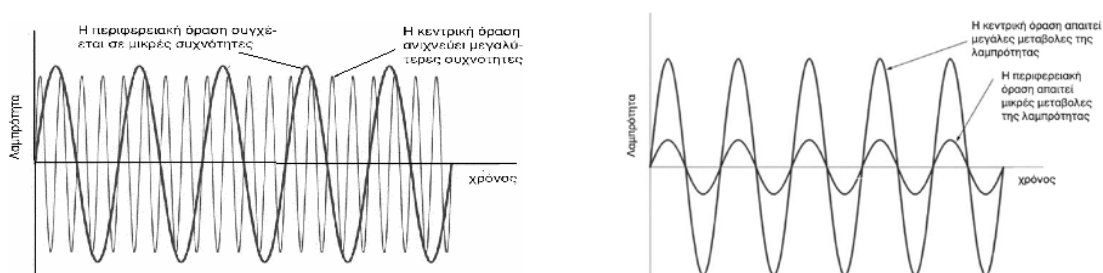
παθήσεις όπως μυωπία, πρεσβυωπία, αστιγματισμό. Από φωτομετρική άποψη, αυτό που ενδιαφέρει κυρίως είναι η απορρόφηση που παρουσιάζει στο ορατό φάσμα.

1.3 Φαινόμενα τα οποία χαρακτηρίζουν την λειτουργία του ανθρώπινου οφθαλμού

Μετείκασμα: Ως μετείκασμα ορίζεται η συνέχιση της οπτικής αντίληψης, όταν το ερέθισμα έχει ήδη εκλείψει [13]. Το μετείκασμα είναι ανάλογο της λαμπρότητας του αντικείμενου. Κατά το μετείκασμα τα αντικείμενα που αντιλαμβανόμαστε μπορεί να έχουν συμπληρωματικά χρώματα.

Χρονική ευαισθησία: Ο ανθρώπινος οφθαλμός μπορεί να ανιχνεύσει ένα φωτεινό παλμό διάρκειας μόλις 1ms. Επίσης είναι σε θέση να διακρίνει δύο διαφορετικούς φωτεινούς παλμούς αν αυτοί απέχουν χρονικά το λιγότερο 10ms.

Κρίσιμη συχνότητα μαρμαρυγής: Έστω ότι μία φωτεινή πηγή εκπέμπει διακοπτόμενες αναλαμπές ορισμένης συχνότητας. Αν η συχνότητα είναι χαμηλή, η μαρμαρυγή γίνεται αντιληπτή. Δεν ισχύει το ίδιο αν η συχνότητα είναι υψηλή. Όταν λοιπόν η συχνότητα είναι μεγαλύτερη από κάποια τιμή f_0 , η μαρμαρυγή δεν γίνεται αντιληπτή. Αυτή η συχνότητα ονομάζεται κρίσιμη συχνότητα.



Σχήμα 1.14 Ανίχνευση μαρμαρυγής σε σχέση με την συχνότητα εναλλαγής οπτικών ερεθισμάτων για την περιφερειακή και κεντρική όραση(αριστερά) και ανίχνευση μαρμαρυγής σε σχέση με την λαμπρότητα για την περιφερειακή και κεντρική όραση (δεξιά) [13].

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την κρίσιμη συχνότητα, είναι η θέση του ειδώλου της αναλαμπής στο ν αμφιβληστροειδή σε συνδυασμό με την φωτεινή ένταση της αναλαμπής. Έτσι εάν το είδωλο σχηματίζεται στην ωχρά κηλίδα,

η μαρμαρυγή μπορεί να γίνει αντιληπτή ακόμη και για τιμές συχνότητας 50 έως 70Hz. Όμως η μαρμαρυγή είναι δυνατόν να μη γίνει αντιληπτή ακόμα και για μικρές τιμές συχνοτήτων, αν η αλλαγή εντάσεως είναι μικρή. Απεναντίας, εάν το είδωλο δεν σχηματίζεται στην ωχρά κηλίδα μία μαρμαρυγή συχνότητας 15 ή 20Hz πιθανόν να μη γίνεται αντιληπτή, όμως είναι δυνατόν να ανιχνευθούν πολύ μικρότερες διαφορές εντάσεως φωτός [14].

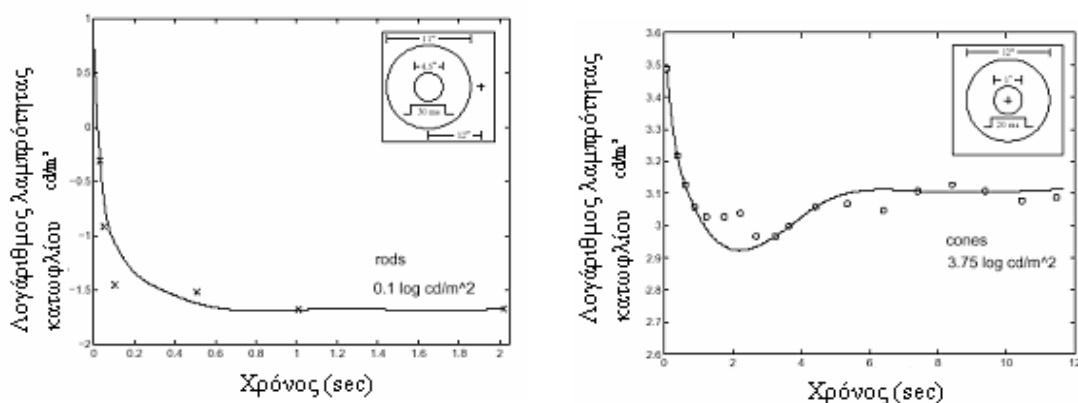
Προσαρμογή του οφθαλμού

Όταν η φωτεινή ένταση στην οποία εκτίθεται ο οφθαλμός μεταβληθεί κατά μεγάλα ποσά σε μικρό χρόνο, ο οφθαλμός δεν είναι σε θέση να παρακολουθήσει την μεταβολή. Απαιτείται κάποιος χρόνος προσαρμογής. Ονομάζουμε:

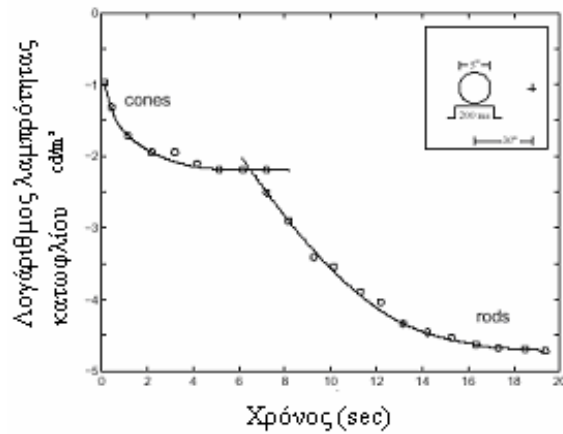
Προσαρμογή στο φως, το φαινόμενο της ανάληψης της οπτικής ευαισθησίας, μετά από μία σημαντική αύξηση της εντάσεως του φωτός. Η προσαρμογή στο φως γίνεται σε πολύ μικρό χρόνο.

Προσαρμογή στο σκοτάδι, το φαινόμενο της ανάληψης της οπτικής ευαισθησίας, μετά από μία σημαντική μείωση της εντάσεως του φωτός. Η προσαρμογή στο σκοτάδι απαιτεί αρκετό χρόνο, ο οποίος μπορεί να φθάσει και τα 30min.

Στα σχήματα 1.15 και 1.16 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές προσαρμογής των ραβδίων και κωνίων στο φως και στο σκοτάδι.



Σχήμα 1.15 Αριστερά: Χρονοσειρά προσαρμογής στο φως του συστήματος ραβδίων [15]. Δεξιά: Χρονοσειρά προσαρμογής στο φως του συστήματος κωνίων [16].



Σχήμα 1.16 Χρονοσειρά προσαρμογής στο σκοτάδι των ραβδίων και κωνίων [17].

Χρωματική προσαρμογή

Με τον όρο αυτό εννοείται η ικανότητα του οφθαλμού να αντιλαμβάνεται ότι κάποιο αντικείμενο έχει σταθερό χρώμα, ακόμα και αν αλλάξει η απόχρωση του φωτός, που το φωτίζει. Η χρωματική προσαρμογή μπορεί να είναι πλήρης ή μερική και απαιτεί χρόνο ενός λεπτού για να ολοκληρωθεί.

1.4 Οπτικές συναρτήσεις που χαρακτηρίζουν τον ανθρώπινο οφθαλμό

Απόλυτο κατώφλι

Με τον όρο απόλυτο κατώφλι εννοείται το ελάχιστο ποσόν ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, που απαιτείται να εκπέμπει ένα φωτεινό ερέθισμα ώστε ένας παρατηρητής να είναι σε θέση να το ανιχνεύσει με πιθανότητα 50%.

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

Οπτική οξύτητα

Με το όρο οπτική οξύτητα εννοείται η ικανότητα του ανθρώπινου οφθαλμού να διακρίνει λεπτομέρειες στα αντικείμενα που βλέπει. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την μέτρηση της οπτικής οξύτητας, η περισσότερο συνηθισμένη είναι η μέθοδος που βασίζεται στην χρήση των γραμμάτων του Snellen.

Η οπτική οξύτητα περιορίζεται από φαινόμενα που συμβαίνουν στον οφθαλμό, όπως περίθλαση, σφάλματα (εκτροπές), από την πυκνότητα των φωτοανιχνευτών και από το σημείο του αμφιβληστροειδούς που φωτίζεται. Επίσης

και από παράγοντες, όπως, σφάλματα διαθλάσεως, λαμπρότητα και αντίθεση (contrast) του ερεθίσματος.

Φωτεινή αντίθεση (contrast)

Η αντίθεση είναι μια σημαντική παράμετρος στην όραση. Η οπτική οξύτητα εξαρτάται και από την ευαισθησία αντίθεσης. Η αντίθεση μετράται [17] σαν η διαφορική ένταση κατωφλίου του πλέγματος, που ορίζεται από την σχέση:

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}$$

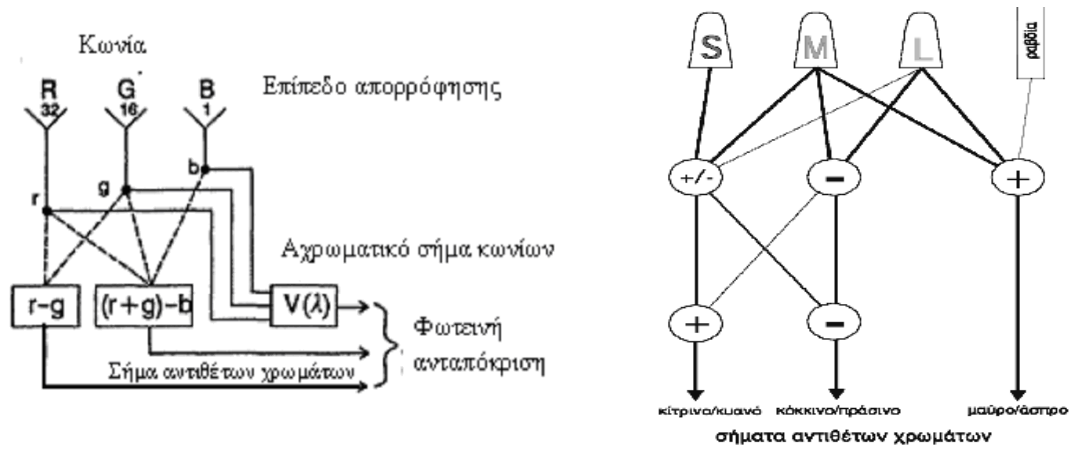
1.5 Μηχανισμοί που εξηγούν την αίσθηση της όρασης

Η ανθρώπινη όραση δημιουργείται ως αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης των φωτοανιχνευτών του ανθρώπινου οφθαλμού, δηλαδή των κωνίων και των ραβδίων. Ένα μοντέλο, για αυτήν, θα πρέπει να εξηγεί την χρωματική αντίληψη καθώς και την αντίληψη της φωτεινότητας. Σήμερα σε όλα τα μοντέλα για την ανθρώπινη όραση γίνεται η παραδοχή, ότι το τελικό σήμα το οποίο λαμβάνει το οπτικό νεύρο αποτελείται από δύο σήματα, το χρωματικό και το αχρωματικό. Το χρωματικό σήμα θα αποτελείται από τα σήματα που προέρχονται από τα κωνία και θα επιτρέπει την διάκριση των χρωμάτων. Όπως έχει αναφερθεί τα L και τα M κωνία έχουν ευαισθησίες που επικαλύπτονται. Έτσι λοιπόν για να εξηγηθεί η χρωματική αντίληψη θα πρέπει στον ανθρώπινο οφθαλμό να γίνεται μια επεξεργασία των σημάτων των κωνίων. Δημιουργείται λοιπόν το άθροισμα και η διαφορά των σημάτων αυτών, η οποία αποτελεί την χρωματική συνιστώσα. Η αχρωματική συνιστώσα δημιουργείται από το άθροισμα των σημάτων των κωνίων, καθώς επίσης και των ραβδίων. Πολλοί ισχυρίζονται ότι τα S κωνία δεν συνεισφέρουν [18, 19] στην αχρωματική συνιστώσα. Πάντως είναι δεδομένο ότι ακόμα και αν συνεισφέρουν, αυτή η συνεισφορά είναι ελάχιστη. Στην μεσοπική περιοχή υπάρχουν περισσότερες ενδείξεις για την μη συνεισφορά των S κωνίων στην μεσοπική λαμπρότητα.

Έχουν προταθεί αρκετά μοντέλα με σκοπό την εξήγηση του μηχανισμού της ανθρώπινης όρασης. Ενδεικτικά αναφέρονται δύο, τα οποία είναι και τα επικρατέστερα. Σε αυτά ακολουθείται ο εξής συμβολισμός: τα σήματα των L κωνίων καλείται r (κόκκινο), των M κωνίων g (πράσινο) και των S κωνίων b (μπλε).

Στο μοντέλο που περιγράφεται στο σχήμα 1.19(αριστερά) τα κωνία παράγουν τα σύνθετα σήματα $(r-g)$ και $((r+g)-b)$ των οποίων η σύνθεση σχηματίζει το χρωματικό κανάλι. Η σύνθεση των σημάτων $(r + g + b)$ δίνει το αχρωματικό κανάλι [20].

Στο μοντέλο που περιγράφεται στο σχήμα 1.19,δεξιά, τα νευρικά κύτταρα του οφθαλμού επεξεργάζονται τα σήματα των L, M, S κωνίων καθώς και τα σήματα των ραβδίων και παράγουν τα σύνθετα σήματα $((r-g)+s)$ και $((r-g)+s)$ των οποίων η σύνθεση σχηματίζει το χρωματικό κανάλι. Το αχρωματικό κανάλι προέρχεται από το άθροισμα των σημάτων των L, M κωνίων και των ραβδίων [21].



Σχήμα 1.19 Μηχανισμοί λειτουργίας ανθρώπινης όρασης [21].

Κεφάλαιο2: Φωτομετρία

2.1 Εισαγωγή

Ένας πρώτος ορισμός για το φως είναι ο εξής: "φως ονομάζουμε κάθε ακτινοβολία η οποία μπορεί να ερεθίσει τον ανθρώπινο οφθαλμό" [22]. Η ανταπόκριση του οφθαλμού στις φωτεινές ακτινοβολίες εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως λαμπρότητα, μήκος κύματος, άνοιγμα κόρης, μέγεθος οπτικού πεδίου κ.α. Σύμφωνα με τον ορισμό της CIE [23], φως ορίζεται η ισχύς ακτινοβολίας διαμορφωμένη από την φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού. Ο ορισμός αυτός παραπέμπει σε μετρήσεις και πράγματι η φωτομετρία ασχολείται με την μέτρηση του φωτός ορίζοντας τα κατάλληλα φωτομετρικά μεγέθη.

Σκοπός της φωτομετρίας είναι η δημιουργία ενός συνεπούς συστήματος το οποίο να επιτρέπει την μέτρηση και των υπολογισμό των διαφόρων φωτομετρικών μεγεθών.

Στις φυσικές επιστήμες τα διάφορα μεγέθη ορίζονται κατά τρόπο αντικειμενικό και ανεξάρτητο του παρατηρητή. Στην φωτομετρία αυτό δεν είναι δυνατόν. Η φωτομετρία αποβλέπει στην μέτρηση φωτεινών ερεθισμάτων. Αυτά όμως δημιουργούνται με την ενεργό συμμετοχή του παρατηρητή. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά των ανθρώπων διαφέρουν από άνθρωπο σε άνθρωπο, γίνεται φανερός ο κεντρικός ρόλος που διαδραματίζει ο παρατηρητής στην φωτομετρία. Παράλληλα η μέτρηση των ερεθισμάτων υπακούει σε ψυχοφυσικούς νόμους, οι οποίοι δεν είναι αυστηροί. Δηλαδή εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, άσχετους με το προς μέτρηση ερέθισμα και τα αποτελέσματα τους διαφοροποιούνται, εξαρτώμενα από το υποκείμενο.

Η αίσθηση της όρασης δημιουργείται, όπως περιγράφηκε, από την ενεργοποίηση των φωτοανιχνευτών του ανθρώπινου οφθαλμού. Δηλαδή των τριών ειδών κωνίων και των ραβδίων. Οι διαφορές που παρουσιάζουν, όσον αφορά τα κατώφλια ενεργοποίησης και κορεσμού, καθώς επίσης και στις απορροφήσεις τους έχουν δύο σημαντικές επιπτώσεις :

- α) Η οπτική ανταπόκριση του οφθαλμού δεν είναι ανεξάρτητη του μήκους κύματος, ούτε καν εξαρτάται από αυτό γραμμικά, αλλά με ένα τρόπο πλέον σύνθετο και
- β) Η οπτική ανταπόκριση του οφθαλμού εξαρτάται από τα επίπεδα λαμπρότητας.

Η περιοχή λαμπρότητας εντός της οποίας δημιουργείται η αίσθηση της όρασης, χωρίζεται σε τρεις βασικές περιοχές.

1. Φωτοπική περιοχή: μέση λαμπρότητα μεγαλύτερη από 10cd/m^2 όπου 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.

2. Σκοτοπική περιοχή: μέση 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.

3. Μεσοπική περιοχή: Μια μεταβατική περιοχή από το ένα είδος όρασης στο άλλο. Στην μεσοπική περιοχή, στην αίσθηση της όρασης, συνεισφέρουν όλα τα είδη φωτοανιχνευτών του οφθαλμού

Για να γίνει δυνατός ο ορισμός των φωτομετρικών μεγεθών είναι απαραίτητη η γνώση της οπτικής ανταπόκρισης του ανθρώπινου οφθαλμού, σε σχέση με το μήκος κύματος δηλαδή η γνώση της καμπύλης φασματικής ευαισθησίας. Αυτή εξαρτάται από πάρα πολλούς παράγοντες, με αποτέλεσμα να είναι δυνατός ο καθορισμός της μόνο κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις ενώ ταυτόχρονα είναι απαραίτητη και η υιοθέτηση αρκετών παραδοχών.

Ως παράδειγμα ας εξετάσουμε την εξάρτηση της φασματικής ευαισθησίας από την λαμπρότητα. Η επιπλοκή που δημιουργείται φαίνεται από το ν ορισμό των διαφόρων περιοχών όρασης. Χρησιμοποιήθηκε η έκφραση "λαμπρότητα μεγαλύτερη η μικρότερη από κάποια τιμή, εκφρασμένη σε cd/m^2 ". Οι μονάδες όμως αυτές είναι ορισμένες σε φωτοπικές συνθήκες και δεν εκφράζουν την λαμπρότητα στις άλλες περιοχές όρασης. Ορίζουμε δηλαδή την μεσοπική περιοχή με βάση τιμές μεγεθών, τα οποία έχουν νόημα σε άλλες συνθήκες.

2.2 Κατασκευή των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας

Η κατασκευή καμπυλών, οι οποίες εκφράζουν την ανταπόκριση του οφθαλμού στις διάφορες συνθήκες, γίνεται με την βοήθεια μετρήσεων που αποτιμούν

κάποιες βασικές οπτικές συναρτήσεις, όπως φωτεινότητα, οπτική οξύτητα, κατώφλια κ.ά. Ένα φωτομετρικό σύστημα θα είναι εύχρηστο εφ' όσον οι συναρτήσεις αυτές είναι προσθετικές. Προσθετικότητα, σε μια πρώτη προσέγγιση, σημαίνει ότι το οπτικό αποτέλεσμα μιας πολυχρωματικής ακτινοβολίας να είναι το άθροισμα των οπτικών αποτελεσμάτων των συνιστωσών ακτινοβολιών. Το ενδιαφέρον για την προσθετικότητα υπάρχει γιατί όλοι οι φυσικοί ανιχνευτές λειτουργούν προσθετικά.

Νόμοι του Abney

Χρησιμοποιώντας ως πειραματική μέθοδο την heterochromatic flicker photometry, οι Abney and Festing (1886) and Abney (1913), πρώτοι ερεύνησαν συστηματικά την προσθετικότητα λαμπροτήτων. Οι νόμοι που προέκυψαν καλούνται νόμοι του Abney [21].

Η έννοια προσθετικότητα λαμπροτήτων διασαφηνίζεται από το ακόλουθο παράδειγμα: Έστω ότι ταυτίζονται οπτικά μια ακτινοβολία κίτρινη και μια ακτινοβολία η οποία αποτελείται από την σύνθεση κόκκινης και πράσινης ακτινοβολίας. Η προσθετικότητα ισχύει εάν η λαμπρότητα του κίτρινου είναι ίση με το άθροισμα των λαμπροτήτων του κόκκινου και του πράσινου.

Οι νόμοι του Abney εφαρμόζονται στις περιπτώσεις όπου, χρησιμοποιώντας σαν κριτήριο μια οπτική ιδιότητα, θεωρούμε οπτικώς ισοδύναμα δυο η περισσότερα ερεθίσματα. Βέβαια υπάρχει η απαίτηση η ταύτιση αυτή να γίνεται σε καλά καθορισμένες συνθήκες, έτσι ώστε το οπτικό ερέθισμα να καθορίζεται μοναδικά.

Μπορούμε να εκφράσουμε κάθε οπτική ιδιότητα [24] σαν μία συναρτησιακή σχέση V , η οποία συνδέει την πηγή $A(\lambda)$ (το ερέθισμα) και κάποια μετρήσιμη ψυχοφυσική ιδιότητα (την ανταπόκριση). Για παράδειγμα η $VA(\lambda)$ μπορεί να παριστά τον υπολογισμό της φωτεινότητας ή την μέτρηση του χρόνου αντίδρασης. Μια οπτική ταύτιση λοιπόν δυο πηγών $A(\lambda)$ και $B(\lambda)$ θα μπορεί να γράφει $VA(\lambda)=VB(\lambda)$. Στην περιγραφή των νόμων του Abney στο εξής, χάριν απλοποίησης, θα παραλείψουμε το λ , εκτός από τις περιπτώσεις όπου αυτό είναι απαραίτητο, ενώ θα διατηρήσουμε την συναρτησιακή σχέση για να υπενθυμίζουμε το γεγονός ότι στην διαδικασία ταύτισης είναι οι οπτικές συναρτήσεις που ταυτίζονται και όχι οι ίδιες οι πηγές. Οι νόμοι είναι οι εξής:

1) Συμμετρίας : Εάν $V(A)=V(B)$ τότε και $V(B)=V(A)$

2) Μεταβατικότητας: Εάν $V(A)=V(B)$ και $V(B)=V(\Gamma)$ τότε $V(A)=V(\Gamma)$

Οι δύο αυτοί νόμοι θεωρείται ότι ισχύουν για όλα τα είδη πηγών και κάθε επίπεδο λαμπρότητας.

3) Αναλογικότητας: Εάν $V(A)=V(B)$ τότε $V(\chi A)=V(\chi B)$ όπου χ ένας θετικός αριθμός που πολλαπλασιάζει εξίσου την ισχύ της πηγής για κάθε μήκος κύματος.

4) Προσθετικότητα: Ο Abney εμπειρικά έδειξε ότι:

αν $V(A) = V(B)$ και $V(\Gamma) = V(\Delta)$ τότε

$$V(A + \Gamma) = V(B + \Delta)$$

Θα μπορούσαμε να εκφράσουμε αυτό το νόμο γενικότερα ως εξής:

Αν ισχύουν δυο οποιεσδήποτε από τις παρακάτω συνθήκες τότε θα ισχύει και η τρίτη.

(1) $V(A)=V(B)$

(2) $V(\Gamma)=V(\Delta)$

(3) $V(A + \Gamma)=V(B + \Delta)$

Πρέπει να πούμε ότι ο νόμος της προσθετικότητας απαιτεί, έμμεσα την ισχύ του νόμου της αναλογικότητας.

Τέλος ο νόμος (4) εκφράζει την απόλυτη προσθετικότητα. Ορίζεται [21] και η **σχετική προσθετικότητα:**

αν $V(A) = V(B)$ και $V(\Gamma) = V(B)$ τότε

$$V(\alpha A)+V((1-\alpha)\Gamma)= V(B) \text{ όπου } 0<\alpha<1$$

Είναι φανερό ότι στην μεσοπική περιοχή δεν μπορεί να ισχύει η απόλυτη προσθετικότητα αλλά η σχετική.

2.3 Δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά την πειραματική κατασκευή των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας

Τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την κατασκευή των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού είναι πολλά και έχουν τις ρίζες τους σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης γνώσης. Τα δύο βασικότερα είναι:

1) Ο κεντρικός ρόλος του παρατηρητή στις μετρήσεις

α) Ο παρατηρητής καλείται να αποφασίσει για τα χαρακτηριστικά φωτεινών ερεθισμάτων, πράγμα πολύ δύσκολο. Για παράδειγμα, πολλές φορές του ζητείται να κάνει ταύτιση φωτεινότητας μεταξύ δυο διαφορετικά χρωματισμένων ακτινοβολιών ή να ανιχνεύσει ένα ερέθισμα του οποίου η λαμπρότητα βρίσκεται στα όρια του κατωφλίου.

β) Η λειτουργία της όρασης διαφοροποιείται από άτομο σε άτομο και από ηλικία σε ηλικία. Επιλέγονται συνήθως παρατηρητές που έχουν ηλικία 25-30 χρόνων. Όλα αυτά έχο ν σαν αποτέλεσμα οι λαμβανόμενες μετρήσεις να παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά.

Η συνηθέστερη αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων είναι ως τελικό αποτέλεσμα, να λαμβάνεται ο στατιστικός μέσος όρος πολλών επιμέρους μετρήσεων.

2) Ο τρόπος λειτουργίας του ανθρώπινου οφθαλμού

Ο ανθρώπινος οφθαλμός είναι κατασκευασμένος κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η οπτική του απόκριση να είναι αποτέλεσμα όχι μόνο των σημάτων εξόδου των κωνίων και ραβδίων, αλλά επίσης του αθροίσματος και της διαφοράς αυτών των σημάτων.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, αναλόγως των συνθηκών του πειράματος, άλλοτε να λειτουργεί προσθετικά και άλλοτε όχι. Έτσι λοιπόν η μορφή των καμπυλών που κατασκευάζονται εξαρτάται και από την επιλεγμένη πειραματική διάταξη.

2.4 Πειραματικές μέθοδοι

2.4.1 Οπτικά κατώφλια

Για έναν ιδανικό παρατηρητή, κατώφλι είναι το όριο όπου, είτε το ερέθισμα μπορεί μόλις να ανιχνευθεί, είτε μόλις να μη γίνεται αντιληπτό. Οι άνθρωποι δεν μπορούν να θεωρηθούν ιδανικοί παρατηρητές και γι' αυτόν το λόγο τα κατώφλια ορίζονται με στατιστικό τρόπο. Έτσι στις κύριες ψυχοφυσικές μεθόδους, όπως ήδη έχει αναφερθεί, ως κατώφλι ορίζεται το σημείο εκείνο όπου το ερέθισμα έχει πιθανότητα να ανιχνευθεί 50% .

Υπάρχουν δύο μέθοδοι μέτρησης οπτικών κατωφλίων:

1) Απόλυτα κατώφλια (Absolute thresholds)

Στην μέθοδο αυτή υπολογίζεται το ελάχιστο πόσο ενέργειας, που απαιτείται σε κάθε μήκος κύματος για να είναι ορατή η ακτινοβολία [25]. Αυτό μπορεί να γίνει είτε για κεντρική όραση είτε για περιφερειακή.

2) Βαθμιαία κατώφλια (Increment thresholds)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την ίδια τεχνική με τα απόλυτα κατώφλια με την διαφορά ότι η υπό εξέταση ακτινοβολία προβάλλεται σε φωτεινό υπόβαθρο αντί

σε μαύρο, έχει έτσι το πλεονέκτημα ότι μπορεί να καθορίσει την φασματική ευαισθησία για κάθε είδος και κάθε επίπεδο προσαρμογής [26].

Το απόλυτο οπτικό κατώφλι δεν είναι σταθερό. Εξαρτάται από πολλές μεταβλητές. Μεταβολή σε κάποια από αυτές, μπορεί να επιφέρει αξιοσημείωτες διαφορές στην μέτρηση του κατώφλιου. Οι κυριότεροι παράμετροι είναι:

α) Κατάσταση προσαρμογής του οφθαλμού: Η τιμή του κατώφλιου εξαρτάται από το εάν ο οφθαλμός είναι προσαρμοσμένος στο φως ή στο σκοτάδι.

β) Παράγοντες που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του ερεθίσματος, όπως η φασματική κατανομή της φωτεινής ακτινοβολίας, το μέγεθος, η διάρκεια.

Οι μετρήσεις της οπτικής ανταπόκρισης μπορο ύν 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 κατώφλιου, 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 φθινόντων 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.

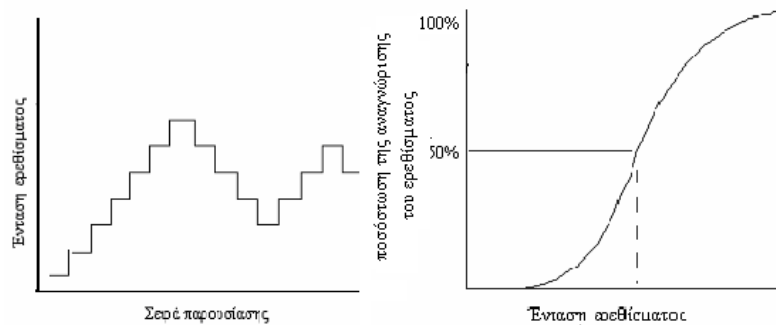
3) Μέθοδος κλίμακας (προσαρμοσμένη μέθοδος των ορίων)

Σε αυτή χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και τα αύξοντα και τα φθίνοντα όρια. Στην μέθοδο αυτή η φωτεινότητα του ερεθίσματος αυξάνει βαθμιαία μέχρι αυτό να

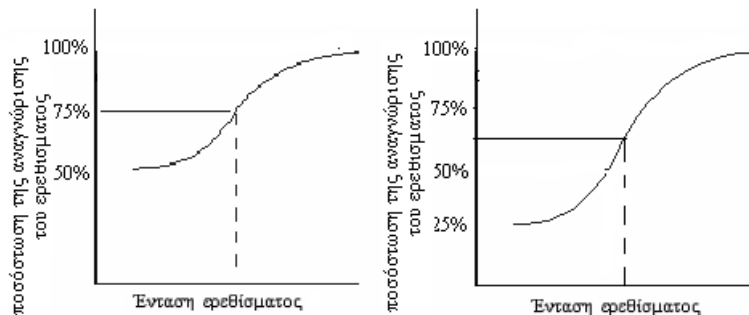
γίνει μόλις ορατό, σημειώνεται η τιμή, και στην συνέχεια η φωτεινότητα μειώνεται πάλι βαθμιαία, έως ότου να σταματήσει να είναι ορατό. Το κατώφλι πάλι ορίζεται σαν ο μέσος όρος πολλών τέτοιων μετρήσεων. Και η μέθοδος αυτή υποφέρει από εθισμό και προήγηση.

4) Μέθοδος σταθερού ερεθίσματος

Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην επαναλαμβανόμενη παρουσίαση οπτικών ερεθισμάτων κατά τυχαίο τρόπο και με κλιμακούμενη φωτεινότητα [27]. 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 κατωφλιού, ζητώντας από το υποκείμενο να απαντήσει σε ερωτήσεις, είναι οι παρακάτω:



Σχήμα 2.1 Ψυχομετρική καμπύλη με τη διαδικασία ναι-όχι [27].



Σχήμα 2.2 Ψυχομετρική καμπύλη με τη διαδικασία 2AFC (αριστερά) και με τη διαδικασία 4AFC (δεξιά) [27].

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 2.1 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 2.2 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.

2.4.2 Φωτομετρία μαρμαρυγής (Flicker Photometry)

Είναι η πρώτη αναπτυχθείσα μέθοδος και πιθανώς η πιο κοινή [28]. Η μέθοδος αυτή απαιτεί από τον παρατηρητή να ρυθμίσει την ένταση μιας χρωματικής ακτινοβολίας, η οποία εναλλάσσεται με κατάλληλη συχνότητα με μια ακτινοβολία

αναφοράς, μέχρις ότου επιτευχθεί η ελάχιστη δυνατή μαρμαρυγή. Η συχνότητα εναλλαγής πρέπει να επιλεχθεί, έτσι ώστε να πιστοποιεί τον χρωματικό συνδυασμό. Όπως επίσης θα πρέπει να είναι η βέλτιστη, αναφορικά με την ευαισθησία της μεθόδου. Η συχνότητα εναλλαγής στην οποία η ευαισθησία της μεθόδου γίνεται μέγιστη, εξαρτάται από την ένταση και την περιοχή του φάσματος όπου βρίσκεται η ακτινοβολία αναφοράς. Μια λογική λύση είναι η συχνότητα να είναι λίγο μεγαλύτερη από εκείνη της χρωματικής σύνθεσης. Η αντίστοιχη φωτεινή ροή που απαιτείται για την ελάχιστη δυνατή μαρμαρυγή μπορεί να υπολογισθεί σαν συνάρτηση του λ .

2.4.3 Άμεση Ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας (Direct Heterochromatic Brightness Matching)

Η μέθοδος αυτή απαιτεί από τον παρατηρητή να ρυθμίσει την ένταση της ακτινοβολίας μιας χρωματικής πηγής, ώστε να φαίνεται το ίδιο φωτεινή όσο και μια ακτινοβολία αναφοράς. Όταν αυτό γίνει, συνήθως οι δυο διαφορετικού χρώματος ακτινοβολίες έχουν διαφορετική λαμπρότητα. Η σύγκριση φωτεινότητας, αγνοώντας τις χρωματικές διαφορές είναι αρκετά δύσκολη, και αυτό οδηγεί σε πειραματικά αποτελέσματα με μεγάλη διασπορά. Αυτή η απόκλιση των αποτελεσμάτων, μπορεί να αντιμετωπισθεί με την χρήση μεγάλου αριθμού παρατηρητών και με επανάληψη της κάθε σύγκρισης αρκετές φορές [29].

2.4.4 Βήμα προς βήμα ταύτιση φωτεινότητας (Step-by-Step Brightness Matching)

Στην μέθοδο αυτή ο παρατηρητής, καλείται να συγκρίνει τις φωτεινότητες δυο ακτινοβολιών διαφορετικών μήκων κύματος σε ένα διμερές πεδίο [30]. Οι παρουσιαζόμενες ακτινοβολίες διαφέρουν μόνο κατά μερικά nm. Οπότε τα χρώματα που παρουσιάζονται είναι σχεδόν ίδια. Έτσι ο παρατηρητής μπορεί να συγκεντρωθεί στην σύγκριση φωτεινότητας, χωρίς η διαφορά των χρωμάτων να δυσκολεύει το εγχείρημα. Οι αντίστοιχες φωτεινότητες μπορούν να υπολογισθούν σαν συνάρτηση του λ και στην συνέχεια να γίνει κανονικοποίηση. Οι σχετικές φασματικές ευαισθησίες, που λαμβάνονται με την μέθοδο αυτή, βρίσκονται ανάμεσα σε αυτές που λαμβάνονται από την flicker photometry και από την direct heterochromatic brightness matching. Η διαφορά των μηκών κύματος των ακτινοβολιών που χρησιμοποιείται καθορίζει σε ποια από τις δυο θα είναι κοντότερα.

2.4.5 Ελαχιστοποίηση διαχωριστικού ορίου (Minimally Distinct Border)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται την παρουσίαση ενός περίπου διμερούς πεδίου σε αντιπαράθεση [31]. Το μισό πεδίο περιέχει μια ακτινοβολία αναφοράς και το άλλο μισό φως μεταβλητού μήκους κύματος. Η προ σάθεια του παρατηρητή είναι να ελαχιστοποιήσει την διακριτικότητα του συνόρου μεταξύ των δυο πεδίων, ρυθμίζοντας την μονοχρωματική ακτινοβολία. Για να γίνει ευκολότερη η ρύθμιση για τον παρατηρητή, πολλές φορές χρησιμοποιείται φακός που αντισταθμίζει την χρωματική παρέκκλιση του οφθαλμού.

2.4.6 Οπτική οξύτητα (Visual Acuity)

Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται σταθερές 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, σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.3 Σχήματα Snellen [32].



Σχήμα 2.4 Καθορισμός αποστάσεων και οπτικών πεδίων [32].

Οι κυριότεροι παράγοντες που περιορίζουν την οπτική οξύτητα είναι:

- Το μέγεθος της πηγής.
- Το κριτήριο του Raleigh.
- Η πυκνότητα των φωτοϋποδοχέων.
- Η διάμετρος της κόρης.
- Η λαμπρότητα.
- Η απόσταση του ειδώλου από τον οπτικό άξονα.
- Η κατάσταση προσαρμογής του οφθαλμού.

2.4.7 Κρίσιμη συχνότητα μαρμαρυγής (Critical flicker frequency)

Σε αυτή την τεχνική μια χρωματική ακτινοβολία παρουσιάζεται στον παρατηρητή εναλλακτικά με ένα σκοτεινό πεδίο, η φωτεινή και σκοτεινή διάρκεια παρουσίασης είναι συνήθως η ίδια. Διατηρώντας την συχνότητα αναλαμπών σταθερή, ο παρατηρητής ρυθμίζει την φωτεινή ροή της χρωματικής ακτινοβολίας, ώστε να έχουμε μόλις ανιχνεύσιμες αναλαμπές.

2.4.8 Συγκρίσεις μεθόδων

Μια σημαντική παρατήρηση που μπορεί να γίνει στις παραπάνω μεθόδους, είναι ότι μερικές από αυτές υπακούουν στον νόμο της προσθετικότητας και άλλες όχι. Περισσότερο συγκεκριμένα:

- Η προσθετικότητα ισχύει στις μεθόδους flicker photometry, minimally distinct border, visual acuity και critical flicker photometry.
- Η προσθετικότητα δεν ισχύει στις μεθόδους direct heterochromatic brightness matching, absolute thresholds, increment thresholds και heterochromatic brightness matching δεν υπακούουν.

2.5 Φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού

Την εξάρτηση της οπτικής ανταπόκρισης του ανθρώπινου οφθαλμού από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας, ονομάζουμε φασματική ευαισθησία. Η κύρια παράμετρος που επηρεάζει την φασματική ευαισθησία είναι η λαμπρότητα. Ονομάζουμε σχετική φασματική ευαισθησία [23] του ανθρώπινου οφθαλμού την κανονικοποιημένη φασματική ευαισθησία. Αυτή ορίζεται ως εξής :

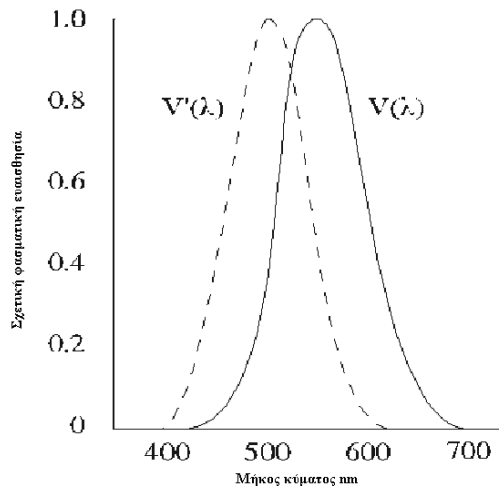
"Η σχετική φασματική ευαισθησία του οφθαλμού (για μια μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος λ) είναι ο λόγος της φωτεινής ροής σε μήκος κύματος λ_m προς αυτήν σε μήκος κύματος λ , έτσι ώστε και οι δυο ακτινοβολίες να παράγουν ίδια ένταση φωτεινής αίσθησης, κάτω από καθορισμένες φωτομετρικές συνθήκες. Η λ_m επιλέγεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η μέγιστη τιμή αυτού του λόγου να είναι 1".

Τα πειραματικά δεδομένα, που απαιτούνται για να κατασκευαστεί η καμπύλη της σχετικής φασματικής ευαισθησίας εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους. Οι κυριότερες από αυτές είναι η επιλογή του παρατηρητή, η κατάσταση προσαρμογής του ματιού, το γωνιακό άνοιγμα της δέσμης, καθώς και η γωνιακή της θέση, η μέθοδος μέτρησης, όπως επίσης και τα επίπεδα λαμπρότητας στα οποία έγιναν οι μετρήσεις.

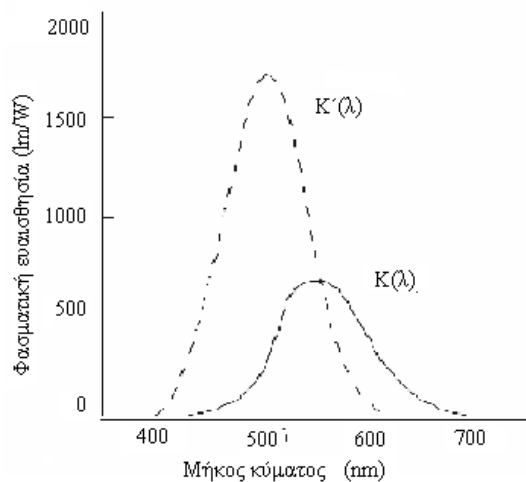
Με σκοπό να δοθεί μια βάση για συγκρίσεις ακτινοβολιών με διαφορετικά μήκη κύματος η CIE εισήγαγε τις καμπύλες φασματικής ευαισθησίας $K(\lambda)$ για την φωτοπική και $K'(\lambda)$ για την σκοτοπική όραση, όπως και τις καμπύλες σχετικής φασματικής ευαισθησίας $V(\lambda)$ για την φωτοπική και την $V'(\lambda)$ για την σκοτοπική όραση (σχήμα 2.5) [23,33]. Θα ισχύει ότι

$$K(\lambda) = K_{\max} \cdot V(\lambda) \quad \text{και} \quad K'(\lambda) = K'_{\max} \cdot V'(\lambda)$$

Όπου $K_{\max} = 683 \text{lm/W}$ και $K'_{\max} = 1700 \text{lm/W}$ οι μέγιστες τιμές φασματικής ευαισθησίας για τη φωτοπική και σκοτοπική όραση αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στα 555nm για τη φωτοπική και στα 506 έως 508nm για τη σκοτοπική όραση.



Σχήμα 2.5 Σχετικές φασματικές ευαισθησίες του ανθρώπινου οφθαλμού για την φωτοπική $V(\lambda)$ και σκοτοπική όραση $V'(\lambda)$ [23].



Σχήμα.2.6 Φασματικές ευαισθησίες για την φωτοπική $K(\lambda)$ και σκοτοπική όραση $K'(\lambda)$ [23].

Η καμπύλη $V(\lambda)$, δηλαδή η σχετική φασματική ευαισθησία για την φωτοπική όραση, καθορίστηκε στην περιοχή 360 έως 830 nm με βήμα 1nm. Για ενδιάμεσες τιμές πρέπει να χρησιμοποιηθεί γραμμική παρεμβολή. Οι τελικές τιμές υιοθετήθηκαν από τη CIE το 1970 [34]. Η $V(\lambda)$ παρουσιάζει μέγιστο στα 555nm. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις από τις οποίες κατασκευάστηκε η $V(\lambda)$ ήταν οι εξής:

α) χρησιμοποιήθηκαν μικρά εύρη οπτικών πεδίων, έως 3° , πάνω στον οπτικό άξονα του ματιού, με λαμπρότητες συχνά κάτω από 10cd/m^2 , αλλά πάντως αρκετά υψηλές για να εξασφαλίζουν φωτοπική όραση.

β) ως μέθοδοι μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν η flicker photometry, ώστε να αποφεύγεται εντελώς η ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας και η step-by-step brightness matching, στην οποία οι διαφορές αποχρώσεων μεταξύ των δυο μερών του φωτομετρικού πεδίου είναι μικρές, δηλαδή μεθόδους προσθετικές.

Η καμπύλη $V'(\lambda)$ δηλαδή η σχετική φασματική ευαισθησία για την σκοτοπική όραση καθορίστηκε στο διάστημα 380 έως 780 nm με βήμα 1nm. Οι τελικές τιμές υιοθετήθηκαν από τη C.I.E. το 1951 [35]. Η $V'(\lambda)$ έχει μέγιστη τιμή στην περιοχή 506 έως 508 nm.

Οι μετρήσεις από τις οποίες κατασκευάστηκε η $V'(\lambda)$ ήταν οι μετρήσεις του Crawford το 1949 [36] και του Wald το 1945 [37]. Οι δύο σειρές μετρήσεων έχουν γίνει με ριζικά διαφορετικούς τρόπους. Ο Crawford χρησιμοποίησε ταύτιση φωτεινότητας σε διμερές πεδίο 20° λαμπρότητας περίπου $30 \cdot 10^{-6} \text{cd/m}^2$. Ο Wald αναφέρεται στα κατώφλια όρασης για ένα μικρό στόχο οπτικού ανοίγματος 1° . Υπάρχουν ενδείξεις ότι στις μετρήσεις του Crawford εμπεριέχεται και η επίδραση των κωνίων σε μεγάλα μήκη κύματος.

Ένας ανιχνευτής ακτινοβολίας, του οποίου η φασματική ευαισθησία συμφωνεί με τη $V(\lambda)$ ή την $V'(\lambda)$, αναφέρεται σαν τυπικός παρατηρητής (standard observer) για την φωτοπική ή την σκοτοπική όραση.

Η φωτοπική φωτεινή ροή Φ και η φωτοπική λαμπρότητα μιας φωτεινής πηγής L ορίζονται ως εξής:

$$\Phi = K_{\max} \int_{360}^{830} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$L = K_{\max} \int_{360}^{830} L_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

όπου $\Phi_e(\lambda)$ η φασματική ροή ακτινοβολίας, $L_e(\lambda)$ η ακτινοβολία και K_{\max} είναι η μέγιστη φασματική ευαισθησία για την φωτοπική όραση και έχει την τιμή: $K_{\max} = 683.002 \text{lm/W} = 683 \text{lm/W}$.

Η φασματική ευαισθησία $K(\lambda)$ θα δίνεται από την σχέση:

$$K(\lambda) = K_{\max} V(\lambda) \text{ (lm/W)}$$

Η σκοτοπική φωτεινή ροή Φ' και η σκοτοπική λαμπρότητα μιας φωτεινής πηγής L' ορίζονται ως εξής:

$$\Phi' = K'_{\max} \int_{380}^{830} \Phi_e(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$L' = K'_{\max} \int_{380}^{830} L_e(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda$$

όπου K'_{\max} είναι η μέγιστη φασματική ευαισθησία για την φωτοπική όραση και έχει την τιμή $K'_{\max}=1700.06\text{lm/W}= 1700\text{lm/W}$.

Η φασματική ευαισθησία θα δίνεται από την σχέση:

$$K'(\lambda) = K'_{\max} V'(\lambda) \quad (\text{lm/W})$$

Από το σχήμα 2.6 προκύπτει ότι:

$$K(555) = K'(555) = 683\text{lm/W}$$

Αυτό αποτελεί και την γενικότερη απαίτηση ενός συνεπούς φωτομετρικού συστήματος. Δηλαδή στα 555nm η φασματική απόδοση του ανθρώπινου οφθαλμού να είναι 683lm/W , λόγω του ορισμού της cd .

2.6 Προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την χρήση των $V(\lambda)$ και $V'(\lambda)$

Τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την χρήση των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού είναι πολλά και οφείλονται σε πολλούς παράγοντες [23, 38]. Τα κυριότερα είναι:

1. Η φασματική ευαισθησία του οφθαλμού ενός ανθρώπου στην πραγματικότητα είναι διαφορετική από αυτή που ορίζει η $V(\lambda)$.

2. Αλλαγή της φασματικής ευαισθησίας εξαιτίας των επιπέδων της λαμπρότητας της πηγής. Όταν η λαμπρότητα είναι χαμηλότερη από τις τιμές που αντιστοιχούν στα όρια της φωτοπικής όρασης, η $V(\lambda)$ δεν είναι έγκυρη, παρ' όλα αυτά χρησιμοποιείται. Όταν η λαμπρότητα μειώνεται, τότε τα μικρότερα μήκη κύματος φαίνονται λαμπρότερα απ' ό,τι προβλέπει η $V(\lambda)$, ενώ υπερεκτιμά τα οπτικά αποτελέσματα των μεγάλων μήκων κύματος. Μεταξύ των περιοχών φωτοπικής και σκοτοπικής όρασης στην μεσοπική όραση, καμία από τις δυο καμπύλες δεν ανταποκρίνεται ικανοποιητικά. Λύση στο πρόβλημα της μεσοπικής όρασης θα μπορούσε να αποτελέσει μια σειρά καμπυλών, καθεμιά από τις οποίες θα ήταν κατάλληλη για το αντίστοιχο επίπεδο λαμπρότητας. Ωστόσο μέχρι τώρα δεν έχει γίνει εφικτό κάτι τέτοιο. Οι λόγοι για αυτό θα εξετασθούν στην συνέχεια της μελέτης. Επιγραμματικά θα μπορούσε να αναφερθεί ότι η περιοχή ανάμεσα στην φωτοπική και σκοτοπική όραση χαρακτηρίζεται από μια ομάδα καμπυλών, η οποία δεν μεταβάλλεται γραμμικά από το ένα άκρο στο άλλο. Το ποια θα είναι η κατάλληλη καμπύλη σε μια δοσμένη λαμπρότητα εξαρτάται από παράγοντες, όπως το μέγεθος και η γωνιακή θέση του πεδίου και η ικανότητα προσαρμογής του ματιού.

3. Οι ακατάλληλες συνθήκες φωτισμού. Η εκτίμηση της ροής μπορεί να είναι ακριβής, μόνο όταν οι μετρήσεις του φωτός γίνονται κάτω από τις συνθήκες υπό τις οποίες η $V(\lambda)$ κατασκευάστηκε. Δηλαδή φωτοπικά επίπεδα φωτισμού, μικρά πεδία, κεντρική δέσμη, ουδέτερο υπόβαθρο. Το ενοχλητικότερο από αυτά είναι το μέγεθος του οπτικού πεδίου. Συνήθως, υπάρχει ενδιαφέρον για την μέτρηση μεγάλων οπτικών πεδίων. Επίσης η φασματική ευαισθησία αλλάζει εάν η πηγή είναι σημειακή.

4. Η καμπύλη της σχετικής φασματικής ευαισθησίας εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της. Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε εξαρτώνται από την μέθοδο οπτικής ταύτισης που επιλέχθηκε για την αποτίμηση της μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Αυτό οφείλεται στο ότι άλλες μέθοδοι υπακούουν στον νόμο της προσθετικότητας, και άλλες όχι.

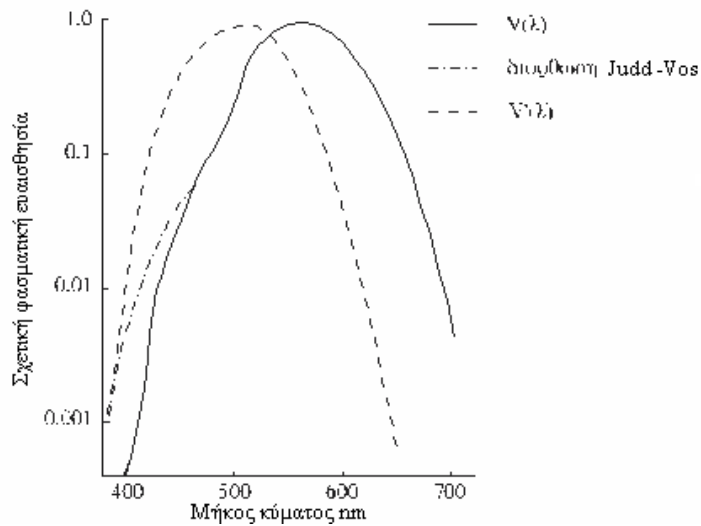
5. Η $V(\lambda)$ είναι ακριβής για ακτινοβολίες σχεδόν λευκές. Αν το φως δεν είναι σχεδόν λευκό, τότε η χρησιμοποίησή της καταλήγει σε λανθασμένα αποτελέσματα, λόγω της μη προσθετικότητας των χρωμάτων.

2.7 Διόρθωση Judd-Vos

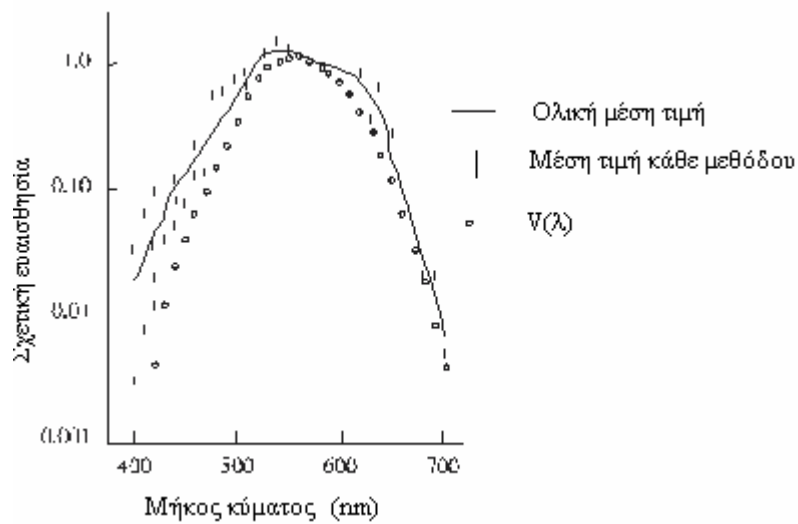
Η καμπύλη $V(\lambda)$ δεν είναι εντελώς ακριβής [39], ακόμα και για τις συνθήκες για τις οποίες κατασκευάστηκε. Στα άκρα του ορατού φάσματος, η φασματική ευαισθησία είναι μεγαλύτερη.

Ο Judd το 1951 [40] 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 [41] έκανε περαιτέρω διορθώσεις.

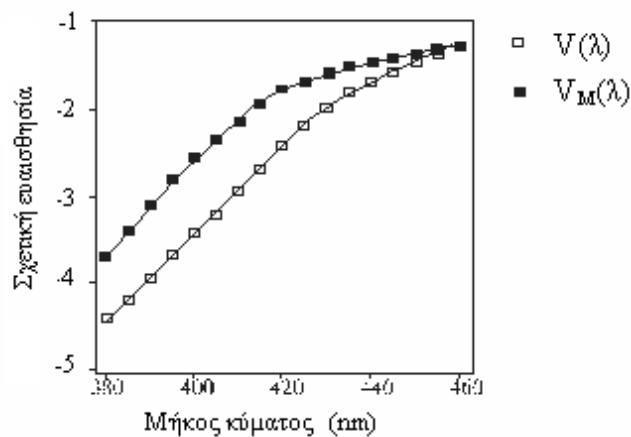
Οι διορθώσεις αυτές έγιναν αποδεκτές από την διεθνή επιτροπή φωτισμού και έτσι κατασκευάστηκε η Judd-Vos modified CIE $V(\lambda)$ (σχήμα 2.7), η οποία είναι γνωστή και σαν $V_M(\lambda)$. Οι διορθώσεις αυτές όμως θεωρείται, ότι συμπληρώνουν την $V(\lambda)$, δεν την αντικαθιστούν. Τα παρακάτω σχήματα 2.8, 2.9 και 2.10 [22] δείχνουν την εξάρτηση της καμπύλης σχετικής φασματικής ευαισθησίας από την ακολουθούμενη πειραματική μέθοδο.



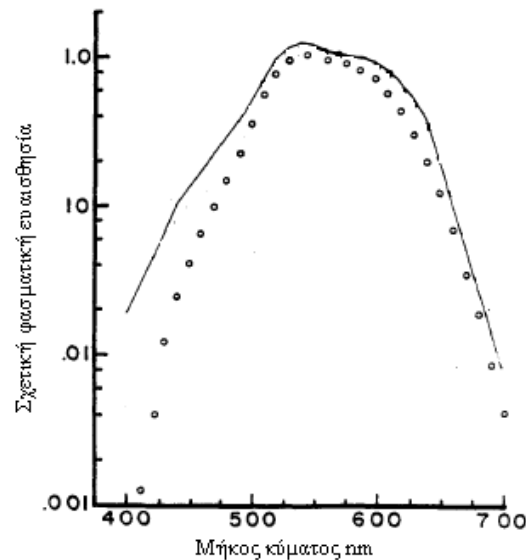
Σχήμα 2.7 Καμπύλες φασματικής ευαισθησίας [22].



Σχήμα 2.8 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και καμπύλης $V(\lambda)$ [22].



Σχήμα 2.9 Σύγκριση $V(\lambda)$ με την τροποποιημένη $V_M(\lambda)$, σε λογαριθμικές μονάδες [22].



Σχήμα 2.10 Σύγκριση της $V(\lambda)$ (κύκλοι) με καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας που κατασκευάστηκε με ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας (συνεχής γραμμή) [22].

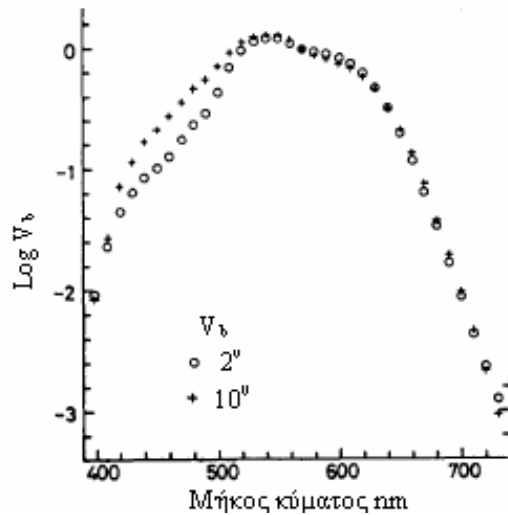
2.8 Άλλες καμπύλες σχετικής φασματικής ευαισθησίας

Οι μέχρι τώρα αναφερθείσες καμπύλες σχετικής φασματικής ευαισθησίας στην περιοχή της φωτοπικής όρασης, έχουν ως κοινά χαρακτηριστικά τα εξής:

α) Κατασκευάζονται με πειραματικές μεθόδους προσθετικές. Αν η πειραματική μέθοδος δεν είναι προσθετική, π.χ. brightness matching, η παραγόμενη καμπύλη είναι διαφορετικής μορφής από την $V(\lambda)$.

β) Αναφέρονται σε κεντρικά πεδία μικρού ανοίγματος. Αν όμως το εύρος ενός κεντρικού πεδίου αυξηθεί ή ένα μικρό εύρους πεδίο βρίσκεται εκτός του οπτικού άξονα, τότε η φασματική ευαισθησία μεταβάλλεται. Μάλιστα οι ουσιώδεις μεταβολές στην φωτοπική περιοχή γίνονται για γωνίες από 0° έως 10° . Μετά τις 10° οι μεταβολές είναι αμελητέες.

Η CIE υιοθέτησε την καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας ταύτισης φωτεινότητας, την $V_b(\lambda)$. Η καμπύλη κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας πειραματικά της μεθόδου brightness matching. Η καμπύλη αυτή χρησιμοποιείται για την αποτίμηση μονοχρωματικών ακτινοβολιών. Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ακτινοβολίες ευρέως φάσματος, λόγω του ότι δεν είναι προσθετική. Επίσης η CIE υιοθέτησε και την καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας ταύτισης φωτεινότητας, την $V_{b,10}(\lambda)$, για μεγάλα εύρη οπτικού πεδίου. Οι περιορισμοί που υπόκειται η χρήση της είναι ίδιοι με αυτούς της $V_b(\lambda)$. Στο σχήμα 2.11 παριστώνται οι δύο αυτές καμπύλες.



Σχήμα 2.11 Καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας, $V_b(\lambda)$, $V_{b,10}(\lambda)$ [39].

Το 1964 η CIE [42] εισήγαγε ένα χρωματομετρικό σύστημα ευρέως πεδίου. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τρεις χρωματικές συναρτήσεις. Μία από αυτές, η $Y_{10}(\lambda)$, κατασκευάστηκε με προσθετικές μεθόδους και εκφράζει τη λαμπρότητα. Αυτή η συνάρτηση μπορεί να θεωρηθεί συμπληρωματική της $V(\lambda)$ κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες, δηλαδή για εύρη πεδίου μεγαλύτερα από 4° , και για φωτοπικά επίπεδα λαμπρότητας.

Πρέπει βέβαια να υπογραμμίσουμε ότι, και αυτή η συνάρτηση έχει τα ίδια εγγενή προβλήματα με την $V(\lambda)$.

2.9 Χρωματομετρία

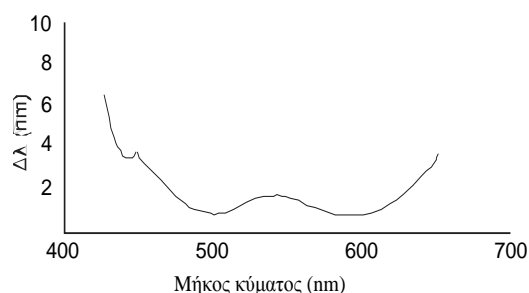
Η χρωματομετρία αποτελεί μια μέθοδο μετρήσεως χρωμάτων [43] ακτινοβολιών και αντικειμένων. Στην συνέχεια εξετάζονται οι βασικές της αρχές. Ο λόγος είναι ότι οι χρωματικές ιδιότητες μιας πηγής, επιδρούν στα οπτικά της χαρακτηριστικά, επίσης οι χρωματικές συναρτήσεις είναι ιδιαίτερος χρήσιμες κατά την μελέτη της μεσοπικής όρασης.

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.

Στις μονοχρωματικές ακτινοβολίες αποδίδονται χρώματα, που ονομάζονται φασματικά. Έτσι ακτινοβολία μήκους κύματος 430 nm αναγνωρίζεται ως ιώδης, 460 nm ως κυανή, 520 nm ως πράσινη, 575 nm ως κίτρινη, 600 nm ως πορτοκαλί και 650 nm ως 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 500nm 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 σχήμα 2.12 παριστά την ελάχιστη διαφορά μήκους κύματος για να γίνει αντιληπτή η διαφορά στο χρώμα δύο ακτινοβολιών, σε σχέση με το μήκος κύματος.



Σχήμα 2.12 Ελάχιστη αντιληπτή διαφορά μήκους κύματος κατά μήκος κύματος [43].

2.9.1 Η τριχρωματική θεωρία

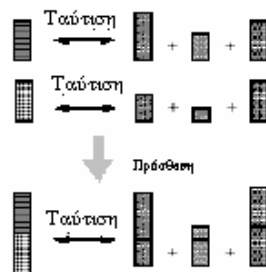
Κατά την τριχρωματική θεωρία [44], οποιοδήποτε χρώμα, μπορεί να αναπαραχθεί με την μείξη τριών άλλων βασικών χρωμάτων. Αν το αρχικό χρώμα έχει την ίδια φασματική σύνθεση με το χρώμα που προέκυψε από την μείξη των τριών βασικών χρωμάτων, η σύνθεση λέγεται ισομερική. Αν όμως το αρχικό χρώμα έχει διαφορετική φασματική κατανομή από το μίγμα των τριών, παρ' όλο που φαίνεται να έχει ακριβώς το ίδιο χρώμα, η σύνθεση λέγεται μεταμερική.

Ως τρία βασικά χρώματα συχνά επιλέγονται οι μονοχρωματικές ακτινοβολίες 700 nm, 546.1 nm και 435.8 nm .

Σε κάθε χρώμα λοιπόν, αντιστοιχούν τρεις τιμές των βασικών χρωμάτων, τα οποία το συνθέτουν. Αυτές οι τιμές δείχνουν την ενέργεια ακτινοβολίας που

συνεισφέρει κάθε βασικό χρώμα κατά την σύνθεση.

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, κατά την σύνθεση ορισμένων χρωμάτων, είναι δυνατόν 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 της χρωματικής σύνθεσης είναι η χρωματική προσθετικότητα (νόμος του Grassmann). Κατά την ανάμιξη δύο ακτινοβολιών γνωστής χρωματικής σύνθεσης, η χρωματική σύνθεση της μείξης θα είναι το αλγεβρικό άθροισμα των αντιστοίχων τιμών των ακτινοβολιών που συνθέτουν την μείξη σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13 Προσθετικότητα χρωμάτων [44].

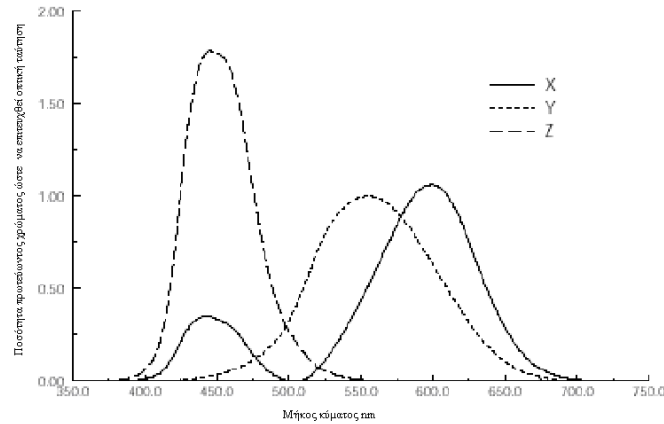
2.9.2 Ο τυπικός παρατηρητής (CIE 1931)

Η CIE πρότεινε το 1931 τρία βασικά χρώματα αναφοράς, τα οποία ονόμασε X, Y και Z. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η ονομασία των χρωμάτων αυτών είναι συμβατική, τα χρώματα αυτά δεν είναι φυσικά.

Κάθε μονοχρωματική ακτινοβολία με μήκος κύματος λ , αντιστοιχεί σε μια μείξη των X, Y, Z. 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. Αυτές οι τρεις συναρτήσεις ονομάζονται Συναρτήσεις Χρωματικής Συνθέσεως (Colour Matching Functions - CMF) και έχουν τα ιδιαίτερα σύμβολα $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Το σχήμα 2.14 απεικονίζει τις γραφικές παραστάσεις τους.

Θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι τα τρία αυτά χρώματα αναφοράς X, Y, Z είναι καθαρά μαθηματικές κατασκευές και δεν υπάρχουν στην πραγματικότητα. Τα X, Y, Z επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι εξής προϋποθέσεις:

- 1) Κατά την σύνθεση οποιοδήποτε χρώματος οι τιμές ενέργειας να είναι θετικές.
 - 2) Η συνάρτηση $\bar{y}(\lambda)$ να ταυτίζεται με την $V(\lambda)$, να δίνει δηλ. την λαμπρότητα.
 - 3) Οι άλλες δύο συναρτήσεις $\bar{x}(\lambda)$ και $\bar{z}(\lambda)$ να έχουν μηδενική τιμή λαμπρότητας.
- Αυτά ισχύουν για κεντρική όραση και για φως σχεδόν λευκό [45].



Σχήμα 2.14 Χρωματικές συναρτήσεις CIE 1931 [45].

Η CIE καθόρισε το 1964 άλλες συναρτήσεις χρωματικής συνθέσεως για οπτικό άνοιγμα πεδίου 10 μοιρών, τις $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$ και $\bar{z}_{10}(\lambda)$. Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων δεν διαφέρουν πολύ από αυτές των προηγούμενων.

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

$$X = K \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

$$Y = K \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

2.9.3 Φωτεινές πηγές

Αν και το λευκό φως, σύμφωνα με τα παραπάνω, ορίζεται μαθηματικά ακριβώς, είναι δύσκολο να παραχθεί τεχνητά [46]. Γι' αυτό η CIE καθόρισε κάποιες τυπικές φωτεινές πηγές, οι οποίες χρησιμεύουν σαν πρότυπα.

Η πηγή τύπου A: Ισοδυναμεί με την ακτινοβολία μέλανος σώματος 2856° K.

Ως πηγή A στις εφαρμογές, μπορεί να θεωρηθεί λαμπτήρας πυράκτωσης με συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος 2856° K.

Η πηγή C: Ισοδυναμεί με το μέσο φως ημέρας, με συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος 6800° K.

Αποτελείται από δύο μέρη.

1. Μια πηγή A.
2. Ένα φίλτρο, που αποτελείται από ένα διαφανές δοχείο στο οποίο τοποθετείται διάλυμα, του οποίου η χημική σύνθεση καθορίζεται από την C.I.E..

Η σειρά των πηγών D: Αυτές ισοδυναμούν με το φως ημέρας σε διάφορες φάσεις και αντιστοιχούν στην ακτινοβολία μέλανος σώματος, σε διάφορες θερμοκρασίες. Έτσι έχουμε το D65 στους 6500° K, το D50 στους 5000° K κ.λ.π..

2.9.5. Το διάγραμμα X, Y, Z (CIE 1931)

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 2.15.

Οι τρεις άξονες δεν περιέχονται 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 ακτινοβολιών. Αυτά παρουσιάζουν μέγιστο κορεσμό. Η καμπύλη συνοριακή επιφάνεια ονομάζεται γεωμετρικός τόπος του φάσματος (spectral locus). Τα σημεία της ευθείας γραμμής, που ενώνει τα άκρα του γεωμετρικού τόπου του φάσματος, δεν αντιστοιχούν σε μονοχρωματικές ακτινοβολίες, αλλά χρώματα που

προκύπτουν από την μίξη ερυθρού με ιώδες

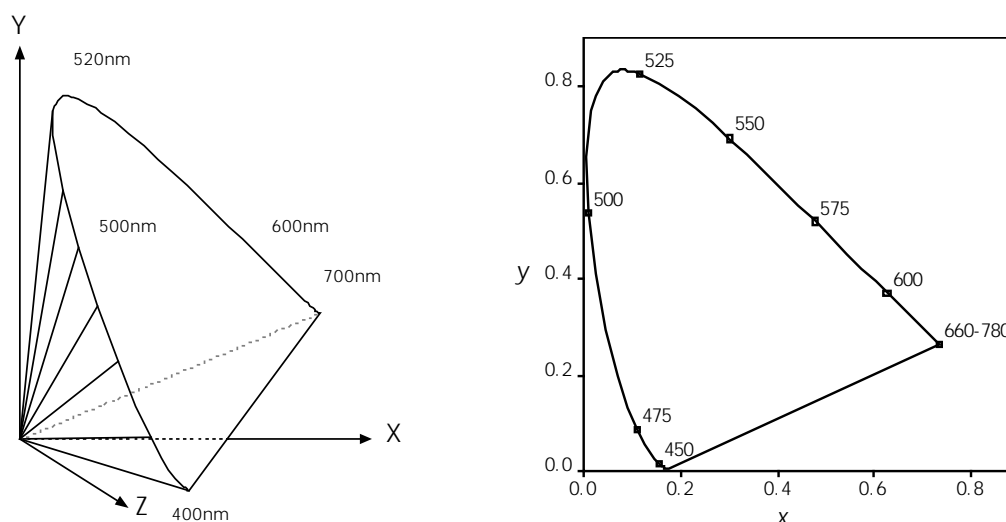
Όταν σε ένα χρώμα αυξάνεται η λαμπρότητα, τότε η ενέργεια που απαιτείται από κάθε ένα από τα χρώματα αναφοράς X, Y, Z αυξάνεται για να αναπαράγει μεταμερικά το υπό εξέταση χρώμα, έτσι ώστε η αναλογία X:Y:Z να παραμένει σταθερή. Στο τρισδιάστατο διάγραμμα το σημείο που παριστάνει το χρώμα κάθε φορά βρίσκεται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

Είναι χρήσιμο να εξετάζεται ένα χρώμα, ανεξάρτητα από την λαμπρότητά του. Για να γίνει αυτό, ορίζονται τα x, y, z ως εξής :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Προφανώς, ισχύει πάντοτε $x+y+z=1$. Άρα η z συντεταγμένη είναι εξαρτημένη, οπότε όλη η απαιτούμενη πληροφορία απεικονίζεται στο επίπεδο x, y (σχήμα 2.16).

Συνήθως οι τιμές (x, y) συνοδεύονται από την τιμή του Y, ώστε να μπορούν να υπολογισθούν τα X, Y, Z.



Σχήμα 2.15 Χρωματικός χώρος (αριστερά) και το επίπεδο x, y (δεξιά) [43].

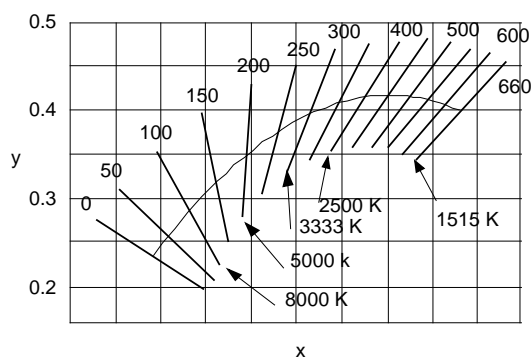
2.9.6 Θερμοκρασία χρώματος

Σημαντική έννοια στην χρωματομετρία, είναι η θερμοκρασία χρώματος [46,47]. Στην βιβλιογραφία διακρίνονται η θερμοκρασία χρώματος και η συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος.

Η φασματική κατανομή του μέλανος σώματος, εξαρτάται από την θερμοκρασία, και είναι δυνατόν να υπολογισθεί θεωρητικά. Η γραμμή, της οποίας τα σημεία αντιπροσωπεύουν τις χρωματικές συντεταγμένες μέλανος σώματος για διάφορες θερμοκρασίες ονομάζεται Planckian locus.

Εάν μια φωτεινή πηγή εκπέμπει φως, του οποίου οι χρωματικές συντεταγμένες ταυτίζονται με αυτές μέλανος σώματος κάποιας θερμοκρασίας, τότε λέμε ότι η θερμοκρασία του χρώματος της φωτεινής πηγής είναι η θερμοκρασία του μέλανος σώματος.

Εάν οι χρωματικές συντεταγμένες δεν ταυτίζονται ακριβώς με εκείνες κάποιου μέλανος σώματος, αλλά είναι κοντά στο Planckian locus, με την βοήθεια των ισοθερμοκρασιακών γραμμών προσδιορίζουμε την συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος (σχήμα 2.19).



Σχήμα 2.19 Planckian locus και ισοθερμοκρασιακές γραμμές [43].

Κεφάλαιο 3: Μεσοπική όραση

3.1 Γενικά

Στην μεσοπική όραση το οπτικό αίσθημα προκαλείται από την συνδυασμένη δράση όλων των τύπων φωτοανιχνευτών του ανθρώπινου οφθαλμού. Αυτό σε αντίθεση με τις άλλες περιοχές.

Στην φωτοπική περιοχή, η όραση οφείλεται στην δράση των κωνίων κατά κύριο λόγο αφού τα ραβδία βρίσκονται σε κατάσταση κορεσμού, και η συνεισφορά τους αν και υπολογίσιμη είναι σταθερή.

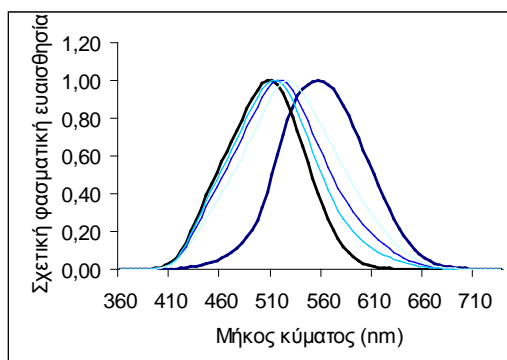
Στην σκοτοπική η όραση οφείλεται αποκλειστικά στα ραβδία. Βέβαια έχουν διατυπωθεί απόψεις σύμφωνα με τις οποίες στα μεγάλα μήκη κύματος υπάρχει επίδραση και από τα κωνία.

Στην μεσοπική περιοχή τα πράγματα είναι πλέον σύνθετα. Η δημιουργία της όρασης από την συνδυασμένη δράση κωνίων - ραβδίων έχει πολλές επιπτώσεις. Το επίπεδο λαμπρότητας καθορίζει την σχετική συνεισφορά ραβδίων-κωνίων. Το άνοιγμα του οπτικού πεδίου παίζει σημαντικό ρόλο, γιατί έτσι μεταβάλλεται ο λόγος των ραβδίων προς τα κωνία τα οποία δημιουργούν το οπτικό αίσθημα. Λόγω δε και του τρόπου κατανομής των φωτοανιχνευτών στον αμφιβληστροειδή παίζει σημαντικό ρόλο και η θέση στην οποία δημιουργείται το ερέθισμα. Για πεδία μέχρι 2° έχουν διατυπωθεί θέσεις, σύμφωνα με τις οποίες η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού είναι η φωτοπική καμπύλη. Το ύψος, διότι, στην περιοχή αυτή δεν υπάρχουν ραβδία. Η θέση αυτή αν και φαίνεται εύλογη προϋποθέτει όχι μόνο ότι η ανταπόκριση των κωνίων είναι ανεξάρτητη από την λαμπρότητα αλλά και ότι δεν αλλάζει και η σχετική τους ανταπόκριση.

Είναι αναμενόμενο ότι μειούμενης της λαμπρότητας θα αυξάνει η συνεισφορά των ραβδίων. Αναμένεται λοιπόν η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας να είναι περισσότερο ευαίσθητη στα μικρά μήκη κύματος. Όπως είναι φυσικό δεν είναι δυνατόν να υπάρχει μία μόνο καμπύλη για την μεσοπική περιοχή, αλλά μία για κάθε επίπεδο λαμπρότητας. Οι μεσοπικές καμπύλες φασματικής ευαισθησίας αποτελούν μια οικογένεια καμπυλών. Κάθε μια από αυτές είναι έγκυρη για μια συγκεκριμένη τιμή λαμπρότητας. Αυτές πρέπει να εξασφαλίζουν την ομαλή μετάβαση από την σκοτοπική στην φωτοπική όραση.

Στο σχήμα 3.1 φαίνονται μια ομάδα υποθετικών μεσοπικών καμπυλών. Όπως έχει αναφερθεί ο συντελεστής φασματικής απόδοσης για κάθε μια καμπύλη στα 555nm είναι 683 lm/W, λόγω του ορισμού της cd.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί, ότι στην μεσοπική περιοχή ο νόμος της προσθετικότητας, ισχύει μόνο υπό την σχετική του μορφή. Αυτό διότι η απόλυτη προσθετικότητα δεν είναι δυνατόν να ισχύσει, διότι θα άλλαζαν τα επίπεδα λαμπρότητας.



Σχήμα 3.1 Υποθετικές μεσοπικές καμπύλες.

3.2 Φαινόμενα που επηρεάζουν την μεσοπική όραση

Στο υπάρχον φωτομετρικό σύστημα υπάρχουν κάποιες ασυνέπειες οι οποίες δεν μπορούν να ερμηνευθούν πλήρως. Οι δύο κυριότερες από αυτές είναι:

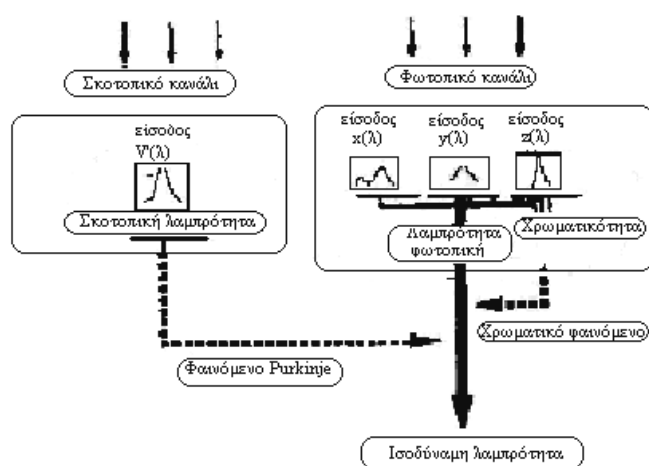
α) Χρωματικό φαινόμενο ή χρωματική συνεισφορά στην λαμπρότητα[48]: Με άλλα λόγια η ασυμφωνία φωτεινότητας - λαμπρότητας. Με την φράση "ασυμφωνία φωτεινότητας - λαμπρότητας" νοείται, ότι ακτινοβολίες ίσης λαμπρότητας παρουσιάζουν διαφορετική φωτεινότητα εάν αυτές είναι έντονα χρωματισμένες

β) Φαινόμενο Purkinje [49]: Σε χαμηλές λαμπρότητες ακτινοβολίες με φασματική κατανομή πλούσια σε μικρά μήκη κύματος φαίνονται λαμπρότερες από άλλες που είναι φτωχές στα μικρά μήκη κύματος. Το φαινόμενο οφείλεται μάλλον στην συνεισφορά των ραβδίων, η οποία σε μικρές λαμπρότητες είναι αναλογικά μεγαλύτερη.

Στην μεσοπική περιοχή τα φαινόμενα αυτά είναι περισσότερο έντονα. Με αφορμή λοιπόν την μελέτη της μεσοπικής περιοχής, έχουν γίνει προσπάθειες κατασκευής ενός συμπληρωματικού φωτομετρικού συστήματος το οποίο να είναι κατάλληλο για όλες τις περιοχές λαμπρότητας, Δηλαδή στην πραγματικότητα ένα φωτομετρικό σύστημα, στο οποίο να λαμβάνεται υπόψη και το χρωματικό κανάλι.

3.3 Ισοδύναμη λαμπρότητα

Κατά την μελέτη της μεσοπικής όρασης πέραν της λαμπρότητας, μια άλλη έννοια χρησιμοποιείται ευρέως, αυτή της ισοδύναμης λαμπρότητας. Στο σχήμα 3.2 απεικονίζεται η δομή ενός γενικευμένου φωτομετρικού συστήματος, βασισμένο στην φωτεινότητα. Στην ισοδύναμη λαμπρότητα συνεισφέρουν όλοι οι φωτοανιχνευτές και υπάρχει ένας συντελεστής βαρύτητας α , που καθορίζει την σχετική συνεισφορά. Ο τελικός υπολογισμός γίνεται με την μέθοδο των διαδοχικών προσεγγίσεων.



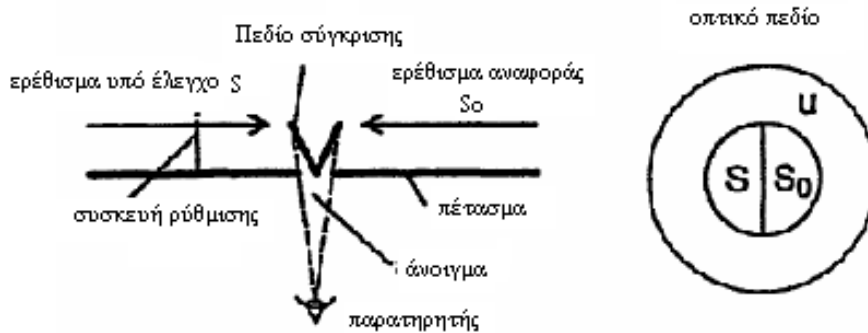
Σχήμα 3.2 Έννοια της ισοδύναμης λαμπρότητας [21].

Η έννοια της ισοδύναμης λαμπρότητας ορίζεται ως εξής: Έστω ότι προσδιορίζεται η φωτεινή ταύτιση ενός δείγματος και ενός ερεθίσματος αναφοράς, όπως στο σχήμα 3.3. Η σχετική φασματική ευαισθησία, ως προς την φωτεινότητα, υπολογίζεται ταυτίζοντας την φωτεινότητα του στόχου με αυτή της ακτινοβολίας αναφοράς σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος λ_0 [23] σύμφωνα με την σχέση:

$$s_r(\lambda) = \frac{L_{e\lambda}(\lambda_0)}{L_{e\lambda}^x(\lambda)}$$

όπου $L_{e\lambda}^x$ είναι η ακτινοβολία του δείγματος με μήκος κύματος λ που απαιτείται για ταύτιση με το δείγμα $L_{e\lambda}(\lambda_0)$. Συνήθως ως λ_0 λαμβάνεται το μήκος κύματος της μέγιστης ευαισθησίας.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η $S_r(\lambda)$ περιορίζεται σε μια σταθερή ανταπόκριση του οφθαλμού, όπως αυτή καθορίζεται από το ερέθισμα S_0 . Γενικότερα η συνάρτηση φασματικής ευαισθησίας θα εξαρτάται και από το ερέθισμα αναφοράς, δηλαδή $S_r = S_r(\lambda, S_0)$.



Σχήμα 3.3 Ταύτιση ερεθισμάτων [23].

3.4 Προσθετικότητα στην μεσοπική περιοχή

Οι νόμοι της προσθετικότητας και της αναλογικότητας, του Abney δεν ισχύουν στην μεσοπική όραση σύμφωνα με πολλούς ερευνητές [24].

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 μπορεί να το αποδειχθεί κάνοντας ένα γράφημα, όπου ο άξονας x 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 :

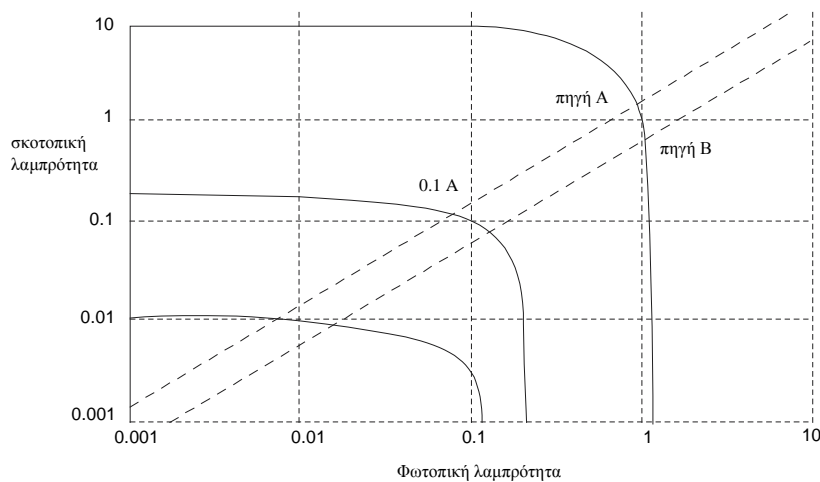
$$S_A = k_A P, \quad S_B = k_B P$$

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

Σε λογαριθμική κλίμακα όπως στο σχήμα 3.4, οι γραφικές παραστάσεις δυο πηγών με διαφορετικές φασματικές κατανομές θα είναι ευθείες γραμμές με κλίση 1, μετατοπισμένες κατά τον λόγο k_A/k_B . Η σταθερά αναλογίας έχει ληφθεί 0.1.

Για να αποδειχθεί ότι ο νόμος της αναλογικότητας δεν ισχύει, αρκεί να σχεδιασθούν οι καμπύλες ίσης οπτικής απόκρισης, δηλαδή οι καμπύλες σταθερής ισοδύναμης λαμπρότητας L_{eq} στο επίπεδο S,P στο σχήμα 3.4.

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.



Σχήμα 3.4 Γραφική παράσταση πηγών σε λογαριθμική κλίμακα [24].

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 1 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 δειχθεί ότι ο νόμος της προσθετικότητας δεν ισχύει στην μεσοπική περιοχή, αρκεί να θεωρηθεί ότι:

$$\Gamma = xA \text{ και } \Delta = yB$$

όπου Γ και Δ δυο πηγές ισοδύναμες στη μεσοπική η σκοτοπική περιοχή, δηλαδή $V(\Gamma) = V(\Delta)$. Εάν οι δυο πηγές δεν έχουν τον ίδιο λόγο S/P τότε όπως συζητήθηκε παραπάνω $x \neq y$. Οπότε

$$A + \Gamma = A(1+x) \text{ και } B + \Delta = (1+y)B \text{ και } V[A(1+x)] \neq V[(1+y)B]$$

άρα ο νόμος της προσθετικότητας δεν ισχύει στην μεσοπική περιοχή.

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση και συγκριτική αντιπαράθεση των μοντέλων της μεσοπικής όρασης

Στην προσπάθεια να επιλυθούν τα προβλήματα της φωτομετρίας στις διάφορες συνθήκες, προτάθηκαν διάφορα φωτομετρικά μοντέλα. Αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με τρεις τρόπους.

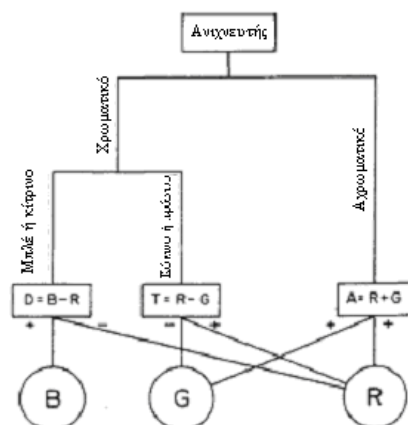
- 1) Ανάλογα με το κριτήριο ταύτισης των οπτικών ερεθισμάτων που χρησιμοποιούν:
 - Μοντέλα με χρήση καθαρά οπτικών μεθόδων ταύτισης π.χ. Flicker photometry, brightness matching.
 - Μοντέλα με χρήση χρόνων αντίδρασης ως κριτήριο ταύτισης.
 - 2) Ανάλογα με τον τρόπο θεώρησης της μεσοπικής όρασης:
 - Μοντέλα, στα οποία η μεσοπική όραση θεωρείται αποτέλεσμα σύνθεση της φωτοπικής και της σκοτοπικής όρασης κατά ένα γραμμικό ή μη γραμμικό τρόπο.
 - Μοντέλα, στα οποία γίνεται προσπάθεια έκφρασης της μεσοπικής όρασης ως συνδυασμό περισσότερων παραγόντων, συγκεκριμένα των χρωματικών συντεταγμένων, της φωτοπικής και της σκοτοπικής λαμπρότητας.
 - 3) Ανάλογα με το τελικό στόχο του μοντέλου:
 - Μοντέλα, τα οποία στοχεύουν στην δημιουργία μιας μεθόδου, η οποία να έχει πρακτική εφαρμογή.
 - Μοντέλα τα οποία στοχεύουν σε μια πλήρη εξήγηση της ανθρώπινης όρασης.
- Τα κυριότερα από αυτά παρουσιάζονται στην συνέχεια του κεφαλαίου. Σημειώνεται, ότι στην περιγραφή αυτή αναφέρονται οι απόψεις των συγγραφέων, όπως αυτές έχουν διατυπωθεί στα αντίστοιχα άρθρα.

4.1 Το μοντέλο του S. L. Guth.

Το μοντέλο του Guth, χωρίς να είναι επαρκές στην παρούσα του μορφή, αποτελεί ένα πολύ καλό βήμα προς την κατεύθυνση της κατασκευής ενός μοντέλου, το οποίο να καλύπτει πλήρως την φωτομετρία. Ενόσ μοντέλου το οποίο να είναι ικανό να παρέχει έναν σχετικά ακριβή υπολογισμό των φωτομετρικών μεγεθών.

Το μοντέλο αυτό στηρίζεται σε δυο παραδοχές [50 - 54]:

- Η μια παραδοχή είναι η τρέχουσα άποψη της φυσιολογίας για την χρωματική όραση. Η αντίληψη της όρασης επιτυγχάνεται με την διέγερση των τριών ειδών κωνίων, των οποίων τα σήματα καταλήγουν σε ένα ανταγωνιστικό νευρικό σύστημα. Η δραστηριότητα του συστήματος κόκκινο-πράσινο είναι ανταγωνιστική, προς αυτήν του συστήματος μπλε-κίτρινο (σχήμα 4.1.1).
- Η δεύτερη παραδοχή είναι ότι τα πειραματικά αποτελέσματα που λαμβάνονται για την κατασκευή της καμπύλης της φασματικής ευαισθησίας, χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους, μπορούν να καταταχθούν σε δυο βασικές κατηγορίες. Η μια καταλήγει στην γνωστή $V(\lambda)$, η οποία προϋποθέτει την αρχή της προσθετικότητας. Η άλλη καταλήγει σε μια πλατύτερη καμπύλη, με μεγαλύτερη ευαισθησία στα δυο άκρα του οπτικού φάσματος, όπου η προσθετικότητα δεν ισχύει.



Σχήμα 4.1.1 Σχηματική παράσταση του μοντέλου ATD [50].

Το μοντέλο ονομάζεται ATD (Achromatic, Tritanopic and Deuteranopic) και είναι σε θέση να προβλέψει φαινόμενα μη προσθετικότητας. Το πιο ενδιαφέρον τμήμα του μοντέλου είναι η εισαγωγή μιας φυσικής ποσότητας που καλείται L^{**} . Η L^{**} είναι συνδεδεμένη με το αντικειμενικό τμήμα της φωτεινότητας και ακόμη

σωστότερα, με την δυνατότητα ανίχνευσης μιας χρωματικής ακτινοβολίας. Αυτό είναι το βασικότερο σημείο αυτού του μοντέλου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι κυριότερες αντιρρήσεις για τον ορισμό της λαμπρότητας, σύμφωνα με τη CIE, εδράζονται στο ότι δεν μπορεί να προβλέψει την φωτεινότητα και την ανίχνευση έντονα χρωματισμένων ακτινοβολιών. Με την βοήθεια της L^{**} αυτό γίνεται εφικτό, για λαμπρότητες κοντά στο κατώφλι.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό αυτού του μοντέλου είναι ότι η L^{**} μπορεί να εκφραστεί σαν μια σχέση των χρωματικών συναρτήσεων της CIE: X, Y, Z. Συγκεκριμένα:

$$L^{**} = (A^2 + D^2 + T^2)^{1/2}$$

Όπου στο κατώφλι:

$$A = 0,000X + 0,954Y + 0,010Z$$

$$T = 0,799X - 0,646Y - 0,167Z$$

$$D = 0,000X - 0,058Y + 0,030Z$$

Η L^{**} μπορεί να υπολογισθεί, εάν είναι γνωστό το Y. Αυτό μπορεί εύκολα να βρεθεί από φωτομετρικές μετρήσεις και τις χρωματικές συνιστώσες του ερεθίσματος.

Υπάρχουν βέβαια αρκετά προβλήματα με αυτή την προσέγγιση. Η κατασκευή του μοντέλου έγινε με χρήση κεντρικού πεδίου, για λαμπρότητες στο επίπεδο κατωφλιού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο κάτω από αυτές τις συνθήκες. Εάν τα επίπεδα λαμπρότητας είναι υψηλότερα από τα κατώφλια, η χρήση της δεν είναι δόκιμη. Σημειώνεται ότι τα φαινόμενα της μη προσθετικότητας είναι περισσότερο έντονα στις περιοχές πάνω από το κατώφλι.

4.2 Το μοντέλο του W. Adrian

Ελαττώνοντας τα επίπεδα λαμπρότητας, η φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού μεγαλώνει στα μικρότερα μήκη κύματος, εάν αυτό συνεχιστεί, εμφανίζεται απώλεια της αίσθησης των χρωμάτων μέχρι που σε χαμηλά επίπεδα, μόνο την φωτεινότητα γίνεται αντιληπτή. Είναι επόμενο ότι οι βασικές οπτικές συναρτήσεις όπως ευαισθησία, αντίθεση, οπτική οξύτητα, οπτική απόδοση, όπως επίσης και το μέγεθος της κόρης, εξαρτώνται από την προσλαμβανόμενη φωτεινότητα και όχι από την φωτοπική λαμπρότητα της πηγής. Η φωτοπική λαμπρότητα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις συνθήκες μεσοπικής όρασης καθώς χρησιμοποιεί σαν φασματική ευαισθησία την $V(\lambda)$.

Το φωτομετρικό μέγεθος που λαμβάνει υπόψη του την αλλαγή της φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού ονομάζεται ισοδύναμη λαμπρότητα L_{eq} .

Για να διερευνηθεί η λειτουργία της όρασης είναι αναγκαία η μέτρηση της λαμπρότητας στην μεσοπική περιοχή. Δηλαδή είναι αναγκαία η γνώση της σχετικής φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού, που σε αυτή την περιοχή την ονομάζεται $V_{eq}(\lambda)$. Εξαιτίας της συνεισφοράς των ραβδίων, που γίνεται σημαντική στην μεσοπική όραση, οι καμπύλες $V_{eq}(\lambda)$ εξαρτώνται από τα επίπεδα λαμπρότητας. Έτσι, γεννιέται η ανάγκη για μια οπτική αποτίμηση της ακτινοβολίας, η οποία να έχει σχέση με το αίσθημα της φωτεινότητας.

$$L_{eq} = K_m L_{eq} \int L_e V_{(\lambda, L_{eq}, e)} d\lambda$$

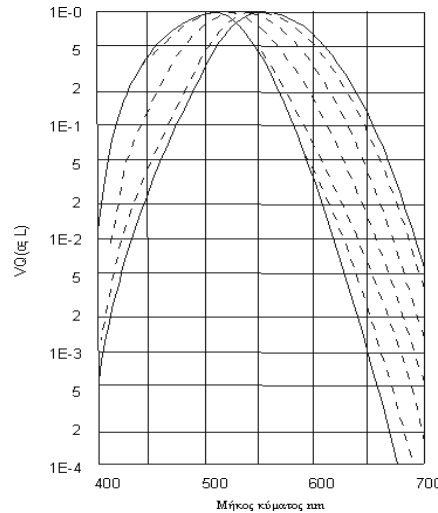
$$K_m = \text{φωτομετρική σταθερά εξαρτώμενη από το } L_{eq}$$

$$V_{(\lambda, L_{eq}, e)} = \text{πραγματική φασματική ευαισθησία του οφθαλμού } VQ_e$$

Για τις δύο βασικές περιοχές όρασης προφανώς ισχύει:

- φωτοπική περιοχή : $V_{eq} \rightarrow V(\lambda)$
- σκοτοπική περιοχή: $V_{eq} \rightarrow V'(\lambda)$

Το 1964 η CIE υπέδειξε μια ομάδα καμπυλών, για να περιγράψει την σχετική φασματική ευαισθησία στην μεσοπική περιοχή. Οι καμπύλες αυτές βασίστηκαν στις μετρήσεις της J.A.Kinney. Η Kinney κατασκεύασε αυτές τις καμπύλες, χρησιμοποιώντας οπτικό πεδίο εύρους 2° , το οποίο σχημάτιζε γωνία 10° ως προς τον οπτικό άξονα. Οι καμπύλες αυτές περικλείονται από την φωτοπική καμπύλη $V(\lambda)$ και τη σκοτοπική καμπύλη $V'(\lambda)$.



Σχήμα 4.2.1 Καμπύλες της Kinney [55].

Ο Adrian [50, 55 - 56] για να υπολογίσει την L_{eq} , θεώρησε ότι οι καμπύλες της Kinney μπορούν να προσεγγισθούν με παραβολές της μορφής

$$\log(V_{eq}) = A(\lambda - H)^2$$

Η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων προσδιορίζει τις τιμές των A , H ως:

$$A = J \left[1 + \left(\frac{\log L + k}{T} \right)^2 \right]^{1/2} - MN(e^{10 \log L}) \quad H = \left(\frac{P}{Q + (\log L + R)^2} \right) + S$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\log V_{eq}(\lambda, L) = \left[J \left(1 + \left(\frac{\log L + k}{T} \right)^2 \right)^{1/2} - MN(e^{10 \log L}) \right] \times \left[\lambda - \left(\frac{P}{Q + (\log L + R)^2} + S \right) \right]^2$$

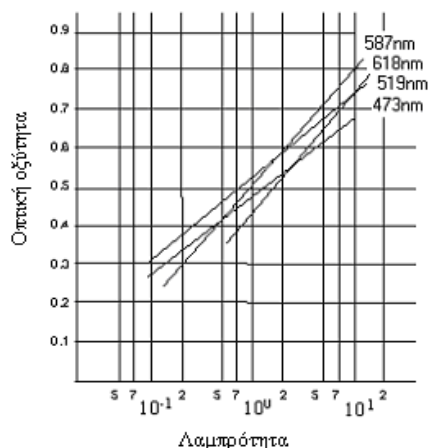
όπου οι τιμές των σταθερών δίνονται από τον πίνακα 4.2.1

Πίνακας 4.2.1 Τιμές των σταθερών μοντέλου Adrian

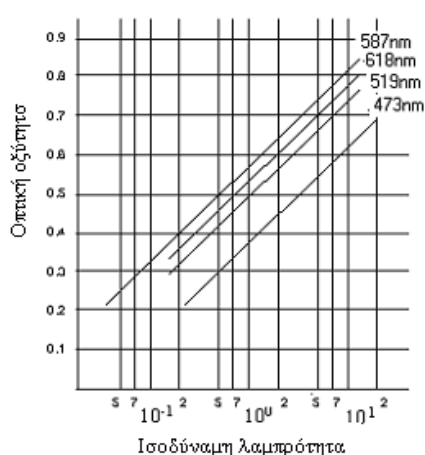
| ε | 3^0 | $9,5^0$ | 64^0 |
|---------------|------------|-------------|------------|
| J | 2,902E-10 | 7,578E-06 | 9,91E-09 |
| K | 1,840E+00 | 2,171E+00 | 2,049E+00 |
| T | 3,692E-05 | 7,787E-02 | 9,196E-04 |
| M | 1,607E-04 | 1,5479E-04 | 1,474E-04 |
| N | 4,569E-12 | 1,8805E-12 | -1,386E-13 |
| P | 3,029E+02 | 1,558E+02 | 1,017E+02 |
| Q | 5,118E+00 | 2,7976E+00 | 1,858E+00 |
| R | -1,188E+00 | -179765E+00 | -1,188E+00 |
| S | 4,975E+02 | 4,98807E+02 | 4,988E+02 |

Με αυτά τα δεδομένα είναι δυνατόν να εξετασθούν η οπτική οξύτητα, μέγεθος κόρης και οπτική απόδοση σε μεσοπικές συνθήκες.

Οπτική οξύτητα



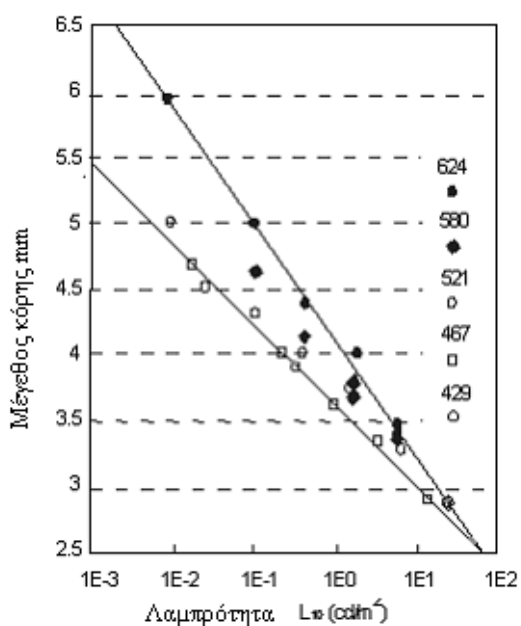
Σχήμα 4.2.2 Οπτική οξύτητα σε σχέση με την λαμπρότητα [55].



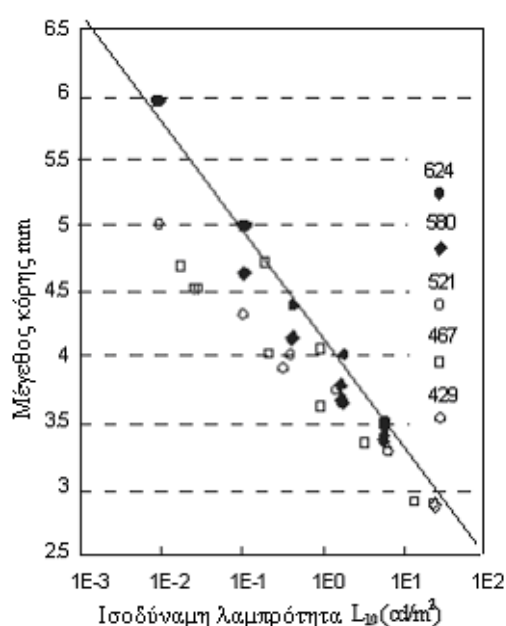
Σχήμα 4.2.3 Οπτική οξύτητα σε σχέση με την ισοδύναμη λαμπρότητα [55].

Ο Andrian μέτρησε την οπτική οξύτητα χρησιμοποιώντας τα δακτυλίδια Landolt σε υψηλή αντίθεση $C=0.92$. Η έρευνα έγινε για μια περιοχή είκοσι μονάδων λαμπρότητας και χαμηλότερης από τα 10 asb (3.18 cd/m^2). Από το σχήμα 4.2.2 παρατηρούμε ότι για $L_b=10\text{ asb}$ η οξύτητα βρέθηκε μέγιστη στα 587nm , η ίδια στα 618nm και 519nm και μικρότερη στα 473nm . Σε χαμηλά επίπεδα λαμπρότητας η κατάσταση αντιστρέφεται και τα μικρά μήκη κύματος οδηγούν σε υψηλότερες τιμές ανάλυσης από ότι τα μεγάλα. Παρατηρείται ότι, όσο μεγαλώνει το μήκος κύματος τόσο η παραγόμενη φωτεινότητα μικραίνει για τα ίδια επίπεδα λαμπρότητας στην μεσοπική περιοχή. Αυτό φαίνεται ακόμα καλύτερα από το σχήμα 4.2.3 όπου τα ίδια δεδομένα σχεδιάστηκαν σαν συνάρτηση της ισοδύναμης λαμπρότητας. Οι γραμμές γίνονται παράλληλες αντικατοπτρίζοντας το γεγονός, ότι η ανάλυση του οφθαλμού ελαττώνεται με τη L_{eq} για κάθε φασματική γραμμή με την ίδια κλίση. Επίσης είναι εμφανές, ότι σε κάθε επίπεδο L_{eq} η οπτική ανάλυση είναι χαμηλότερη στην περιοχή του μπλε. Η απάντηση σε αυτό μπορεί να οφείλεται στις κατανομές των S, M, L κωνίων.

Μέγεθος κόρης



Σχήμα 4.2.4 Μέγεθος κόρης σε σχέση με την λαμπρότητα [55].



Σχήμα 4.2.5 Μέγεθος κόρης σε σχέση με την ισοδύναμη λαμπρότητα [55].

Ο Andrian μίτρησε το μέγεθος της κόρης σε πέντε διαφορετικά μήκη κύματος. Κοντά στα φωτοπικά επίπεδα (6 έως 10cd/m^2), η διάμετρος της κόρης βρέθηκε η ίδια για όλα τα μήκη κύματος εκτός από τα 473nm , όπου βρέθηκαν μικρότερες διαμέτροι, εάν η λαμπρότητα μετρηθεί με βάση την $V(\lambda)$. Δηλαδή, ο μηχανισμός της κόρης είναι περισσότερο ευαίσθητος στο μπλε από ότι προσδιορίζει η $V(\lambda)$. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην συνεισφορά των ραβδίων, είναι όμως πολύ μικρή για επίπεδα λαμπρότητας μεγαλύτερα από 10cd/m^2 . Η απόκλιση εξαφανίζεται όταν χρησιμοποιηθεί φωτομετρία ευρέως πεδίου (10°), η οποία περιγράφει την φασματική ευαισθησία του οφθαλμού ικανοποιητικότερα. Οι διαφορές στις αποκλίσεις του μεγέθους της κόρης όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 4.2.4 εξαφανίζονται αν η διάμετρος κόρης σχεδιαστεί σε σχέση με την L_{eq} όπως στο σχήμα 4.2.5.

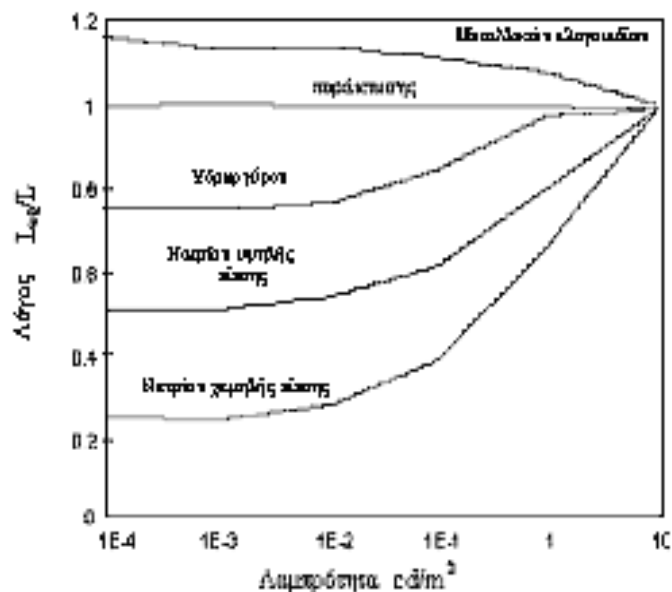
Οπτική απόδοση

Η οπτική απόδοση μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός της οπτικής οξύτητας και του απαιτούμενου χρόνου για την αντίληψη του ερεθίσματος. Οι Loe και Waters

ερεύνησαν την οπτική αντίληψη χρησιμοποιώντας πηγές με διαφορετικές φασματικές κατανομές. Οι παρατηρητές έπρεπε να αναγνωρίσουν δακτυλίδια του Landolt διαφορετικών αντιθέσεων και μεγεθών. Η οπτική αντίληψη μετρήθηκε, ως ο αριθμός των σωστά αναγνωρισμένων δακτυλιδιών προς τον ολικό αριθμό δακτυλιδιών, που παρουσιάστηκαν λαμβάνοντας υπ' όψη και το χρόνο που απαιτήθηκε για την αναγνώριση. Τα αποτελέσματα αυτά υποστηρίχτηκαν και από τις μετρήσεις του Halogen και του Vgabel. Τα επίπεδα λαμπρότητας ήταν καθαρά φωτοπικά.

Αυτά τα αποτελέσματα δεν δείχνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των φωτεινών πηγών που χρησιμοποιήθηκαν. Το σχεδόν μονοχρωματικό φως έχει μια περισσότερο προβλέψιμη φασματική απόκλιση από εκείνο των διαφόρων πηγών. Ωστόσο αναμένεται η οπτική απόδοση να εξαρτάται από την φασματική κατανομή της πηγής σε χαμηλά επίπεδα λαμπρότητας.

Για να συγκριθούν διαφορετικές φασματικές κατανομές ως προς την φαινόμενη φωτεινότητα τους σε χαμηλά επίπεδα λαμπρότητας, σχεδιάζεται ο λόγος L_{eq}/L σαν συνάρτηση του L για περιοχές λαμπρότητας από φωτοπικά επίπεδα σε σκοτοπικά, σχήμα 4.2.6. Όσο μεγαλύτερος θα είναι αυτός ο λόγος, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η οπτική απόδοση. Όσο χαμηλώνει η λαμπρότητα, οπότε η ευαισθησία του οφθαλμού γίνεται μεγαλύτερη στα μικρότερα μήκη κύματος, ο λόγος αυτός θα μεγαλώνει για πηγές των οποίων οι φασματικές κατανομές θα είναι περισσότερο "πλούσιες" στα μικρά μήκη κύματος.



Σχήμα 4.2.6 Οπτική απόδοση σε σχέση με την λαμπρότητα [55].

Τελικά οι βασικές οπτικές συναρτήσεις όπως ευαισθησία, οπτική αντίθεση, οπτική οξύτητα, προσδιορίζονται από την προσλαμβανόμενη φωτεινότητα στην οποία αυτά τα μεγέθη μετρώνται. Στα φωτοπικά επίπεδα η φωτεινότητα εκφράζεται από την λαμπρότητα. Στα μεσοπικά και σκοτοπικά επίπεδα η ισοδύναμη λαμπρότητα εκφράζοντας την προσλαμβανόμενη φωτεινότητα, είναι μέγεθος το οποίο πρέπει να μετράται.

Στους πίνακες 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4 φαίνεται ο λόγος L_{eq}/L για τις διάφορες φασματικές κατανομές σαν συνάρτηση των επιπέδων λαμπρότητας.

Πίνακας 4.2.2 Απαιτούμενα σχετικά lumen διαφορετικών πηγών ώστε να έχουμε ίδια οπτική απόδοση. (100lm σε λαμπρότητα 10 cd/m^2).

| Λαμπρότητα (cd/m^2) | 10^{-4} | 10^{-3} | 10^{-2} | 10^{-1} | 1 | 3 | 10 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|-----|-----|
| Μεταλλικών αλογονιδίων | 86 | 88 | 88 | 90 | 93 | 95 | 100 |
| Υδραργύρου υψηλής πίεσης | 133 | 134 | 130 | 119 | 103 | 98 | 100 |
| Νατρίου υψηλής πίεσης | 194 | 198 | 186 | 164 | 126 | 107 | 100 |
| Νατρίου χαμηλής πίεσης | 404 | 421 | 367 | 210 | 153 | 113 | 100 |

Πίνακας 4.2.3 Οπτική απόδοση φωτεινών πηγών των 400W (τα στοιχεία λήφθηκαν από Philips, Osram Sylvania).

| | lm | lm/W | W/100lm |
|-------------------------------|-------|------|---------|
| Μεταλλικών αλογονιδίων 400W | 25000 | 62.5 | 1.6 |
| Υδραργύρου υψηλής πίεσης 400W | 19000 | 47.5 | 2.1 |
| Νατρίου υψηλής πίεσης 400W | 45000 | 112 | 0.9 |
| Νατρίου χαμηλής πίεσης 400W | 27000 | 150 | 0.66 |

Με την χρήση των δεδομένων των πινάκων 4.2.3 και 4.2.2 κατασκευάζεται ο πίνακας 4.2.4.

Πίνακας 4.2.4 Σχετική ισχύς του λαμπτήρα σε W ο οποίος αποδίδει 100 lm σε λαμπρότητα 10cd/m^2 ώστε να επιτυγχάνεται η ίδια οπτική απόδοση.

| Λαμπρότητα (cd/m^2) | 10^{-4} | 10^{-3} | 10^{-2} | 10^{-1} | 1 | 3 | 10 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|------|------|
| Μεταλλικών αλογονιδίων | 1.38 | 1.40 | 1.40 | 1.44 | 1.49 | 1.52 | 1.6 |
| Υδραργύρου υψηλής πίεσης | 2.79 | 2.81 | 2.73 | 2.50 | 2.16 | 2.06 | 2.1 |
| Νατρίου υψηλής πίεσης | 2.12 | 1.78 | 2.03 | 1.48 | 1.13 | 0.96 | 0.9 |
| Νατρίου χαμηλής πίεσης | 2.56 | 2.78 | 2.42 | 1.39 | 1.01 | 0.75 | 0.66 |

4.3 Το μοντέλο του S.Kokoschka

Αυτό το μοντέλο αναπτύχθηκε με σκοπό η φωτομετρία να γίνει εφαρμόσιμη στην περιοχή της μεσοπική όρασης [50,57]. Βασίζεται σε εμπειρικά προσδιορισμένες καμπύλες φασματικής ευαισθησίας. Αυτές κατασκευάστηκαν με δεδομένα που προέκυψαν από μετρήσεις της μεθόδου άμεσης ετεροχρωματικής ταύτισης φωτεινότητας, στην μεσοπική περιοχή για οπτικά πεδία εύρους από 3° έως 64°. Με μαθηματική επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, με χρήση της ανυσματικής ανάλυσης, διαπιστώθηκε η ύπαρξη τεσσάρων συνιστωσών. Αυτές αντιστοιχούν στις εξόδους των φωτοανιχνευτών του ανθρωπίνου οφθαλμού. Δηλαδή των τριών ειδών κωνίων και των ραβδίων.

Έτσι λοιπόν, η φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού, με βάση την οποία πραγματοποιείται η ταύτιση φωτεινότητας στην μεσοπική περιοχή, είναι δυνατόν να εκφραστεί σαν γραμμικός συνδυασμός των τριών συνιστωσών που οφείλονται στα κωνία και αυτής που οφείλεται στα ραβδία. Με αυτόν το τρόπο η ισοδύναμη λαμπρότητα για κάθε φασματική κατανομή μπορεί να υπολογισθεί από τα εξής:

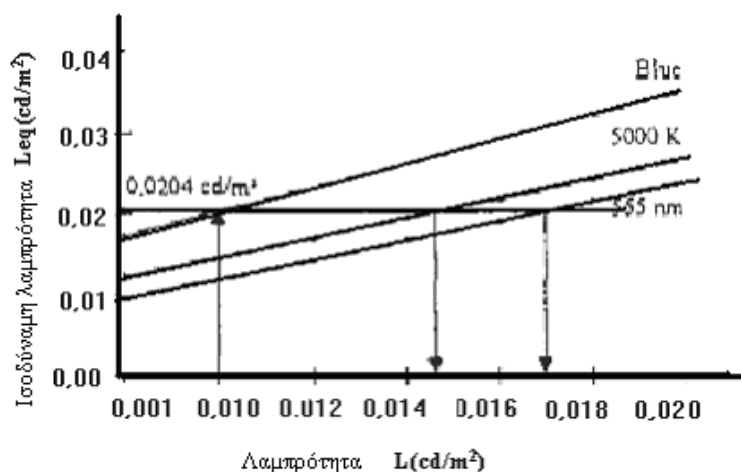
- α) τις καθορισμένες από την CIE συναρτήσεις $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$
- β) την σχετική φασματική ευαισθησία για την σκοτοπική όραση $V'(\lambda)$ και
- γ) από τέσσερις συντελεστές F_x , F_y , F_z και F_s των οποίων οι τιμές εξαρτώνται από τα επίπεδα λαμπρότητας. Οι τιμές των συντελεστών αυτών προσδιορίζονται πειραματικά. Η επιλογή των τιμών εξαρτάται από την ίδια ισοδύναμη λαμπρότητα που θέλουμε να προσδιορίσουμε. Για να λυθεί αυτό το κυκλικό πρόβλημα συνήθως απαιτείται μια αριθμητική λύση με χρήση υπολογιστών, ή λύση με γραφική μέθοδο.

Το μοντέλο αυτό αποσκοπεί στο να προσδιορίσει την ισοδύναμη λαμπρότητα. Αυτή είναι μια έννοια που χρησιμοποιείται πολλές φορές στην φωτομετρία. Συνήθως εκφράζεται ως ο λόγος B/L , όπου το B η λαμπρότητα του ερεθίσματος το οποίο είναι το ίδιο φωτεινό με ένα λευκό αναφοράς. Ως λευκό αναφοράς χρησιμοποιείται η φασματική κατανομή μέλανος σώματος 2042° K. Μετά τον ορισμό της cd, η ακτινοβολία των 555nm θεωρείται ως ερέθισμα αναφοράς. Για την συνεπή χρήση της ισοδύναμης λαμπρότητας πρέπει να είναι γνωστά:

- α) οι συνθήκες παρατήρησης όπως μέγεθος και σχήμα του οπτικού πεδίου,
- β) η φασματική κατανομή του ερεθίσματος αναφοράς και
- γ) το είδος του κριτηρίου για την οπτική ταύτιση.



Σχήμα 4.3.1 Πειραματική διάταξη οπτικής ταύτισης, σε επίπεδο αρχής [57].



Σχήμα 4.3.2 Γραφική λύση του προσδιορισμού της ισοδύναμης λαμπρότητας μετά από αλλαγή του ερεθίσματος αναφοράς [57].

Στο σχήμα 4.3.1 παρουσιάζεται σε επίπεδο αρχής η μέθοδος οπτικής ταύτισης. Όταν υπάρχει ταύτιση φωτεινότητας του ελεγχόμενου ερεθίσματος με αυτό της αναφοράς τότε η λαμπρότητα του υπό εξέταση ερεθίσματος μπορεί να εκφραστεί, κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες, με την λαμπρότητα του ερεθίσματος αναφοράς. Είναι δυνατόν, όταν είναι γνωστή η ισοδύναμη λαμπρότητα ως προς ένα ερέθισμα αναφοράς να εκφραστεί ως προς κάποιο άλλο. Αυτό γίνεται αν είναι γνωστές οι ισοδύναμες λαμπρότητες των δύο ερεθισμάτων αναφοράς. Η διαδικασία αυτή ερμηνεύεται στο σχήμα 4.3.2. Για το μπλε ερέθισμα με λαμπρότητα 0.01 cd/m^2 , η τιμή της ισοδύναμης λαμπρότητας είναι 0.0204 cd/m^2 , ως προς την πηγή 2042°K . Η ισοδύναμη λαμπρότητα ως προς την ακτινοβολία αναφοράς των 555 nm , βρίσκεται

ως το σημείο τομής της οριζόντιας ευθείας με την ευθεία των 555nm, δηλαδή είναι 0.0168 cd/m².

Η ισοδύναμη λαμπρότητα που ορίζεται με αυτό τον τρόπο, δεν είναι προσθετική. Ειδικότερα στην μεσοπική περιοχή μπορεί η ισοδύναμη λαμπρότητα του αθροίσματος δύο ή περισσότερων ακτινοβολιών, να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από το άθροισμα των ισοδυνάμων λαμπροτήτων, των επί μέρους ακτινοβολιών.

Δηλαδή εν γένει ισχύει: $L_{eq} \neq \sum_i L_{eq,i}$

Η ισοδύναμη λαμπρότητα μπορεί να ορισθεί ως:

$$L' = K'_m \cdot \int L_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V'(\lambda) d\lambda \quad L_{eq} = K_{m,eq} \cdot \int L_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V_{eq}(\lambda) d\lambda$$

όπου $L_{e,\lambda}$ η ακτινοβολία (radiance) του ερεθίσματος $K_{m,eq}$ η φωτεινή απόδοση εξαρτώμενη από την φασματική κατανομή του ερεθίσματος αναφοράς και V_{eq} η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας για τις συνθήκες του πειράματος.

Λόγω της οπτικής ταύτισης θα ισχύει:

$$K_{m,eq} \cdot \int L_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V_{eq}(\lambda) d\lambda = K'_m \cdot \int L_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

οπότε:

$$L_{eq} = \frac{\int S_r(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int S_r(\lambda) \cdot V_{eq}(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int S(\lambda) \cdot V_{eq}(\lambda) d\lambda}{\int S_r(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}$$

όπου $S_r(\lambda)$ και $S(\lambda)$ είναι οι σχετικές φασματικές κατανομές των ερεθισμάτων αναφοράς και υπό έλεγχο.

Σύμφωνα με αυτή την θέση είναι δυνατόν να θεωρηθούν ως ισοδύναμες λαμπρότητες η σκοτοπική, η Judd modified, κλπ. Περισσότερο συγκεκριμένα:

Σκοτοπική λαμπρότητα

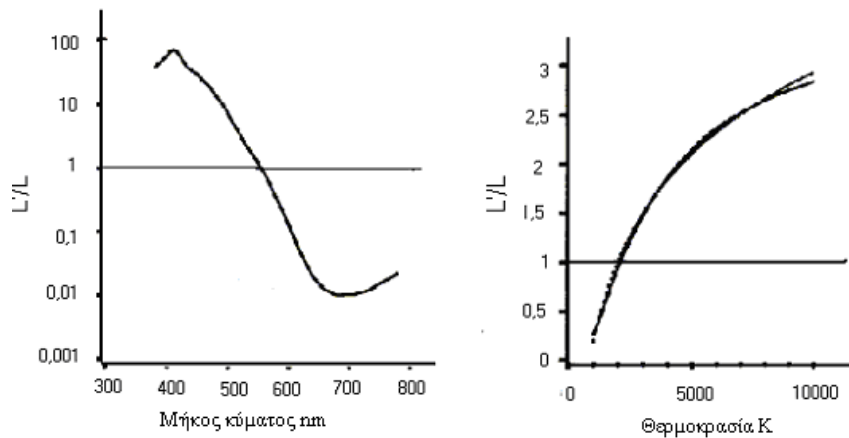
Αυτή δίδεται από την σχέση

$$L' = K'_m \cdot \int L_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V'(\lambda) d\lambda$$

Μπορεί να εκληφθεί ως η ισοδύναμη λαμπρότητα που περιγράφει τις αποκρίσεις των ραβδίων. Η σταθερά K' είναι ίση με 1700 lm/W Στο σχήμα 4.3.3 φαίνεται ο λόγος L'/L ως συνάρτηση του λ και της θερμοκρασίας χρώματος. Η τελευταία δίνεται προσεγγιστικά από την σχέση:

$$\frac{L'}{L} = 2.74 \log T - 8.05$$

δηλαδή αν $T=6500^{\circ}\text{K}$ έχουμε $L'/L=2.45$, αυτό σημαίνει ότι για ταύτιση σε σκοτοπικές συνθήκες η λαμπρότητα της ακτινοβολίας αναφοράς (555nm) πρέπει να είναι 2.45 φορές μεγαλύτερη από ακτινοβολία των 6500°K .



Σχήμα 4.3.3 Ο λόγος L'/L συναρτήσει του μήκους κύματος και θερμοκρασίας [57].

Τροποποιημένη λαμπρότητα κατά Judd (L_M) και L_{10}

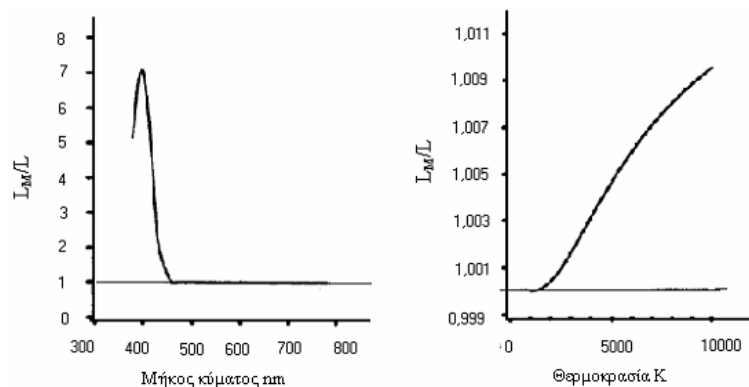
Σε αυτή την περίπτωση η λαμπρότητα δίνεται από την σχέση:

$$L_M = K_{m,M} \cdot \int L_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V_M(\lambda) d\lambda \quad K_M=683 \text{ lm/W}$$

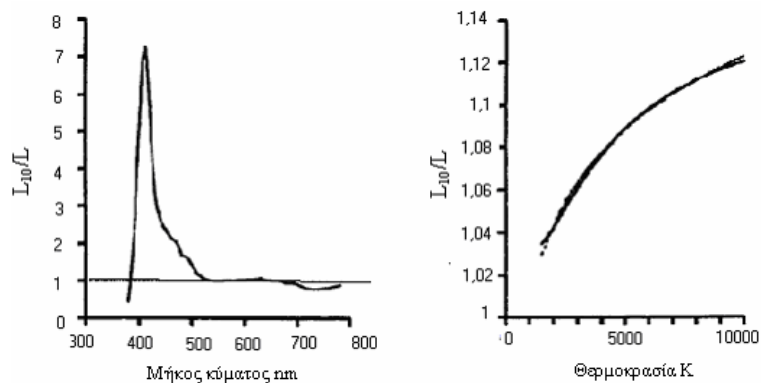
$$L_{10} = K_{m,10} \cdot \int L_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V_{10}(\lambda) d\lambda \quad K_{10}=683 \text{ lm/W}$$

Στα σχήματα 4.3.4 και 4.3.5 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις L_M/L και L_{10}/L . Είναι φανερό ότι στην πρώτη περίπτωση έχουμε διαφορές μόνο για μικρά μήκη κύματος. Στην δεύτερη περίπτωση πάλι οι διαφορές αφορούν μικρά μήκη κύματος. Η εξάρτηση από την θερμοκρασία δίνεται από την σχέση

$$\frac{L_{10}}{L} = 0.670 + 0.113 \log T$$



Σχήμα 4.3.4 Ο λόγος L_M/L συναρτήσει του μήκους κύματος και θερμοκρασίας [57].



Σχήμα 4.3.5 Ο λόγος L_{10}/L συναρτήσει του μήκους κύματος και θερμοκρασίας [57].

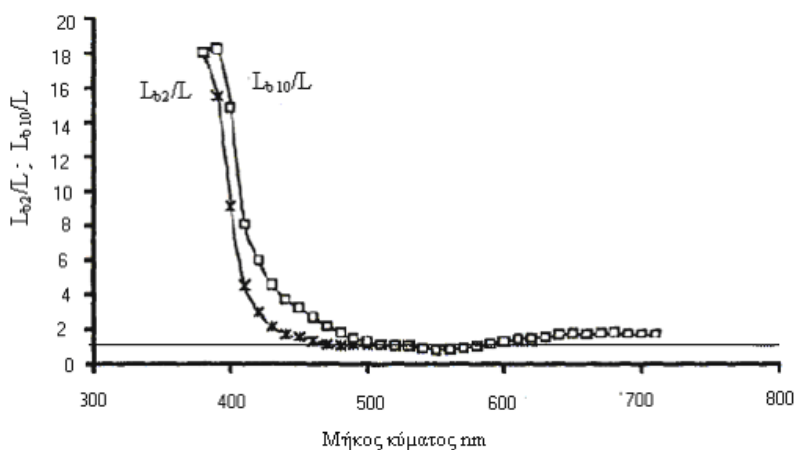
Ισοδύναμες λαμπρότητες $L_{b,2}(\lambda)$ και $L_{b,10}(\lambda)$

Σε αυτή την περίπτωση οι εξισώσεις:

$$L_{b,2}(\lambda) = \frac{K_{m,b,2}}{K_m} \cdot \frac{V_{b,2}(\lambda)}{V(\lambda)}$$

$$L_{b,10}(\lambda) = \frac{K_{m,b,10}}{K_m} \cdot \frac{V_{b,10}(\lambda)}{V(\lambda)}$$

μπορεί να εκληφθούν ως ισοδύναμες λαμπρότητες για φασματικές ακτινοβολίες και να υπολογισθεί η ετεροχρωματική απόδοση φωτεινότητας για 2 και 10 μοίρες αντίστοιχα. Στο σχήμα 4.3.6 δίνεται ο λόγος $L_{b,2}(\lambda)/L$ και $L_{b,10}(\lambda)/L$



Σχήμα 4.3.6 Ο λόγος $L_{b,2}(\lambda)/L$ και $L_{b,10}(\lambda)/L$ σε σχέση με το μήκος κύματος [57].

Μεσοπική λαμπρότητα

Για να ορισθεί η μεσοπική λαμπρότητα απαιτούνται πολλές μετρήσεις. Υπάρχουν στην βιβλιογραφία αρκετές, αλλά η εξίσωση αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί

μόνο για αχρωματικές καμπύλες φασματικής ευαισθησίας. Αν χρησιμοποιηθούν καμπύλες που προκύπτουν από ταύτιση φωτεινότητας θα υπάρχουν σφάλματα προσθετικότητας.

Το πρόβλημα της προσθετικότητας μπορεί να ξεπεραστεί αν αναλυθεί η φωτεινότητα σε δύο συνιστώσες την χρωματική και την αχρωματική. Αν θεωρηθεί ότι έχουμε πεδία 10° κεντρικά, καθώς επίσης και ότι το χρωματικό και αχρωματικό κανάλι λειτουργούν ανεξάρτητα τότε:

$$L_{eq} = f_a \cdot f_c \cdot L$$

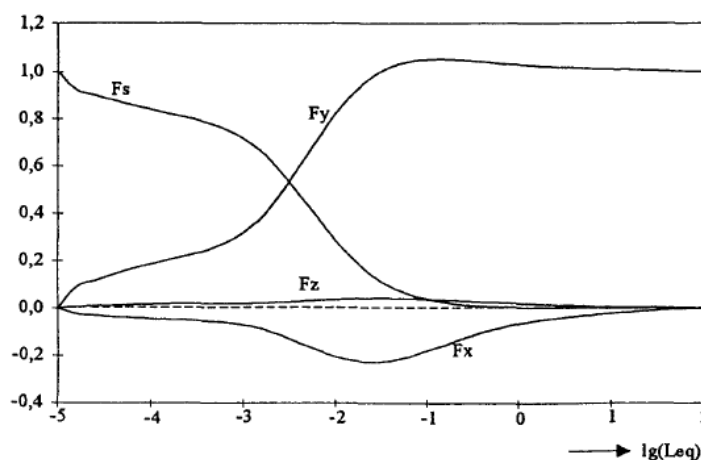
όπου f_a παριστά την συνεισφορά της αχρωματικής συνιστώσας που οφείλεται στην αλληλεπίδραση κωνίων-ραβδίων, f_c την συνεισφορά της χρωματικής συνιστώσας που οφείλεται στην αλληλεπίδραση κωνίων-κωνίων, $L_{eq,a}$ το αχρωματικό τμήμα της ισοδύναμης λαμπρότητας.

Το αχρωματικό τμήμα της ισοδύναμης λαμπρότητας ως προς μια συγκεκριμένη ακτινοβολία αναφοράς είναι :

$$L_{eq,a} = \left(\frac{X}{Y} F_x + F_y + \frac{Z}{Y} F_z + \frac{L'}{L} F_s \right) \cdot L = f_a L$$

όπου X, Y, Z είναι οι τριχρωματικοί αριθμοί και L' η σκοτοπική λαμπρότητα., που αντιστοιχούν στην δράση των κωνίων και ραβδίων. Ο βαθμός συνεισφοράς προσδιορίζεται από τις τιμές F_x , F_y , F_z , F_s .

Οι τιμές αυτές προσδιορίζονται πειραματικά. Στον πίνακα 4.3.1 αναγράφονται οι τιμές των συναρτήσεων F, για διαφορετικά ερεθίσματα αναφοράς. Στο σχήμα 4.3.7 δίνεται η γραφική τους παράσταση συναρτήσεως του λογαρίθμου της ισοδύναμης λαμπρότητας. Η λύση της εξίσωσης απαιτεί μέθοδο διαδοχικών προσεγγίσεων.



Σχήμα 4.3.7 Γραφική των F συναρτήσεων παράσταση συναρτήσεως του $\log L_{eq}$ [57].

Πίνακας 4.3.1 Οι τιμές των F συναρτήσεων και φυσική κόρη για οπτικό πεδίο 10°. Ο όρος Leq αντιστοιχεί στο αχρωματικό τμήμα της ισοδύναμης λαμπρότητας.

| Leq | 555nm | | | | 2042 K | | | | 6500 K | | | |
|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| | Fx | Fy | Fz | Fs | Fx | Fy | Fz | Fs | Fx | Fy | Fz | Fs |
| 1.00E-05 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.00E+00 |
| 1.58E-05 | -2.48E-02 | 8.91E-02 | 6.12E-03 | 9.24E-01 | -2.44E-02 | 8.77E-02 | 5.97E-03 | 9.42E-01 | -3.63E-02 | 1.37E-01 | 1.09E-02 | 8.86E-01 |
| 2.51E-05 | -3.16E-02 | 1.16E-01 | 8.72E-02 | 9.00E-01 | -3.16E-02 | 1.16E-01 | 8.60E-03 | 9.23E-01 | -4.10E-02 | 1.59E-01 | 1.35E-02 | 8.65E-01 |
| 3.98E-05 | -3.72E-02 | 1.41E-01 | 1.14E-02 | 8.78E-01 | -3.75E-02 | 1.42E-01 | 1.14E-02 | 9.04E-01 | -4.47E-02 | 1.79E-01 | 1.59E-02 | 8.46E-01 |
| 6.31E-05 | -4.18E-02 | 1.63E-01 | 1.41E-02 | 8.58E-01 | -4.25E-02 | 1.66E-01 | 1.41E-02 | 8.86E-01 | -4.78E-02 | 1.98E-01 | 1.78E-02 | 8.28E-01 |
| 1.00E-04 | -4.54E-02 | 1.84E-01 | 1.64E-02 | 8.40E-01 | -4.67E-02 | 1.87E-01 | 1.66E-02 | 8.69E-01 | -5.02E-02 | 2.16E-01 | 1.89E-02 | 8.11E-01 |
| 1.58E-04 | -4.83E-02 | 2.03E-01 | 1.81E-02 | 8.22E-01 | -4.96E-02 | 2.07E-01 | 1.85E-02 | 8.53E-01 | -5.29E-02 | 2.35E-01 | 1.93E-02 | 7.94E-01 |
| 2.51E-04 | -5.08E-02 | 2.21E-01 | 1.90E-02 | 8.05E-01 | -5.23E-02 | 2.27E-01 | 1.96E-02 | 8.36E-01 | -5.74E-02 | 2.61E-01 | 1.94E-02 | 7.73E-01 |
| 3.98E-04 | -5.41E-02 | 2.43E-01 | 1.93E-02 | 7.85E-01 | -5.55E-02 | 2.48E-01 | 2.00E-02 | 8.19E-01 | -6.58E-02 | 3.00E-01 | 1.98E-02 | 7.42E-01 |
| 6.31E-04 | -6.00E-02 | 2.73E-01 | 1.94E-02 | 7.57E-01 | -6.13E-02 | 2.79E-01 | 2.02E-02 | 7.95E-01 | -8.03E-02 | 3.56E-01 | 2.08E-02 | 6.98E-01 |
| 1.00E-03 | -7.10E-02 | 3.20E-01 | 2.00E-02 | 7.17E-01 | -7.19E-02 | 3.26E-01 | 2.08E-02 | 7.62E-01 | -1.01E-01 | 4.33E-01 | 2.30E-02 | 6.39E-01 |
| 1.58E-03 | -8.88E-02 | 3.87E-01 | 2.14E-02 | 6.59E-01 | -8.96E-02 | 3.94E-01 | 2.23E-02 | 7.16E-01 | -1.28E-01 | 5.29E-01 | 2.63E-02 | 5.66E-01 |
| 2.51E-03 | -1.15E-01 | 4.81E-01 | 2.44E-02 | 5.78E-01 | -1.17E-01 | 4.92E-01 | 2.54E-02 | 6.51E-01 | -1.58E-01 | 6.35E-01 | 3.03E-02 | 4.84E-01 |
| 3.98E-03 | -1.48E-01 | 5.95E-01 | 2.85E-02 | 4.80E-01 | -1.53E-01 | 6.22E-01 | 3.02E-02 | 5.67E-01 | -1.87E-01 | 7.42E-01 | 3.44E-02 | 4.01E-01 |
| 6.31E-03 | -1.80E-01 | 7.13E-01 | 3.30E-02 | 3.79E-01 | -1.93E-01 | 7.68E-01 | 3.59E-02 | 4.71E-01 | -2.12E-01 | 8.43E-01 | 3.83E-02 | 3.20E-01 |
| 1.00E-02 | -2.06E-01 | 8.23E-01 | 3.71E-02 | 2.83E-01 | -2.30E-01 | 9.13E-01 | 4.16E-02 | 3.71E-01 | -2.30E-01 | 9.31E-01 | 4.13E-02 | 2.46E-01 |
| 1.58E-02 | -2.23E-01 | 9.12E-01 | 4.00E-02 | 2.02E-01 | -2.58E-01 | 1.04E+00 | 4.62E-02 | 2.77E-01 | -2.40E-01 | 1.00E+00 | 4.33E-02 | 1.83E-01 |
| 2.51E-02 | -2.28E-01 | 9.79E-01 | 4.17E-02 | 1.37E-01 | -2.72E-01 | 1.14E+00 | 4.91E-02 | 1.96E-01 | -2.40E-01 | 1.05E+00 | 4.42E-02 | 1.32E-01 |
| 3.98E-02 | -2.21E-01 | 1.02E+00 | 4.18E-02 | 9.09E-02 | -2.68E-01 | 1.20E+00 | 4.98E-02 | 1.33E-01 | -2.31E-01 | 1.08E+00 | 4.39E-02 | 9.06E-02 |
| 6.31E-02 | -2.04E-01 | 1.04E+00 | 4.04E-02 | 6.03E-02 | -2.49E-01 | 1.22E+00 | 4.83E-02 | 8.63E-02 | -2.12E-01 | 1.10E+00 | 4.23E-02 | 6.05E-02 |
| 1.00E-01 | -1.80E-01 | 1.05E+00 | 3.81E-02 | 3.93E-02 | -2.19E-01 | 1.22E+00 | 4.52E-02 | 5.39E-02 | -1.86E-01 | 1.10E+00 | 3.96E-02 | 4.00E-02 |
| 1.58E-01 | -1.54E-01 | 1.05E+00 | 3.52E-02 | 2.50E-02 | -1.84E-01 | 1.19E+00 | 4.10E-02 | 3.23E-02 | -1.58E-01 | 1.09E+00 | 3.63E-02 | 2.56E-02 |
| 2.51E-01 | -1.27E-01 | 1.05E+00 | 3.18E-02 | 1.53E-02 | -1.48E-01 | 1.16E+00 | 3.63E-02 | 1.88E-02 | -1.30E-01 | 1.07E+00 | 3.26E-02 | 1.57E-02 |
| 3.98E-01 | -1.01E-01 | 1.04E+00 | 2.82E-02 | 9.04E-03 | -1.15E-01 | 1.13E+00 | 3.13E-02 | 1.11E-02 | -1.03E-01 | 1.06E+00 | 2.86E-02 | 9.19E-03 |
| 6.31E-01 | -8.17E-02 | 1.03E+00 | 2.45E-02 | 5.33E-03 | -9.05E-02 | 1.10E+00 | 2.67E-02 | 6.34E-03 | -8.27E-02 | 1.05E+00 | 2.48E-02 | 5.40E-03 |
| 1.00E+00 | -6.54E-02 | 1.03E+00 | 2.08E-02 | 2.83E-03 | -7.08E-02 | 1.08E+00 | 2.23E-02 | 3.26E-03 | -6.60E-02 | 1.04E+00 | 2.09E-02 | 2.86E-03 |
| 1.58E+00 | -5.25E-02 | 1.02E+00 | 1.72E-02 | 1.35E-03 | -5.57E-02 | 1.07E+00 | 1.82E-02 | 1.49E-03 | -5.29E-02 | 1.03E+00 | 1.73E-02 | 1.36E-03 |
| 2.51E+00 | -4.25E-02 | 1.02E+00 | 1.38E-02 | 6.61E-04 | -4.45E-02 | 1.05E+00 | 1.45E-02 | 7.08E-04 | -4.28E-02 | 1.03E+00 | 1.39E-02 | 6.66E-04 |
| 3.98E+00 | -3.51E-02 | 1.02E+00 | 1.07E-02 | 3.59E-04 | -3.66E-02 | 1.04E+00 | 1.12E-02 | 3.90E-04 | -3.54E-02 | 1.02E+00 | 1.08E-02 | 3.63E-04 |
| 6.31E+00 | -2.90E-02 | 1.01E+00 | 8.07E-03 | 1.20E-04 | -2.99E-02 | 1.04E+00 | 8.40E-03 | 1.63E-04 | -2.92E-02 | 1.02E+00 | 8.14E-03 | 1.24E-04 |
| 1.00E+01 | -2.32E-02 | 1.01E+00 | 5.78E-03 | 0.00E+00 | -2.39E-02 | 1.03E+00 | 5.97E-03 | 0.00E+00 | -2.34E-02 | 1.02E+00 | 5.82E-03 | 0.00E+00 |
| 1.58E+01 | -1.76E-02 | 1.01E+00 | 3.87E-03 | 0.00E+00 | -1.80E-02 | 1.02E+00 | 3.97E-03 | 0.00E+00 | -1.77E-02 | 1.01E+00 | 3.90E-03 | 0.00E+00 |
| 2.51E+01 | -1.23E-02 | 1.00E+00 | 2.43E-03 | 0.00E+00 | -1.26E-02 | 1.02E+00 | 2.49E-03 | 0.00E+00 | -1.24E-02 | 1.01E+00 | 2.45E-03 | 0.00E+00 |
| 3.98E+01 | -7.60E-03 | 1.00E+00 | 1.36E-03 | 0.00E+00 | -7.71E-03 | 1.01E+00 | 1.38E-03 | 0.00E+00 | -7.64E-03 | 1.01E+00 | 1.36E-03 | 0.00E+00 |
| 6.31E+01 | -3.81E-03 | 1.00E+00 | 5.23E-04 | 0.00E+00 | -8.50E-04 | 1.01E+00 | 5.30E-04 | 0.00E+00 | -3.83E-03 | 1.00E+00 | 5.26E-04 | 0.00E+00 |
| 1.00E+02 | 0.00E+00 | 1.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |

Η χρωματική συνιστώσα θα δίδεται από την σχέση:

$$f_{c,p} = 10^{0.256 - 0.184y - 2.527xy + 4.656x^3y + 4.657x^4}$$

Στην μεσοπική περιοχή υπολογίζεται από την σχέση:

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

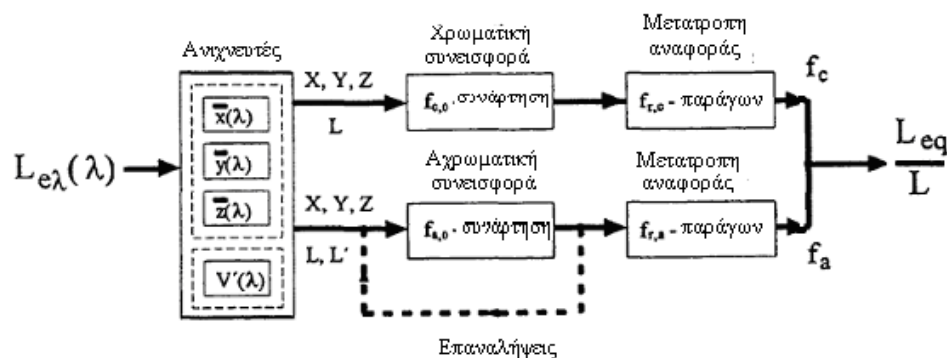
Οποσδήποτε όμως το χρωματικό φαινόμενο θα επηρεάζεται και από την φασματική κατανομή της πηγής αναφοράς.

Εάν η ακτινοβολία αναφοράς μιας δοσμένης ισοδύναμης λαμπρότητας αλλάξει, τότε η μετατροπή γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$L_{eq,a}(j) = \frac{L_{eq,a}(i)}{\frac{X_j}{Y_j} F_x + F_y + \frac{Z_j}{Y_j} F_z + \frac{L_j'}{L_j} F_s}$$

όπου με δείκτη j σημειώνονται οι χρωματικές συντεταγμένες τις νέας αναφοράς.

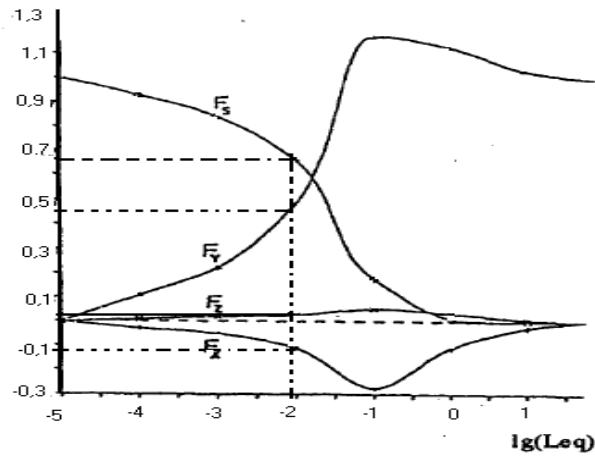
Η μέτρηση της ισοδύναμης λαμπρότητας σε επίπεδο αρχής φαίνεται στο σχήμα 4.3.8



Σχήμα 4.3.8 Σχηματικά ο τρόπος μέτρησης της ισοδύναμης λαμπρότητας [57].

Όπως αναφέρθηκε η ισοδύναμη λαμπρότητα μπορεί να βρεθεί με διαδοχικές προσεγγίσεις θεωρώντας ως αρχική ισοδύναμη λαμπρότητα την φωτοπική. Εκτός όμως από αυτή την μέθοδο έχει αναπτυχθεί και άλλη γραφική.

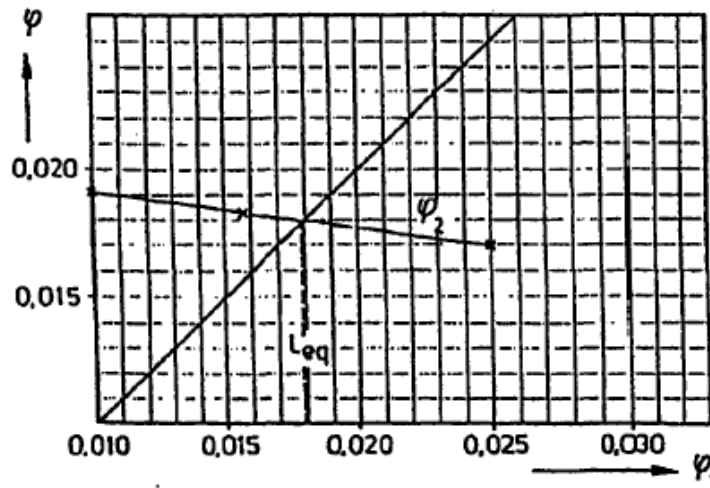
Συγκεκριμένα υπολογίζονται γραφικά οι τιμές των παραμέτρων για την δοθείσα λαμπρότητα και για άλλες δυο λαμπρότητες των οποίων οι τιμές των συντελεστών δίδονται ακριβώς (σχήμα 4.3.9). Υπολογίζονται τα ϕ_2 (πίνακας 4.3.2) και γίνεται η γραφική παράσταση του ϕ_2 συναρτήσει του ϕ_1 , (σχήμα 4.3.10), το σημείο τομής δίνει την ισοδύναμη λαμπρότητα.



Σχήμα 4.3.9 Γραφικός υπολογισμός των F συναρτήσεων για 0.01cd/m² [57].

Πίνακας 4.3.2 Υπολογισμός των ϕ_1, ϕ_2 .

| ϕ_1 | Λόγοι | X_{10}/Y_{10} | Y_{10}/Y_{10} | Z_{10}/Y_{10} | L'/L | $\sum \Lambda \cdot F$ | ϕ_2 |
|----------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|------------------------|-------------------------------|
| | Τιμές Λ | 0.971 | 1 | 1.04 | 2.29 | | $L_{10} \sum \Lambda \cdot F$ |
| 0.01 | F | -0.113 | 0.479 | 0.0249 | 0.661 | 1.909 | 0.01909 |
| | $\Lambda \cdot F$ | -0.1097 | 0.479 | 0.0258 | 1.513 | | |
| 0.0158 | F | -0.151 | 0.614 | 0.0298 | 0.574 | 1.813 | 0.01813 |
| | $\Lambda \cdot F$ | -0.1466 | 0.614 | 0.0309 | 1.314 | | |
| 0.0251 | F | -0.194 | 0.769 | 0.036 | 0.472 | 1.699 | 0.0169 |
| | $\Lambda \cdot F$ | -0.1883 | 0.769 | 0.0374 | 1.0808 | | |



Σχήμα 4.3.10 Γραφικός υπολογισμός της L_{eq} , ($L_{eq}=0.0179\text{cd/m}^2$) [57].

Το μοντέλο αυτό έχει τα πλεονεκτήματα να είναι εφαρμόσιμο στην περιοχή ανάμεσα φωτοπικής- σκοτοπικής όρασης και να βασίζεται στις γενικώς αποδεκτές συναρτήσεις της CIE. Επιπροσθέτως αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την

κατασκευή ενός φυσικού φωτόμετρου με τέσσερις εισόδους. Βέβαια επειδή η συνεισφορά της Z συνιστώσας είναι πολύ μικρή στην περιοχή της μεσοπικής όρασης, μια απλοποιημένη έκδοση ενός τέτοιου φωτόμετρου, θα μπορούσε να έχει μόνο τρεις εισόδους.

4.4 Το μοντέλο του I. Lewin

Ο Lewin [58 - 60], ξεκινά με την διαπίστωση, ότι δεν υπάρχει ένας μοναδικός συντελεστής, ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με τη φωτεινή ροή μιας πηγής, να προσδιορίζει ικανοποιητικά την μεταβολή του μεγέθους, στις συνθήκες μεσοπικής όρασης. Χρειάζεται ένας συντελεστής η καλύτερα μια σειρά συντελεστών, που να επιτρέπει τον υπολογισμό αυτών των μεταβολών, κατά την διάρκεια του σχεδιασμού μιας εφαρμογής. Στόχος του μοντέλου του είναι η ανάπτυξη μιας τεχνικής, η οποία να μην είναι αδικαιολόγητα επαχθής, αλλά να είναι κατανοητή και σχετικά εύκολη για τους σχεδιαστές ώστε να την ενσωματώσουν στις μελέτες τους. Εάν δεν ισχύει αυτό δεν θα έχει πρακτική εφαρμογή. Ο μεγάλος αριθμός των εργασιών, που έχουν δημοσιευθεί για αυτό το θέμα επί μια εικοσαετία και η μη εφαρμογή τους σε κάποιο σημαντικό βαθμό, επαληθεύει αυτή την άποψη.

Ο Lewin προτείνει την χρήση των ενεργών πολλαπλασιαστών LEM (Lumen Effectiveness Multipliers). Ο LEM είναι ένας συντελεστής που μετατρέπει τα κανονικά φωτοικά ή ονομαστικά lumen μιας πηγής, σε προσαρμοσμένα lumen για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα προσαρμοσμένα lumen περιγράφουν ικανοποιητικότερα τις οπτικές συνθήκες που δημιουργούνται.

Δυο σημεία είναι σημαντικά:

- Δεν υπάρχει μόνο μια τιμή του LEM. Αυτή επιλέγεται ανάλογα με τις συνθήκες της εφαρμογής. Για κεντρική όραση η τιμή του πρέπει να είναι 1.0 ενώ για περιφερειακή όραση η τιμή του μπορεί να είναι πολύ μεγάλη.
- Ο LEM είναι σχετικό μέγεθος. Η $V(\lambda)$ και οι άλλες συναρτήσεις είναι σχετικές. Αυτό γίνεται, για να αποφευχθεί η πολυπλοκότητα και οι συνέπειες αριθμητικών οπτικών συντελεστών, που θα έπρεπε να συνυπολογιστούν αν χρησιμοποιούντο απόλυτες τιμές. Ο LEM είναι πιο απλά οριζόμενος και χρησιμοποιούμενος σαν ο λόγος της απόδοσης δυο φασματικών κατανομών για τις δοσμένες συνθήκες.

$$LEM = \frac{\text{οπτική απόδοση φωτεινής πηγής}}{\text{οπτική απόδοση φωτεινής πηγής αναφοράς}}$$

Το να χρησιμοποιείται μια πηγή αναφοράς αποτελεί μια συνήθη πρακτική. Το πεδίο εφαρμογής των LEM, εφόσον γίνουν αποδεκτοί, θα είναι προφανώς ο εξωτερικός φωτισμός και ειδικότερα ο φωτισμός δρόμων. Οι λαμπτήρες που

χρησιμοποιούνται στο φωτισμό των δρόμων είναι κατά κύριο λόγο οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης, είναι έτσι λογικό να ορισθούν οι LEM με πηγή αναφοράς αυτούς τους λαμπτήρες.

$$LEM = \frac{\text{οπτική απόδοση της φωτεινής πηγής}}{\text{οπτική απόδοση πηγής νατρίου υψηλής πίεσης}}$$

Ορίζοντας έτσι τον LEM, η κατάσταση απλοποιείται περισσότερο. Για εφαρμογές που χρησιμοποιούν λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης είναι 1.0. Εάν έχει βρεθεί εργαστηριακά ότι μία πηγή έχει, κάτω από τις ίδιες συνθήκες απόδοση 50% μεγαλύτερη από την νατρίου υψηλής πίεσης, τότε ο συντελεστής έχει την τιμή 1.5. Το πρόβλημα είναι η επιλογή του συντελεστή. Αυτό εξαρτάται από το αν η όραση θα είναι κεντρική ή περιφερειακή, από τα επίπεδα λαμπρότητας, και από την φύση της ζητούμενης εφαρμογής. Από την στιγμή όμως που θα επιλεγεί ο συντελεστής, η εφαρμογή του είναι εξαιρετικά απλή.

Στην περιοχή της μεσοπικής όρασης τα μεσοπικά lumen μπορούν εύκολα να υπολογισθούν, με ολοκλήρωση χρησιμοποιώντας μια μεσοπική φασματική ευαισθησία στη θέση της $V(\lambda)$. Οπότε ο συντελεστής LEM θα μας δίδεται από την σχέση:

$$LEM = \frac{\text{Μεσοπικά lumen πηγής}}{\text{Καθορισμένα lumen πηγής}} \times \frac{\text{Καθορισμένα lumen νατρίου υψηλής πίεσης}}{\text{Μεσοπικά lumen νατρίου υψηλής πίεσης}}$$

Είναι αυτονόητο ότι η τιμή του LEM, θα εξαρτάται από την συνάρτηση φασματικής ευαισθησίας στην μεσοπική περιοχή που θα χρησιμοποιηθεί στην θέση της $V(\lambda)$.

Αναφορικά με τις διάφορες μεθόδους ανάπτυξης των LEM μπορούν να επισημανθούν τα εξής:

1. Δεδομένα που προέρχονται από φωτεινότητες και μεσοπικές συναρτήσεις, που συνάγονται από τέτοια δεδομένα παράγουν πολύ συντηρητικούς LEM, αν συγκριθούν με δημοσιευμένα δεδομένα μη κεντρικής όρασης. Δεδομένα βασισμένα στην φωτεινότητα δίνουν τιμές LEM περίπου 2, ενώ δεδομένα βασισμένα στην οπτική αντιληπτικότητα δίνουν τιμές για τον LEM περίπου 30.

2. Μεσοπικές συναρτήσεις βασισμένες στην ταύτιση λαμπρότητας έχουν αναπτυχθεί και ενόσω δεν υπάρχουν διεθνώς αποδεκτά δεδομένα, οι ερευνητές βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ τους.

3. Οι μεσοπικές συναρτήσεις, όπως έχουν αναπτυχθεί, είναι τυπικά ένας

συνδυασμός κεντρικής και μη κεντρικής όρασης. Δεν είναι γνωστό αν αυτό εξομοιώνει τον εξωτερικό φωτισμό. Οι μαρτυρίες δείχνουν ότι πολλά ατυχήματα μπορεί να προκαλούνται από αντικείμενα που αρχικά ανιχνεύθηκαν με την περιφερειακή όραση. Έτσι λοιπόν, οι μεσοπικές συναρτήσεις που προέρχονται από ταύτιση φωτεινότητας μπορεί να υποβαθμίζουν την φασματική κατανομή στις συνθήκες οδήγησης

4. Ο αριθμός των παραγόντων που κρύβονται πίσω από τα δεδομένα που βασίζονται στην οπτική αντίληψη, αποτελεί ένα μειονέκτημα στην χρήση των ερευνητικών αποτελεσμάτων που λήφθηκαν με αυτή τη μέθοδο.

5. Ο κατευθείαν υπολογισμός των φασματικών κατανομών νέων πηγών απαιτεί την χρήση μεσοπικών συναρτήσεων, οι οποίες είναι βασισμένες σε ταύτιση φωτεινότητας ή σε οπτική αντίληψη.

Οι παρακάτω πίνακες δείχνουν τις τιμές LEM που υπολογίσθηκαν. Ο πίνακας 4.4.1 είναι βασισμένος σε δεδομένα που προέρχονται από ταύτιση φωτεινότητας, ενώ ο πίνακας 4.4.2 σε δεδομένα που προέρχονται από οπτική αντίληψη.

Πίνακας 4.4.1 LEM (νατρίου υψηλής πίεσης=1.00) από μεσοπικές συναρτήσεις που παρήχθησαν σύμφωνα με το κριτήριο ταύτισης φωτεινότητας

| Λαμπρότητα (cd/m ²) | 0.001 | 0.01 | 0.1 | 1 | 3 | 10 |
|---------------------------------|-------|------|------|------|------|------|
| Μεταλλικών αλογονιδίων | 2.25 | 2.11 | 1.82 | 1.35 | 1.13 | 1.00 |
| Νατρίου υψηλής πίεσης | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Υδραργύρου | 1.48 | 1.43 | 1.38 | 1.22 | 1.09 | 1.00 |
| Νατρίου χαμηλής πίεσης | 0.47 | 0.51 | 0.61 | 0.82 | 0.95 | 1.00 |

Πίνακας 4.4.2 LEM (νατρίου υψηλής πίεσης =1.00) με χρήση μεσοπικών συναρτήσεων, οι οποίες παρήχθησαν σύμφωνα με το κριτήριο του χρόνου αντίδρασης.

| Λαμπρότητα (cd/m ²) | Σκοτοπική | 0.03 | 0.1 | 0.3 | Φωτοπική |
|---------------------------------|-----------|------|------|------|----------|
| Μεταλλικών αλογονιδίων | 2.58 | 2.3 | 1.88 | 1.40 | 1.00 |
| Νατρίου υψηλής πίεσης | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Υδραργύρου | 1.98 | 1.79 | 1.53 | 1.22 | 1.00 |
| Νατρίου χαμηλής πίεσης | 0.35 | 0.46 | 0.64 | 0.83 | 1.00 |

4.5 Το μοντέλο του A. Lewis

Ο Lewis [61] ερεύνησε την οπτική αντιληπτικότητα κάτω από συνθήκες φωτισμού που δημιουργούν πέντε διαφορετικές πηγές (νατρίου υψηλής πίεσης, νατρίου χαμηλής πίεσης, υδραργύρου υψηλής πίεσης και μεταλλικών αλογονιδίων) οι οποίες χαρακτηρίζονται από διαφορετικές φασματικές κατανομές.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια πέντε νέων ανθρώπων ηλικίας 20-25 ετών. Μετρήθηκαν ο χρόνος αντίδρασης και η ευαισθησία αντίθεσης. Τα επίπεδα λαμπρότητας κυμάνθηκαν από 0.1 σε 10 cd/m². Ο όρος «μέτρηση ευαισθησίας αντίθεσης» αναφέρεται στην μέτρηση του κατωφλιού αντίθεσης κάτω από διάφορες συνθήκες. Μια πρώτη απαίτηση για την ανθρώπινη όραση είναι η ικανότητα να διακρίνει την αντίθεση, που δημιουργείται από την διάφορα φωτεινότητας μεταξύ ενός αντικειμένου και του υποβάθρου. Όταν το κατώφλι αντίθεσης μικραίνει, αυτό σημαίνει ότι ο οφθαλμός είναι ικανός να διακρίνει μικρότερη αντίθεση ή, με άλλα λόγια, αυξάνεται η ικανότητα προς όραση.

Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι τα μικρά μήκη κύματος εμφανίζονται φωτεινότερα σε χαμηλές λαμπρότητες και έτσι οδηγούν σε υψηλότερη ευαισθησία αντίθεσης και οπτικής οξύτητας. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων οδήγησε στους ονομαζόμενους πολλαπλασιαστές του Lewis. Τα αποτελέσματα και οι μετρήσεις δίνονται στον πίνακα 4.5.1, 4.5.2 και στο σχήμα 4.5.1

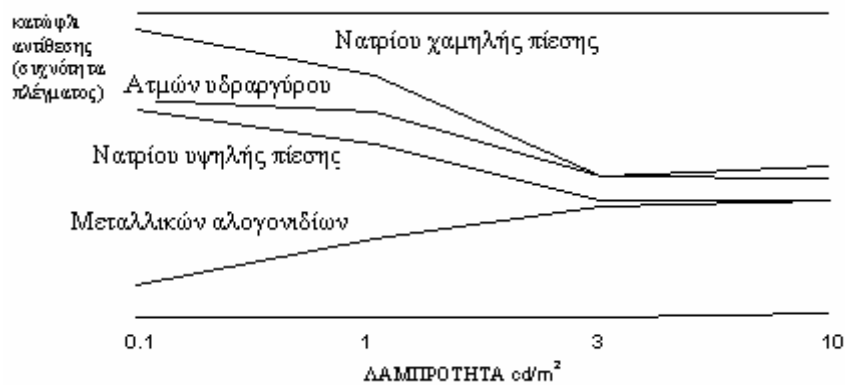
Πίνακας 4.5.1 Πολλαπλασιαστές Lewis για λαμπτήρες διαφόρων τύπων.

| Πηγή | Πολλαπλασιαστής ** |
|--------------------------|--------------------|
| Μεταλλικών αλογονιδίων | 1,0 |
| Πυράκτωσης | 1,5 |
| Υδραργύρου υψηλής πίεσης | 2,4 |
| Νατρίου υψηλής πίεσης | 3,9 |
| Νατρίου χαμηλής πίεσης | 4,8 |

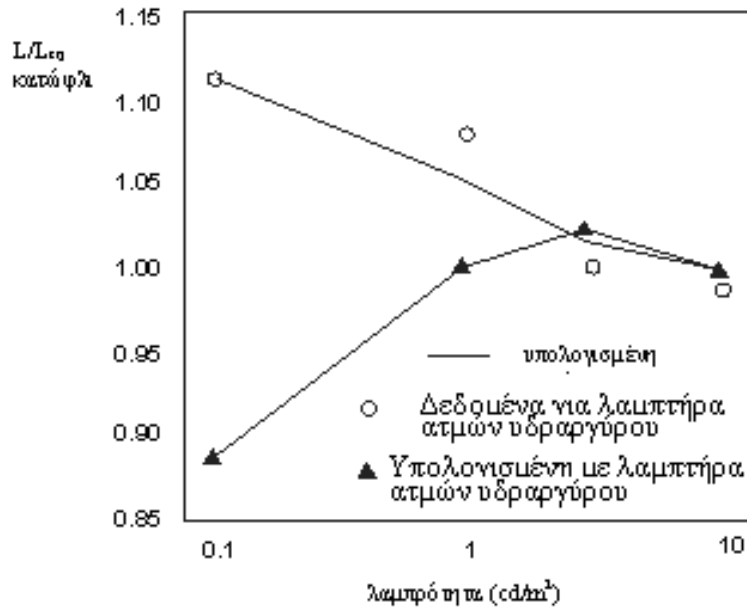
** Απαιτούμενος πολλαπλασιαστής για να παράγει τον ίδιο χρόνο αντίδρασης όπως η πηγή μεταλλικών αλογονιδίων σε επίπεδο 1,0 cd/m²

Πίνακας 4.5.2 Αποτελέσματα μετρήσεων (κατά Lewis)για διάφορους τύπους λαμπτήρων

| Λαμπρότητα (cd/m ²) | Αντίστροφο τιμής κατωφλίου | | |
|---------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|
| | Μεταλλικών αλογονιδίων | Νατρίου χαμηλής πίεσης | Υδραργύρου υψηλής πίεσης |
| 0,1 | 1,124 | 0,84 | 1,09 |
| 1 | 1,075 | 1,076 | 1,06 |
| 3 | 1,031 | 1,048 | 0,98 |
| 10 | 1,02 | 1 | 0,97 |



Σχήμα 4.5.1 Γραφική παράσταση των κατωφλίων αντίθεσης με την λαμπρότητα [61].



Σχήμα 4.5.2 Γραφική παράσταση του λόγου L/Leq σε σχέση με την λαμπρότητα [61].

4.6 Το μοντέλο του M. Ikeda

Σύμφωνα με τον Ikeda [50, 62 - 65] οι λόγοι που καθιστούν δύσκολη την εύρεση φασματικών καμπυλών ευαισθησίας για το ανθρώπινο μάτι στην μεσοπική περιοχή είναι δύο:

α) Η μεταβολή της φασματικής ευαισθησίας με την λαμπρότητα είναι συνεχής και πεπλεγμένη για να καθορισθεί από ένα σύνολο μετρήσεων.

β) Είναι δύσκολο να εκφρασθεί συναρτήσει της φωτοπικής και σκοτοπικής καμπύλης. Οι προσπάθειες που έχουν γίνει σε αυτή την κατεύθυνση, δεν έχουν δώσει σχέσεις που να είναι σε πλήρη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα, ενώ άλλες είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες για να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές.

Η πειραματική μέθοδος που ακολουθεί ως κριτήριο φωτεινής ταύτισης είναι η άμεση ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας. Ο λόγος που χρησιμοποιεί μόνο μία μέθοδο είναι ότι τα αποτελέσματα εξαρτώνται από την χρησιμοποιούμενη μέθοδο και τυχόν χρησιμοποίηση περισσότερων μεθόδων θα περιέπλεκε τα πράγματα.

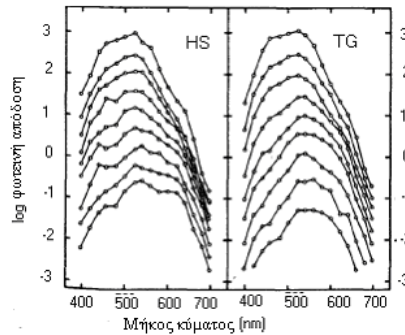
Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ένα διμερές πεδίο 10° , τοποθετημένο κάθετα στον παρατηρητή. Η μονοχρωματική ακτινοβολία παραγόταν από μια λάμπα Xenon 500W και φίλτρα με HBW 10nm. Το λευκό αναφοράς χαρακτηριζόταν από $x = 0.327$ και $y = 0.345$. Ένα φωτοπικό Troland της πηγής αναφοράς ήταν ίσο με 2.4 σκοτοπικά.

Στην πειραματική διαδικασία, το υποκείμενο πριν εκτεθεί στα ερεθίσματα προσάρμοζε την όραση του στο σκοτάδι για 30 λεπτά. Το ερέθισμα αναφοράς ήταν σταθερό, ενώ η ταύτιση γινόταν με την μεταβολή του εξεταζόμενου ερεθίσματος χρησιμοποιώντας ουδέτερα φίλτρα. Οι μετρήσεις έγιναν για την περιοχή -2 έως $+2$ log photopic Trolands.

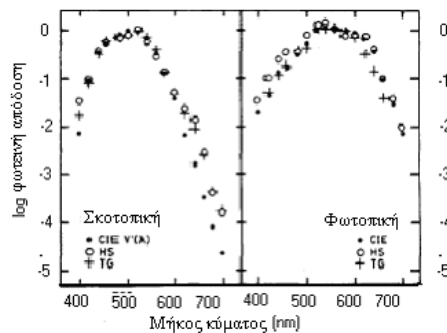
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.6.1, για δύο παρατηρητές, κάθε σημείο είναι ο μέσος όρος 15 επαναλήψεων.

Η φωτεινή απόδοση δίνεται από τον λογάριθμο του αντιστρόφου της σχετικής ενέργειας, που απαιτείται για την ταύτιση. Παρατηρείται μια ελάττωση της απόδοσης όχι όμως ομοιόμορφη σε σχέση με τα μήκη κύματος. Μια γρήγορη μείωση παρατηρείται στα μεσαία και μικρά μήκη κύματος, πράγμα που έχει παρατηρηθεί και από τον Kinney. Αναμένεται συμφωνία με την σκοτοπική καμπύλη στις -2 λογαριθμικές μονάδες. Πράγματι υπάρχει συμφωνία με εξαίρεση στα 400 nm και σε ακτινοβολίες με μήκος κύματος μεγαλύτερο των 620nm. Η πρώτη ασυμφωνία πιθανώς οφείλεται στις χρωστικές της κηλίδας και η δεύτερη η οποία είναι διαρκής,

στην συνεισφορά των L κωνίων. Η καμπύλη των -2 λογαριθμικών μονάδων θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την σκοτοπική καμπύλη. Στο άλλο άκρο αναμένεται μια συμφωνία με την φωτοπική καμπύλη. Λόγω όμως των διαφορετικών μεθόδων υπάρχει συμφωνία με την καμπύλη V_{b2} , σχήμα 4.6.2.



Σχήμα 4.6.1 Φασματικές ευαισθησίες για 9 επίπεδα φωτισμού αμφιβληστροειδούς για τους παρατηρητές (HS) και (TG) [62].



Σχήμα 4.6.2 Σύγκριση των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας, φωτοπικής-σκοτοπικής, με τα πειραματικά δεδομένα στις ακραίες τιμές φωτισμού[62].

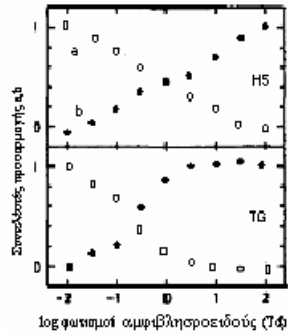
Η φασματική ευαισθησία μπορεί λοιπόν να υπολογισθεί από την σχέση:

$$\log S_T(\lambda) = a \log S_R(\lambda) + b \log S_C(\lambda) + c$$

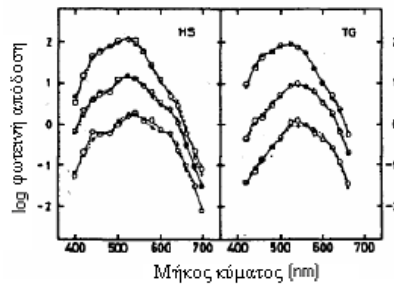
όπου $S_R(\lambda)$ είναι η καμπύλη κορυφής και παρουσιάζει την συνεισφορά των κωνίων, $S_C(\lambda)$ η τελευταία καμπύλη παρουσιάζει την φωτοπική καμπύλη με ταύτιση φωτεινότητας. Εάν υπολογισθούν οι συντελεστές a , b και c έχουμε:

$$\log S_T(\lambda) = a(\log S_R(\lambda) - M_R) + b(\log S_C(\lambda) - M_C) + M$$

όπου M_R , M_C , και M είναι οι μέσοι των $\log S_R(\lambda)$, $\log S_C(\lambda)$, και $\log S(\lambda)$, αντιστοίχως. Οι συντελεστές a , b παρίστανται στο σχήμα 4.6.3, ενώ η συμφωνία της θεωρητικά υπολογισμένης φασματικής ευαισθησίας και της πειραματικά ευρισκόμενης είναι ικανοποιητική όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.4



Σχήμα 4.6.3 Συντελεστές a και b για τους δύο παρατηρητές [62].



Σχήμα 4.6.4 Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών καμπυλών [62].

Η εξίσωση φασματικής ευαισθησίας μπορεί να γραφτεί και ως:

$$\log S_T(\lambda) = a(\log S_R(\lambda) + M - M_R) + b(\log S_C(\lambda) + M - M_C) + \varepsilon M$$

όπου $\varepsilon = 1 - a - b$. επειδή $a + b$ είναι περίπου 1, τότε ο τελευταίος όρος μπορεί να παραλειφθεί οπότε:

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

$$M - M_R = m_R$$

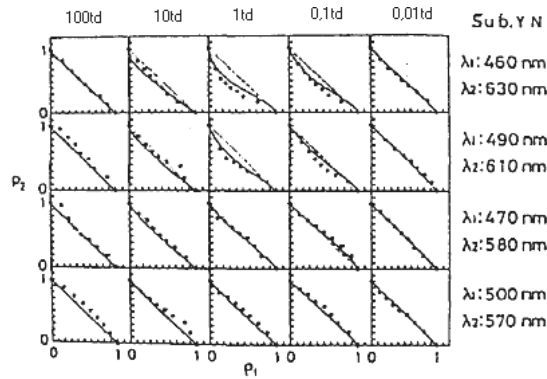
$$M - M_C = m_C$$

Θα πρέπει να τονισθεί, ότι οι εξισώσεις αυτές υποδεικνύουν μια αστοχία στην προσθετικότητα των σημάτων από τα ραβδία και τα κωνία, μιας και αυτά προστίθενται λογαριθμικά και όχι γραμμικά.

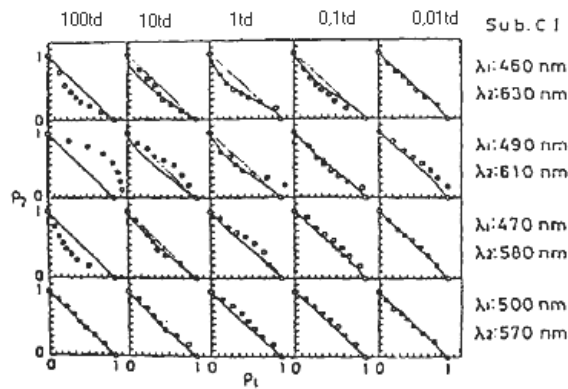
Για τον έλεγχο προσθετικότητας, χρησιμοποιήθηκαν οι αθροιστικοί δείκτες Stiles. Δύο ερεθίσματα διαφόρων μηκών κύματος λ_1 , λ_2 αναμειγνύονται σε διάφορες αναλογίες και για κάθε ανάμειξη γίνεται ταύτιση φωτεινότητας με ένα λευκό αναφοράς. Ο λόγος της ακτινοβολίας που συνεισφέρει στο μείγμα κάθε μήκος κύματος προς την ακτινοβολία όταν ενεργεί μόνο του προσδιορίζεται για κάθε μείξη. Έστω p_1 , p_2 οι λόγοι για τα αντίστοιχα μήκη κύματος. Θα ισχύει:

προσθετικότητα $p_1 + p_2 = 1$
 υπο-προσθετικότητα $p_1 + p_2 > 1$
 υπερ-προσθετικότητα $p_1 + p_2 < 1$

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων Nakado-Ikeda φαίνονται στα σχήματα 4.6.5 και 4.6.6



Σχήμα 4.6.5 Συναρτήσεις p_1 , p_2 , για πέντε επίπεδα φωτισμού αμφιβληστροειδούς, για τον παρατηρητή YN [62].



Σχήμα 4.6.6 Συναρτήσεις p_1 , p_2 , για πέντε επίπεδα φωτισμού αμφιβληστροειδούς, για τον παρατηρητή CI [62].

Για την εξήγηση των αποτελεσμάτων αυτών το a θεωρήθηκε ίσο προς:

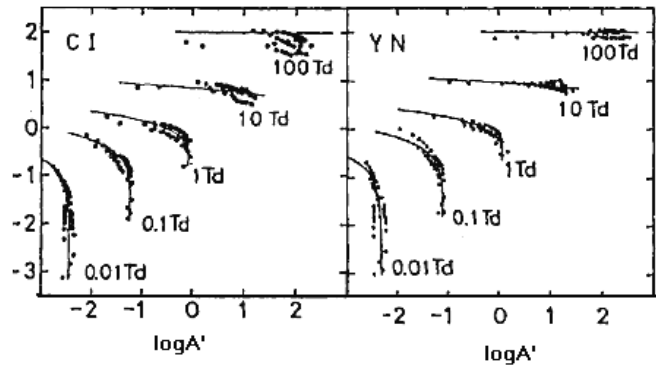
$$a = \frac{\sigma^a}{(\sigma^a + A^a)}$$

Ενώ τα $S_R(\lambda)$, $S_C(\lambda)$ αντικαθιστώνται από τα A και A' τα οποία αντιστοιχούν στα ποσά ενέργειας που απορροφούνται από τα κωνία και ραβδία αντίστοιχα.

$$A = sK_a \int_{360}^{830} L_e, \lambda \cdot \bar{y}_{10}(\lambda) d\lambda$$

$$A' = sK_a' \int_{360}^{780} L_e, \lambda \cdot V'(\lambda) d\lambda$$

όπου K_a και K_a' σταθερές κανονικοποίησης και L_e, λ η φασματική κατανομή ακτινοβολίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η A έχει υπολογισθεί μόνο από την $\bar{y}_{10}(\lambda)$, επίσης η συνεισφορά του χρωματικού καναλιού δεν εξετάζεται. Η σταθερά $K_a = 683 \text{lm/W}$. Τα αποτελέσματα των σχημάτων 4.6.6 και 4.6.5 μπορούν να επανασχεδιασθούν με την χρήση των νέων εξισώσεων οπότε προκύπτει το σχήμα 4.6.7.



Σχήμα 4.6.7 Αποτελέσματα διορθωμένα σύμφωνα με την θεωρία του Ikeda [62].

Έτσι υπολογίζονται οι τιμές των σταθερών, για τις οποίες γίνεται καλύτερη η προσέγγιση στις γραμμές του σχήματος. Έτσι έχουμε:

$$\sigma = 0.7(Td)$$

$$a = 1.0$$

$$\frac{K_a}{K_a'} = 1.0$$

Με αυτόν τρόπο η τελική εξίσωση είναι

$$\log Am = \frac{0.7}{0.7 + A} \log A' + \frac{A}{0.7 + A} \log A$$

Εάν απαιτούνται τιμές λαμπρότητας, αντί φωτισμού αμφιβληστροειδούς θα πρέπει να γίνει διαίρεση με την διατομή της κόρης. Για παράδειγμα αν $d=7\text{mm}$ τότε:

$$\log Lm = \frac{0.2}{0.2 + L} \log L' + \frac{L}{0.7 + L} \log L$$

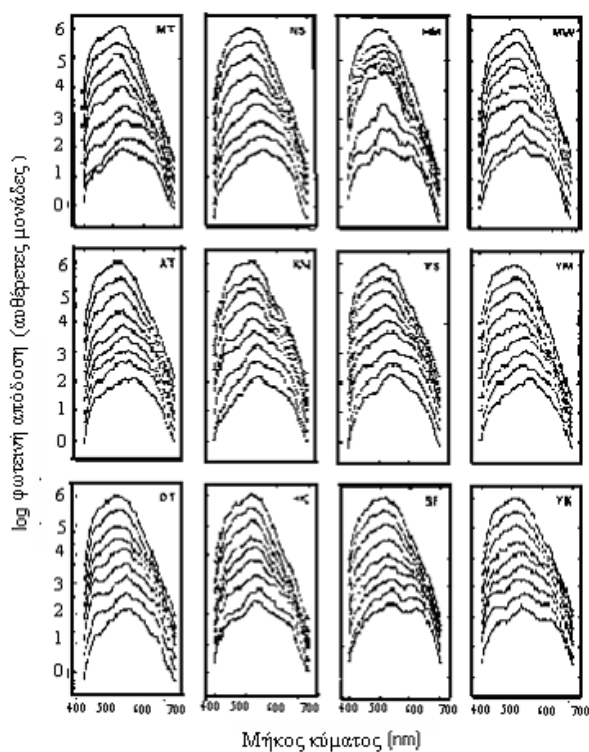
$$L = 683 \int_{360}^{830} L_e, \lambda \cdot \bar{y}_{10}(\lambda) d\lambda$$

$$L' = 683 \int_{360}^{780} L_e, \lambda \cdot V'(\lambda) d\lambda$$

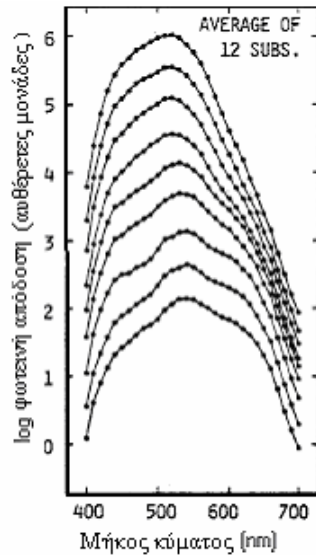
4.7 Το μοντέλο του K. Sagawa

Το μοντέλο αυτό [50,66] είναι αρκετά όμοιο με το μοντέλο του Ikeda. Η πειραματική μέθοδος που ακολουθείται ως μέθοδο φωτεινής ταύτισης είναι η άμεση ετεροχρωματική ταύτιση. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένα διμερές πεδίο 10° , τοποθετημένο κάθετα στον παρατηρητή. Ως λευκό αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το φως της πηγής Xenon. Ο λόγος της φωτοπικής προς την σκοτοπική λαμπρότητα για το λευκό αναφοράς μετρήθηκε ως 1.8. Η μονοχρωματική ακτινοβολία παραγόταν από μονοχρωμάτωρα, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και φίλτρα 400-440nm και 670-700nm. Χρησιμοποιήθηκε τεχνητή κόρη διαμέτρου 3mm.

Στην πειραματική διαδικασία οι μετρήσεις έγιναν για την περιοχή 100 έως 0.01Td με βήμα 0.5 λογαριθμικές μονάδες. Το υποκείμενο πριν εκτεθεί στα ερεθίσματα προσάρμοζε την όραση του στο σκοτάδι για 10 έως 30 λεπτά ανάλογα με τα επίπεδα λαμπρότητας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.7.1, ενώ στο σχήμα 4.7.2 παρουσιάζεται ο μέσος όρος αποτελεσμάτων για τα 12 άτομα



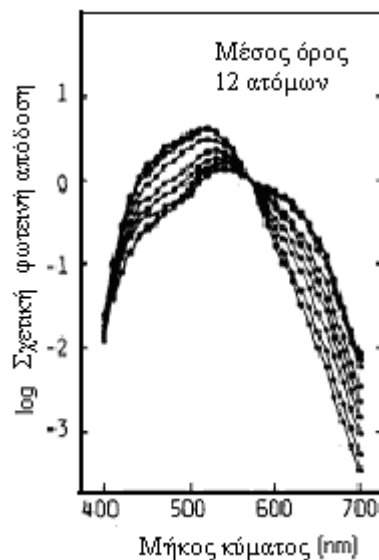
Σχήμα 4.7.1 Φασματικές ευαισθησίες για 9 επίπεδα φωτισμού αμφιβληστροειδούς για 12 άτομα [66].



Σχήμα 4.7.2 Καμπύλες που προκύπτουν από τον μέσο όρο των 12 ατόμων [66].

Υπάρχει συμφωνία με την σκοτοπική καμπύλη στα 0.01Td. Εξαίρεση αποτελούν οι ακτινοβολίες με μεγάλα μήκη κύματος. Αυτή οφείλεται στην συνεισφορά των L κωνίων, λόγω της κεντρικής τοποθέτησης του στόχου. Στα 100Td υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία με την καμπύλη V_{b2} .

Οι καμπύλες μπορούν να κανονικοποιηθούν στα 570nm, σχήμα 4.7.3



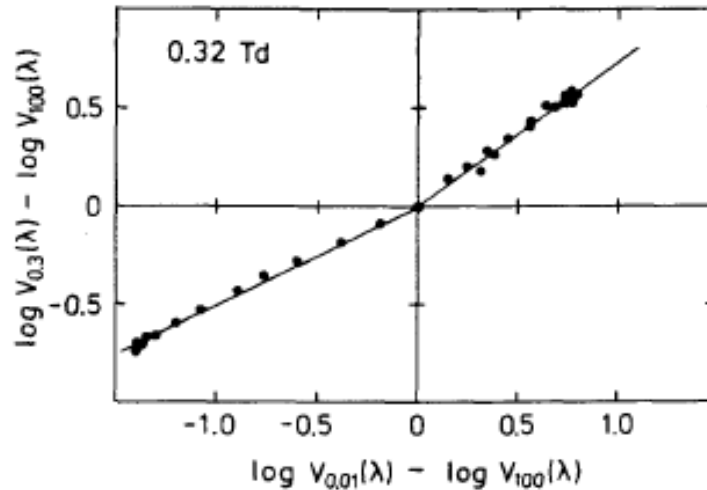
Σχήμα 4.7.3 Κανονικοποιημένες καμπύλες στα 570nm [66].

Η μεταβολή της μεσοπικής καμπύλης είναι εμφανής και υποβάλλει την θέση της έκφρασης των μεσοπικών καμπυλών σε σχέση με την φωτοπική και σκοτοπική.

Αυτές αντιπροσωπεύονται από τις καμπύλες των 100 και 0.01Td αντίστοιχα. Η έκφραση αυτή δίνεται από την εξίσωση:

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

η σταθερά αναλογίας a εξαρτάται από τα επίπεδα λαμπρότητας. Στο σχήμα 4.7.4 φαίνεται η παράσταση της εξίσωσης, για 0.32Td.



Σχήμα 4.7.4 Γραφική παράσταση της έκφρασης της μεσοπικής λαμπρότητας, συναρτήσει φωτοπικής-σκοτοπικής στα 0.32 Td [66].

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής a , σε κάθε τεταρτημόριο δεν είναι ο ίδιος. Μπορεί να θεωρηθεί όμως ότι:

$$a = a_1 \quad \lambda \leq 570nm$$

$$a = a_2 \quad \lambda > 570nm$$

στον πίνακα 4.7.2 φαίνονται οι τιμές των συντελεστών για ορισμένα επίπεδα λαμπρότητας. Επίσης αν δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μοναδικός συντελεστής.

Η εξίσωση μπορεί να γραφεί και ως:

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

$$a = a_1 \quad \lambda \leq 570nm$$

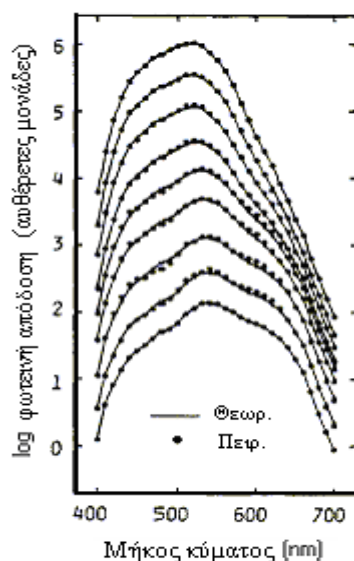
$$a = a_2 \quad \lambda > 570nm$$

Πίνακας 4.7.2 Τιμές των συντελεστών a_1 , a_2 στο μοντέλο Sagawa

| Φωτισμός αμφιβληστροειδούς (Td) | a_1 | a_2 |
|------------------------------------|-------|-------|
| 100,000 | 0,00 | 0,00 |
| 32,000 | 0,05 | 0,002 |
| 10,000 | 0,18 | 0,08 |
| 3,200 | 0,32 | 0,25 |
| 1,000 | 0,48 | 0,37 |
| 0,320 | 0,73 | 0,50 |
| 0,100 | 0,91 | 0,66 |
| 0,032 | 0,97 | 0,85 |
| 0,010 | 1,00 | 1,00 |

Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να βρεθούν οι μεσοπικές καμπύλες για κάθε περιοχή λαμπρότητας. Στο σχήμα 4.7.5 φαίνεται η σύγκριση των θεωρητικά υπολογισμένων τιμών με τις πειραματικώς ευρεθείσες.

Η σημαντική διαφορά είναι ότι στη σχέση αυτή χρησιμοποιείται η $V_b(\lambda)$, και όχι η $V(\lambda)$. Άρα απαιτείται ο ορισμός ενός νέου μεγέθους, της φωτεινής ισοδύναμης λαμπρότητας (brightness equivalent luminance, BLE): $Lb = L \frac{Vm(\lambda)}{kV(\lambda)}$ όπου k η σταθερά κανονικοποίησης στα 570nm ($k=1.05$).



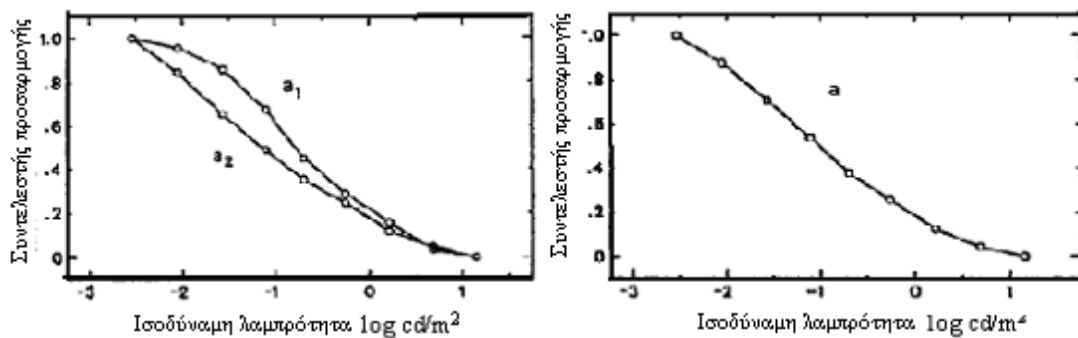
Σχήμα 4.7.5 Σύγκριση θεωρητικά προσδιορισμένων καμπυλών και πειραματικών [66].

Δηλαδή η BLE είναι η φωτοπική λαμπρότητα πολλαπλασιασμένη με ένα παράγοντα που χαρακτηρίζει τον λόγο B/L για κάθε επίπεδο. Στην πραγματικότητα λοιπόν η σχέση είναι της μορφής:

$$\log L_b m(\lambda) = a \log L_b s(\lambda) + (1-a) \log L_b p(\lambda)$$

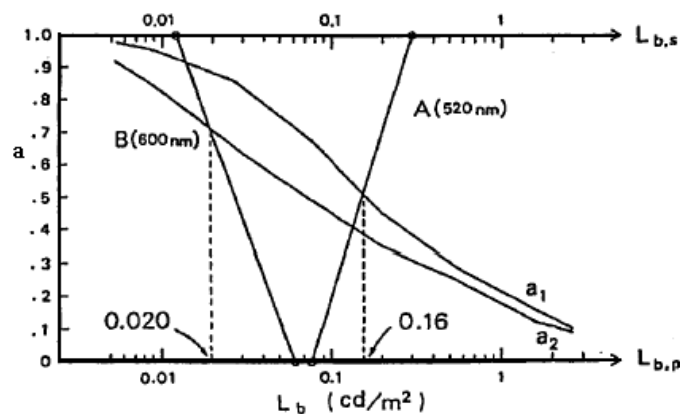
$$\text{όπου } L_b p = L \frac{Vp(\lambda)}{kV(\lambda)} \text{ και } L_b s = L \frac{Vs(\lambda)}{kV(\lambda)}.$$

Η εύρεση της BLE είναι δυνατόν να γίνει γραφικά. Μπορεί να γίνει η γραφική παράσταση των συντελεστών συναρτήσει των τιμών της BLE σχήμα 4.7.6.



Σχήμα 4.7.6 Γραφική παράσταση των συντελεστών a_1 , a_2 , a [66].

Στην συνέχεια εφ' όσον πρέπει να είναι γνωστή η σχέση $a-L_b$, η σχέση αυτή μπορεί να προσδιορισθεί γραφικά, από την τομή των γραφικών παραστάσεων τους σε κοινούς άξονες (σχήμα 4.7.7) Η τιμή L_b , του σημείου τομής είναι η ζητούμενη BLE.



Σχήμα 4.7.7 Γραφική λύση του μοντέλου, με χρήση δύο συντελεστών [66].

Παραδείγματα:

α) ακτινοβολία $\lambda=520\text{nm}$ λαμπρότητας $L=0.05\text{ cd/m}^2$

$$L_{bp}(520) = L \frac{Vp(520)}{kV(520)} = 0.05 \frac{1.15}{1.05 \cdot 0.710} = 0.0771 \text{cd} / \text{m}^2$$

$$L_{bs}(520) = L \frac{Vs(520)}{kV(520)} = 0.05 \frac{4.50}{1.05 \cdot 0.710} = 0.302 \text{cd} / \text{m}^2$$

οπότε από το σχήμα 4.9.7 προκύπτει

$$L_b = 0.16 \text{cd} / \text{m}^2$$

β) α) ακτινοβολία $\lambda=600\text{nm}$ λαμπρότητας $L=0.05\text{ cd/m}^2$

$$L_{bp}(600) = L \frac{Vp(600)}{kV(600)} = 0.05 \frac{0.813}{1.05 \cdot 0.631} = 0.0614 \text{cd} / \text{m}^2$$

$$L_{bs}(600) = L \frac{Vs(600)}{kV(600)} = 0.05 \frac{0.160}{1.05 \cdot 0.710} = 0.0121 \text{cd} / \text{m}^2$$

οπότε από το σχήμα 4.9.7 προκύπτει

$$L_b = 0.02 \text{cd} / \text{m}^2$$

Το πρόβλημα είναι να παραχθούν τα L_{bp} , και L_{bs} για μη μονοχρωματικές ακτινοβολίες. Για να υπολογισθεί η L_{bp} , χρειάζεται να είναι γνωστός ο λόγος B/L για πεδίο 10° . Αλλά τέτοια δεδομένα δεν υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Μπορεί όμως προσεγγιστικά να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα για τις 2° . Όσο για την L_{bs} μπορεί προσεγγιστικά να εκφρασθεί χρησιμοποιώντας τις $V(\lambda)$ και $V'(\lambda)$ κανονικοποιημένες στα 570nm ως εξής:

$$L_{bs} = L \frac{k' \int_{360}^{830} L_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda}{k \int_{360}^{830} L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda} \quad \text{όπου } k=1.05 \text{ και } k'=4.81$$

Παραδείγματα όπου χρησιμοποιείται μια μόνο τιμή για την παράμετρο α .

Στα παραδείγματα αυτά χρησιμοποιείται η σχέση

$$\log\left(\frac{B}{L}\right) = 0.256 - 0.184y - 2.527xy + 4.656x^3y + 4.657xy^4$$

και η αναγωγή στα 570nm γίνεται ως

$$\log\left(\frac{B}{L}\right)_{570} = \log\left(\frac{B}{L}\right) + 0.0466$$

α) Πηγή Α $x = 0.313$ $y = 0.329$ $L = 0.05cd/m^2$

$$L_b p = L \left(\frac{B}{L} \right) = L \cdot 10^{0.0459} = 0.056cd/m^2$$

$$L_b s = L \frac{k' \int_{360}^{830} L_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda}{k \int_{360}^{830} L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda} = 0.05 \frac{4.81}{1.05} 0.991 = 0.227cd/m^2$$

από το σχήμα $L_b = 0.110cd/m^2$

β) Πηγή Α $x = 0.313$ $y = 0.329$ $L = 0.05cd/m^2$

$$L_b p = L \left(\frac{B}{L} \right) = L \cdot 10^{0.0459} = 0.056cd/m^2$$

$$L_b s = L \frac{k' \int_{360}^{830} L_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda}{k \int_{360}^{830} L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda} = 0.05 \frac{4.81}{1.05} 0.991 = 0.227cd/m^2$$

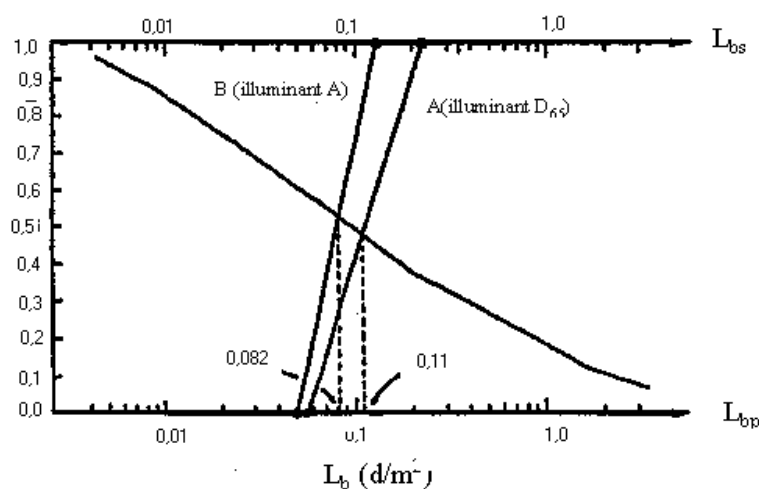
από το σχήμα 4.7.8 $L_b = 0.110cd/m^2$

γ) Πηγή Α $x = 0.448$ $y = 0.408$ $L = 0.05cd/m^2$

$$L_b p = L \left(\frac{B}{L} \right) = L \cdot 10^{-0.0058} = 0.049cd/m^2$$

$$L_b s = L \frac{k' \int_{360}^{830} L_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda}{k \int_{360}^{830} L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda} = 0.05 \frac{4.81}{1.05} 0.567 = 0.130cd/m^2$$

από το σχήμα 4.7.8 $L_b = 0.082cd/m^2$



Σχήμα 4.7.8 Γραφική λύση του μοντέλου, με χρήση ενός συντελεστή [66].

Στο πίνακα 4.7.3 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών για διάφορες τιμές λαμπρότητας.

Πίνακας 4.7.3 Τιμές των συντελεστών a_1 , a_2 , a .

| Brightness equivalent luminance (cd/m^2) | a_1 | a_2 | a |
|--|-------|-------|-------|
| 1,15 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 0,68 | 0,033 | 0,050 | 0,045 |
| 0,21 | 0,155 | 0,118 | 0,128 |
| -0,26 | 0,288 | 0,248 | 0,259 |
| -0,69 | 0,450 | 0,352 | 0,378 |
| -1,11 | 0,673 | 0,489 | 0,539 |
| -1,56 | 0,854 | 0,650 | 0,705 |
| -2,05 | 0,954 | 0,843 | 0,873 |
| -2,53 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

4.8 Το μοντέλο της Palmer

Το μοντέλο της Palmer [50, 67, 68] έχει ως στόχο, την έκφραση της μεσοπικής λαμπρότητας συναρτήσει των λαμπροτήτων S και P της σκοτοπικής και μεσοπικής περιοχής αντίστοιχα. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε ήταν πειραματικά δεδομένα, που αποκτήθηκαν κατά την ταύτιση φωτεινοτήτων για διάφορα επίπεδα μεσοπικής λαμπρότητας.

Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση διμερούς ερεθίσματος. Η γωνία του οπτικού πεδίου ήταν 15° , ενώ το συγκρινόμενο πεδίο εκτεινόταν σε άνοιγμα 20° . Τέσσερα άτομα έκαναν ταυτίσεις σε ικανό αριθμό δειγμάτων με το συγκρινόμενο πεδίο. Στις συγκρίσεις περιλαμβάνονταν αναμίξεις δύο ή τριών μονοχρωματικών ακτινοβολιών, καθώς και συνεχείς φασματικές κατανομές λαμπτήρων πυράκτωσης χωρίς χρωματικά φίλτρα. Η έννοια της περιγραφής, της ταύτισης σαν συνάρτηση των φωτοπικών και σκοτοπικών λαμπροτήτων ελέγχθηκε με ένα αριθμό υποκειμένων που έκαναν ταυτίσεις ανάμεσα στις φωτεινές ακτινοβολίες και σε μια ακτινοβολία αναφοράς. Ως ακτινοβολία αναφοράς χρησιμοποιήθηκε λαμπτήρας πυράκτωσης 2042°K . Οι φασματικές κατανομές των ακτινοβολιών εκτεινόταν από σχεδόν μονοχρωματικές έως κατανομές που κάλυπταν όλο το ορατό φάσμα.

Με αυτό τον τρόπο κατασκευάστηκε μια εμπειρική σχέση, που εκφράζει την μεσοπική λαμπρότητα συναρτήσει της σκοτοπικής και φωτοπικής λαμπρότητας, που βασίζονται στην $V'(\lambda)$ και $V_{10}(\lambda)$ αντίστοιχα. Η σχέση αυτή είναι:

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

όπου S, P η σκοτοπική και φωτοπική λαμπρότητα και M μια σταθερά με διαστάσεις λαμπρότητας, $M=0,06\text{cd/m}^2$.

Η σχέση αυτή αναθεωρήθηκε από την Palmer ώστε να έχει μεγαλύτερη ακρίβεια. Η τελική της μορφή είναι:

$$L(S, P) = \sqrt{SM} + P + \frac{M}{2} - \sqrt{M \left(\sqrt{SM} + P + \frac{M}{4} \right)}$$

4.9 Το μοντέλο P. Trezona

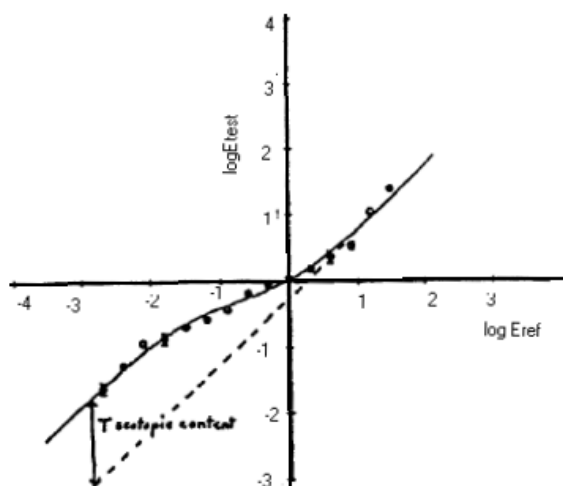
Στο μοντέλο [50, 70 - 72] έγινε προσπάθεια να συνδεθεί η φωτεινότητα με την λαμπρότητα, χρησιμοποιώντας τις χρωματικές συντεταγμένες του ερεθίσματος.

Ο λόγος της επιλογής της φωτεινότητας και όχι της λαμπρότητας γίνεται γιατί, δεν είναι δυνατόν να γίνουν μετρήσεις λαμπρότητας στην μεσοπική περιοχή, ενώ ταυτόχρονα η ταύτιση φωτεινότητας είναι αυτό το οποίο έχει σημασία στην μεσοπική περιοχή. Ανάμεσα σε φωτεινότητα και λαμπρότητα η σχέση του Ware-Cowan ισχύει για όλα τα χρώματα:

$$\log\left(\frac{B}{L}\right) = 0.256 - 0.184y - 2.527xy + 4.656x^3y + 4.657xy^4$$

Η ταύτιση μπορεί να γίνει με δύο τρόπο, α) διατηρώντας σταθερό το ερέθισμα αναφοράς και προσαρμόζοντας το υπό εξέταση ερέθισμα και β) αντίστροφα. Ο δεύτερος τρόπος φαίνεται καλύτερος, γιατί είναι δύσκολη η ρύθμιση ενός χρωματισμένου ερεθίσματος.

Η πειραματική μέθοδος που ακολουθείται είναι ο προσδιορισμός της ακτινοβολίας του ερεθίσματος αναφοράς E_{ref} , η οποία δημιουργεί ισοδύναμη φωτεινότητα με την ακτινοβολία του υπό έλεγχο ερεθίσματος E_{test} . Στο σχήμα 4.9.1 φαίνεται η γραφική παράσταση των λογαρίθμων της ακτινοβολίας των δύο ερεθισμάτων.



Σχήμα 4.9.1 Καμπύλη σχήματος S που καλύπτει όλες τις περιοχές όρασης [70].

Έστω E_{test} , E_{ref} οι ακτινοβολίες των ερεθισμάτων ελέγχου και αναφοράς αντίστοιχα και U_{test} , U_{ref} οι αντίστοιχες φασματικές φωτεινές αποδόσεις, ενώ k είναι μια σταθερά. Η ισοδύναμη λαμπρότητα θα είναι ανάλογη της ακτινοβολίας του ερεθίσματος αναφοράς.

$$\text{Έστω } U_{test}' = U_{test} \frac{k}{E_{test}} \quad \kappa\alpha \quad U_{ref}' = U_{ref} \frac{k}{E_{ref}} \quad \text{τότε}$$

$$\log(E_{ref}') = \log(E_{test}') + \log\left(\frac{U_{test}'}{U_{ref}'}\right)$$

Αυτή η εξίσωση παριστά μια ευθεία μοναδιαίας κλίσης. Το σημείο τομής με τον άξονα Y θα δίνεται από την σχέση:

$$\beta = \log\left(\frac{U_{test}'}{U_{ref}'}\right)$$

Εάν θεωρηθούν σκοτοπικές συνθήκες τότε θα αλλάξει καμπύλη φασματικής ευαισθησίας και αντί της U θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η V' . Οπότε πάλι θα κατασκευάζεται μια ευθεία μοναδιαίας κλίσης, όπου όμως το σημείο τομής θα δίνεται από την σχέση:

$$a = \log\left(\frac{V_{test}'}{V_{ref}'}\right)$$

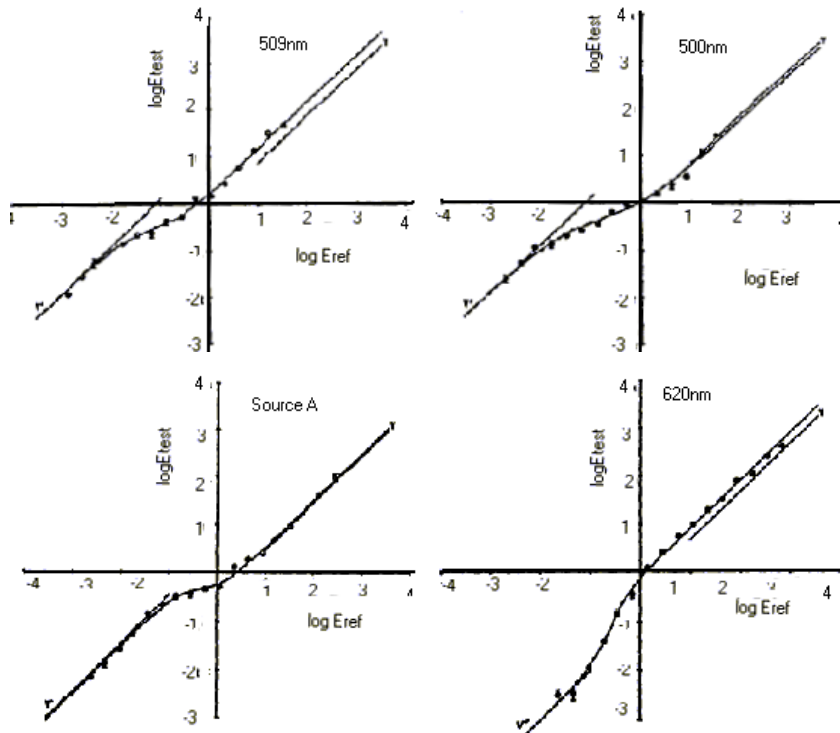
Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να κατασκευασθούν καμπύλες σχήματος S όπου ασυμπτωτικά καταλήγουν στις προαναφερθείσες ευθείες. Η μεσοπική περιοχή παρίσταται από την αλλαγή ανάμεσα στις ασύμπτωτους.

Οι τιμές των φωτομετρικών μεγεθών στις ασύμπτωτους μπορεί να προβλεφθούν με την συμβατική φωτομετρία, οι περιοχές όμως ανάμεσα σε αυτές μόνο με πειραματικές μεθόδους. Αυτό γιατί τα διάφορα ερεθίσματα παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά. Στο σχήμα 4.9.2 φαίνονται οι καμπύλες S για ερεθίσματα αναφοράς 509nm, 500nm, πηγή A, 620nm, ενώ στο σχήμα 4.9.3 φαίνονται τα σημεία S και P .

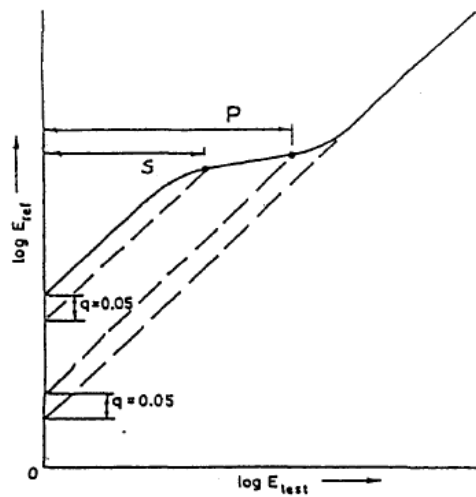
Η μεταβολή από την φωτοπική στην σκοτοπική όραση, λόγω του φαινομένου Purkinje μπορεί να αποδοθεί από την διαφορά $a-b$. Δηλαδή:

$$t = a - b = \log\left(\frac{V_{test}'}{V_{ref}'}\right) - \log\left(\frac{U_{test}'}{U_{ref}'}\right) \quad \text{ή ισοδύναμα:}$$

$$t = a - b = \log \left(\frac{V'_{test}}{U_{test}} \right) - \log \left(\frac{V'_{ref}}{U_{ref}} \right)$$



Σχήμα 4.9.2 Καμπύλες S για διάφορες ακτινοβολίες αναφοράς [70].



Σχήμα 4.9.3 Καμπύλη μορφής S όπου φαίνονται τα σημεία P, S [70].

Αυτή η εξίσωση δείχνει ότι όχι μόνο το ελεγχόμενο ερέθισμα αλλά και το ερέθισμα αναφοράς επηρεάζουν την τιμή του t . Επίσης, ενώ υπάρχει μια μόνο καμπύλη για την σκοτοπική όραση, υπάρχουν αρκετές καμπύλες που εκφράζουν την φωτοπική. Καταλληλότερη θεωρείται η V_{b10} .

Μπορεί η μεταβολή από την φωτοπική στην σκοτοπική όραση, να προσεγγισθεί με μια συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης. Έστω P, S τα σημεία, που δεικνύουν την αρχή και το τέλος της μεσοπικής περιοχής του εν λόγω ερεθίσματος. Τα σημεία αυτά υπολογίζονται με προσέγγιση $q = \pm 0.5$ λογαριθμικές μονάδες, πράγμα αυθαίρετο αλλά λογικό, είναι μια προσέγγιση 10 % περίπου. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να ορισθεί η συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης:

$$\log Leq = \log E + \frac{\alpha + \beta}{2} - \frac{\alpha - \beta}{2} \cdot \tanh \left[m \left(\log E - \frac{S + P}{2} \right) \right]$$

$$m = \frac{2 \tanh^{-1} \left[1 - \frac{0.1}{|\alpha - \beta|} \right]}{P - S}$$

όπου Leq η ισοδύναμη λαμπρότητα, E η ακτινοβολία του υπό εξέταση ερεθίσματος.

Τελικά σε όλες τις ακτινοβολίες μονοχρωματικές ή όχι, η μεταβολή της ισοδύναμης λαμπρότητας μπορεί να εκφρασθεί με μια υπερβολική εφαπτομένη. Στην πραγματικότητα αυτό μπορεί να γίνει εφικτό για τιμές του $t > 0.2$ λογαριθμικές μονάδες. Μικρότερες τιμές του t, θεωρητικά μπορούν να προσεγγισθούν αλλά πρακτικά υπερκαλύπτονται από τα πειραματικά σφάλματα. Αυτό μπορεί να απλοποιηθεί με την χρήση τεσσάρων παραμέτρων, μια για την φωτοπική περιοχή μία για την σκοτοπική και την ακτινοβολία του ερεθίσματος, που καθορίζει τα σημεία, μετάβασης στην σκοτοπική και φωτοπική περιοχή.

Αυτό το σύστημα έχει δύο κύρια χαρακτηριστικά:

- α) Δεν προϋποθέτει την προσθετικότητα, η οποία στην μεσοπική περιοχή δεν ισχύει.
- β) Λαμβάνει υπόψη και τα τέσσερα είδη φωτοανιχνευτών, πράγμα που είναι αναγκαίο όπως έχει δειχθεί από τις καμπύλες της Kinney.

Τελικά οι παράμετροι αυτοί είναι δυνατόν να εκφρασθούν σε τετραχρωματικές τιμές X, Y, Z, V'(λ), ως προς ερέθισμα αναφοράς 555nm.

Φωτοπική σταθερά:

$$\beta' = 0.621 - 0.900x - 2500y + 1.354x^2 + 0.573xy + 2.780y^2$$

$$S' = 0.204 - 1.309 \frac{X}{Y} + 0.547 \frac{Z}{Y} - 2.842 \frac{V'}{Y} + 0.228 \frac{X^2}{Y^2} - 0.217 \frac{XZ}{Y^2} +$$

$$+ 0.046 \frac{Z^2}{Y^2} - 0.298 \frac{ZV'}{Y^2} + 0.653 \frac{V'^2}{Y^2} + 0.671 \frac{XV'}{Y^2}$$

$$S' = -1.089 + 0.760 \frac{X}{Y} - 0.342 \frac{Z}{Y} + 1.421 \frac{V'}{Y} - 0.406 \frac{X^2}{Y^2} + 0.150 \frac{XZ}{Y^2} -$$

$$- 0.019 \frac{Z^2}{Y^2} + 0.064 \frac{ZV'}{Y^2} - 0.230 \frac{V'^2}{Y^2} + 0.053 \frac{XV'}{Y^2}$$

Αρχή σκοτοπικής:

$$S' = 0.204 - 1.309 \frac{X}{Y} + 0.547 \frac{Z}{Y} - 2.842 \frac{V'}{Y} + 0.228 \frac{X^2}{Y^2} - 0.217 \frac{XZ}{Y^2} + \\ + 0.046 \frac{Z^2}{Y^2} - 0.298 \frac{ZV'}{Y^2} + 0.653 \frac{V'^2}{Y^2} + 0.671 \frac{XV'}{Y^2}$$

Αρχή φωτοπικής:

$$S' = -1.089 + 0.760 \frac{X}{Y} - 0.342 \frac{Z}{Y} + 1.421 \frac{V'}{Y} - 0.406 \frac{X^2}{Y^2} + 0.150 \frac{XZ}{Y^2} - \\ - 0.019 \frac{Z^2}{Y^2} + 0.064 \frac{ZV'}{Y^2} - 0.230 \frac{V'^2}{Y^2} + 0.053 \frac{XV'}{Y^2}$$

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο προσδιορισμός του υπό εξέταση ερεθίσματος είναι ο εξής:

- 1) Υπολογίζονται οι τιμές των β' , S' , P' .
- 2) Μετατρέπονται στην κατάλληλη μορφή με τις σχέσεις:

$$\alpha = \log \left(\frac{V'_{test}}{V'_{ref}} \right) - 0.1660 = \log V'_{test} + 0.2298$$

$$\beta = \beta' + \log Y_{test} - 0.1660$$

$$S = S' - \beta - 0.1660$$

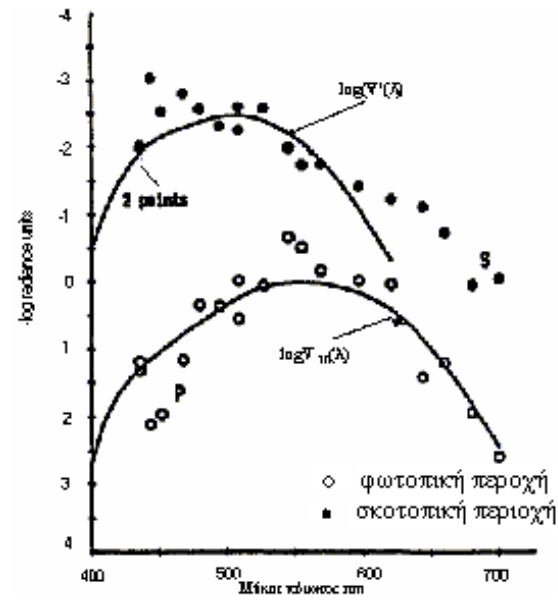
$$P = P' - a - 0.1660$$

- 3) Υπολογίζεται η τιμή m .
- 4) Εάν το E είναι σε φωτοπικά trolands, το E μπορεί να βρεθεί σε ραδιομετρικά trolands σύμφωνα με την σχέση:

$$E = E' + 0.1656 - \log Y_{test}$$

Οπότε με αυτό τον τρόπο εκφράζεται η ισοδύναμη λαμπρότητα, δηλαδή η λαμπρότητα των 555 nm που ταυτίζεται με την εν λόγω ακτινοβολία

Αξιοσημείωτο είναι να παρασταθεί στο ίδιο διάγραμμα το σκοτοπικό και το φωτοπικό όριο για διάφορες ακτινοβολίες. Στο σχήμα 4.9.4 φαίνονται τα όρια για διάφορες ακτινοβολίες μαζί με τις δύο χαρακτηριστικές καμπύλες του ανθρώπινου οφθαλμού, οι μονάδες είναι σε $-\log(\text{radiance})$. Παρατηρούμε ότι τα φωτοπικά όρια καθορίζονται από την φωτοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας τα χαμηλότερα όρια σκοτοπικής δεν είναι ούτε φωτοπικά ούτε σκοτοπικά. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι εκφράζονται από την σκοτοπική καμπύλη εκτός από τα μεγάλα μήκη κύματος. όπως γίνεται και στις καμπύλες της Kinney. Συνεπάγεται, ότι η άποψη που τοποθετεί την μεσοπική περιοχή ανάμεσα στις δύο άλλες δεν ισχύει..



Σχήμα 4.9.4 Τα όρια φωτοπικής και σκοτοπικής περιοχής. Παριστάνονται επίσης και οι αντίστοιχες φασματικές ευαισθησίες $V'(\lambda), V_{10}(\lambda)$ [70].

4.10 Το μοντέλο του M. Rea

Η προσέγγιση που πραγματοποιεί ο Rea [73 - 77] στην μεσοπική περιοχή όρασης είναι αρκετά διαφορετική από των υπολοίπων ερευνητών. Το κριτήριο ταύτισης που χρησιμοποιεί είναι ο χρόνος αντίδρασης. Σίγουρα δεν αποτελεί καθαρά οπτικό κριτήριο, ωστόσο με μετρήσεις που έγιναν κατασκευάστηκαν καμπύλες για την φωτοπική και σκοτοπική περιοχή, όμοιες με αυτές που παράγονται χρησιμοποιώντας οπτικά κριτήρια. Η διαφορά έγκειται, στο ότι δεν χρησιμοποιεί απλούς χρόνους αντίδρασης αλλά χρόνους αντίδρασης όπου ο παρατηρητής αντιδρά χρησιμοποιώντας και τους δύο οφθαλμούς. Οι απλοί χρόνοι αντίδρασης έχουν δύο μειονεκτήματα:

- α) Τα δεδομένα είναι σε μεγάλο βαθμό μεταβλητά, οπότε απαιτείται μεγάλος αριθμός δεδομένων ώστε να μπορεί να εκτιμηθούν.
- β) Σοβαρότερο μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι τα υποκείμενα έχουν την τάση να προσαρμόζο v τον χρόνο αντίδρασης τους με το v χρό θ . Συγκεκριμένα, παρατηρείται μια μη προβλέψιμη τάση προσαρμογής, στους απόλυτους χρόνους αντίδρασης στις διάφορες ενότητες του πειράματος.

Εξ αιτίας αυτών των λόγων, τα αποτελέσματα των απλών χρόνων αντίδρασης δεν χρησιμοποιούνται για κατασκευή καμπυλών φασματικής ευαισθησίας. Η χρήση όμως και των δύο οφθαλμών φαίνεται να αντιπαρέρχεται στα προβλήματα. Η τεχνική αυτή, δηλαδή η χρήση και των δύο οφθαλμών, στηρίζεται στις παραδοχές:

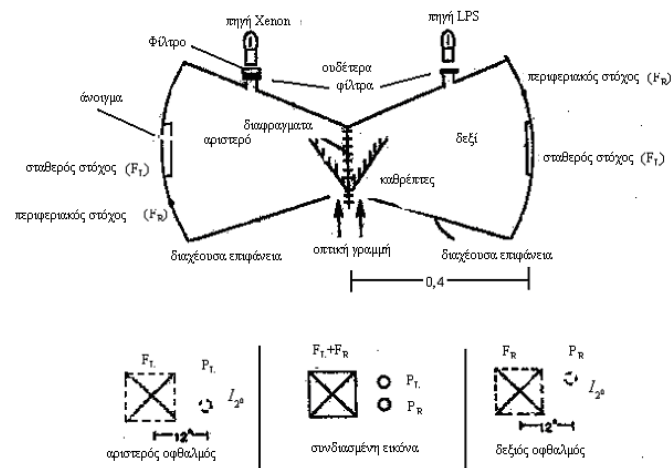
- α) Κάθε οφθαλμός λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο και ανεξάρτητα από τον άλλο ως προς τους χρόνους αντίδρασης που παρουσιάζει το υποκείμενο. Έτσι οι υπολανθάνουσες διαφορές, που παρουσιάζονται με μετρήσεις απλών χρόνων αντίδρασης, οφείλονται σε αλλαγές που γίνονται πριν τον εγκεφαλικό φλοιό.
- β) Η διοπτρική όραση, σύμφωνα με το φαινόμενο Pulfrich, στα διοπτρικά κύτταρα της όρασης στον εγκεφαλικό φλοιό μπορεί να διακρίνει μικρές χρονικές διαφορές και έτσι αυτές οι διαφορές να είναι μετρήσιμες.

Στην μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενη μέθοδο των απλών χρόνων αντίδρασης, στον μετρούμενο χρόνο αντίδρασης στο οπτικό ερέθισμα υπολογιζόταν ο οπτικός χρόνος αντίδρασης, ο χρόνος αντίδρασης του νευρικού συστήματος καθώς και ο χρόνος απόκρισης των μηχανικών μερών της πειραματικής διάταξης. Με την προτεινόμενη μέθοδο δεν μετρούνται οι μηχανικές αντιδράσεις του υποκειμένου απλώς του ζητείται να πει ποιο ερέθισμα είδε πρώτο, οπότε η μεταβλητότητα των

ανακλαστικών του υποκειμένου περιορίζεται στο πάτημα ενός πλήκτρου.

Οποσδήποτε, όπως και σε κάθε ψυχοφυσιολογική μέθοδο, παίζει ρόλο η εγκεφαλική κατάσταση του παρατηρητή. Όμως στους απλούς χρόνους αντίδρασης ο παρατηρητής αποφασίζει πότε θα αντιδράσει και έτσι το υποκείμενο παρουσιάζει μεταβλητό χρόνο αντίδρασης. Στο προτεινόμενο σύστημα το υποκείμενο συγκρίνει δύο καταστάσεις και η απόκριση του δεν υπόκειται σε αλλαγές, που εξαρτώνται από την προσοχή που δίδει.

Στους απλούς χρόνους αντίδρασης προσδιορίζονταν οι διαφορές και η απαιτούμενη λαμπρότητα για την επίτευξη ίσων χρόνων αντίδρασης. Με την προτεινόμενη μέθοδο είναι δυνατός ο καθορισμός της απαιτούμενης λαμπρότητας στην ίδια μέτρηση.

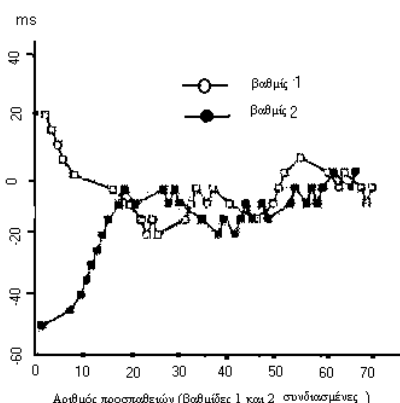


Σχήμα 4.10.1 Συσκευή μέτρησης χρόνων αντίδρασης [74].

Στο σχήμα 4.10.1 παρουσιάζεται η προτεινόμενη μέθοδος. Υπάρχουν δύο θάλαμοι οπτικά διαχωρισμένοι, δηλαδή φως από τον ένα θάλαμο δεν μπορεί να φθάσει στον άλλο. Οι θάλαμοι, είναι χρωματισμένοι γκρι, συντελεστού ανάκλασης $\rho=0.25$ και φωτίζονται με διάχυτο φως. Υπάρχουν δύο καθρέπτες, οι οποίοι κατευθύνουν το οπτικό πεδίο κάθε ματιού στον αντίστοιχο θάλαμο. Ο λόγος λαμπροτήτων της φωτεινότερης προς την σκοτεινότερη περιοχή των θαλάμων ήταν 1:10. Υπάρχουν δύο δίσκοι διαμέτρου 13mm που στην εν λόγω διάταξη αντιστοιχούν σε οπτικό πεδίο 1.6° , είναι βαμμένοι με λευκό, συντελεστού ανάκλασης $\rho=0.95$ από την μια πλευρά και με μαύρο, συντελεστού ανάκλασης $\rho=0.05$ από την άλλη. Οι δίσκοι μπορούν να εναλλάξουν πλευρά σε χρόνο 10ms και αυτό είναι επαναλήψιμο σε χρόνο 0.25ms. Οι χρόνοι αυτοί είναι κοινοί και για τους δύο δίσκους, άρα δεν

έχουν επίδραση στις μετρήσεις. Οι στόχοι είναι τοποθετημένοι στο οπτικό πεδίο, σχηματίζοντας με τον οπτικό άξονα γωνία 12° . Ο ένας ευρίσκεται σε γωνία $+2^\circ$ ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ενώ ο άλλος σε γωνία -2° .

Η πειραματική διαδικασία είναι η εξής: Τα υποκείμενα προσαρμόζονται στο σκοτάδι για 10min και στην συνέχεια προσαρμόζονται στη λαμπρότητα διεξαγωγής του πειράματος για 2min. Οι στόχοι ανάβουν περιοδικά για 1s και παραμένουν σβηστοί για 2s, με την ίδια διαφορά χρόνου ανάμεσα στις αναλαμπές, μέχρις ότου το υποκείμενο αποφασίσει ποιος από τους δύο στόχους ανάβει πρώτος. Ο παρατηρητής μπορεί να αποφασίσει μετά από όσες ακολουθίες κρίνει αναγκαίο. Συνήθως αυτό γίνεται μετά από 2 έως 4 ακολουθίες. Ένας υπολογιστής καθορίζει το χρόνο προήγησης ή υστέρησης του αριστερού στόχου και καταγράφει τις αποκρίσεις. Ο χρόνος αυτός αλλάζει μετά από κάθε απόφαση του παρατηρητή, σε βήματα των 5ms.

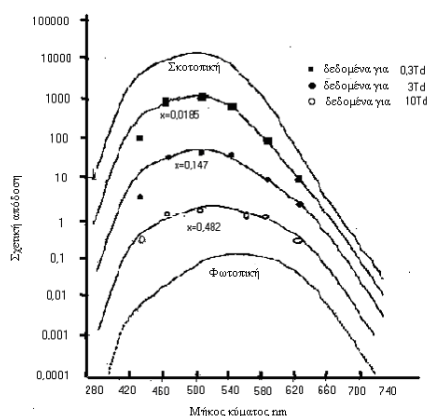


Σχήμα 4.10.2 Τυπικά αποτελέσματα της μεθόδου χρόνων αντίδρασης [74].

Στο σχήμα 4.10.2 φαίνονται τα αποτελέσματα του πειράματος για μια τιμή λαμπρότητας. Η παρουσίαση διαρκεί μέχρι να παρουσιασθούν τουλάχιστον 12 εναλλαγές στην χρονική σειρά.

Τα μέχρι τώρα προταθέντα συστήματα για την μεσοπική όραση, στηρίζονταν στην πειραματική μέθοδο της ταύτισης φωτεινότητας, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν σφάλματα προσθετικότητας. Από την άλλη μεριά, η μέθοδος flicker λόγω διαφορετικής συχνότητας κωνίων και ραβδίων δεν είναι κατάλληλη για την μεσοπική περιοχή διότι μπορεί να μετρήσει την συνεισφορά των κωνίων ή ραβδίων ξεχωριστά όχι όμως και των δύο μαζί. Ήλεκτρο-φυσιολογικές και ψυχοφυσιολογικές έρευνες δείχνουν, ότι με την χρήση χρόνων αντίδρασης κατασκευάζονται καμπύλες, που προσομοιάζουν με τις καμπύλες φασματικής ευαισθησίας για την σκοτοπική και φωτοπική όραση στις αντίστοιχες λαμπρότητες φυσικά.

Με την περιγραφείσα μέθοδο έγιναν μετρήσεις, χρησιμοποιώντας μονοχρωματικές ακτινοβολίες για επίπεδα φωτισμού αμφιβληστροειδούς 0.3, 3, 10 Td (φωτοπικά) Τα δεδομένα κανονικοποιήθηκαν έτσι, ώστε στα 589nm να έχουμε τις αυθαίρετες τιμές 1, 10, 100 αντίστοιχα, έτσι κατασκευάστηκαν οι καμπύλες του σχήματος 4.10.3



Σχήμα 4.10.3 Καμπύλες ευαισθησίας με την μέθοδο χρόνων αντίδρασης [74].

Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εξίσωση που προτάθηκε από τους He et al:

$$V_{mes}(\lambda, T_{10}) = k \cdot T_{10} \cdot [x(T_{10}) \cdot V_{10}(\lambda) + (1 - x(T_{10})) \cdot V'(\lambda)]$$

όπου V_{mes} , η μεσοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας, $V_{10}(\lambda)$, η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας για την φωτοπική περιοχή και για οπτικό πεδίο δέκα μοιρών (y_{10}), T_{10} , ο φωτισμός της αμφιβληστροειδούς και $V'(\lambda)$ η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας για την σκοτοπική περιοχή, τέλος k είναι η σταθερά κανονικοποίησης.

Οι τιμές του x για κάθε τιμή λαμπρότητας υπολογίστηκαν με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και αναγράφονται στον πίνακα 4.10.1, ο συντελεστής r^2 είναι ο συντελεστής συσχέτισης ανάμεσα στην προσαρμοσμένη καμπύλη και τις πραγματικές τιμές.

Πίνακας 4.10.1 Τιμές του x στο μοντέλο Rea.

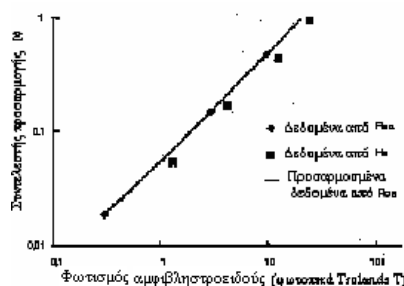
| Φωτισμός αμφιβληστροειδούς T_{10} (Td) | x | r^2 |
|---|--------|-------|
| 0.3 | 0.0185 | 0.97 |
| 3 | 0.147 | 0.94 |
| 1 | 0.482 | 0.93 |

Οι πέντε καμπύλες στο σχήμα παρουσιάζουν το φαινόμενο Purkinje από την σκοτοπική περιοχή. Οι τιμές αυτές περιγράφονται καλά από το εν λόγω μοντέλο, εκτός από τα δεδομένα των 436nm. Αυτό όμως οφείλεται στις απορροφήσεις του φακού, του οποίου η απορρόφηση είναι πολύ απότομη κάτω από τα 450nm και διαφέρει έντονα από άτομο σε άτομο. Η σχέση ανάμεσα στο x και τον φωτισμό αμφιβληστροειδούς φαίνεται στο σχήμα 4.10.4. Αυτή φανερώνει μια ομαλή μετάβαση από την μια περιοχή στην άλλη.

Η ευθεία του σχήματος μπορεί να αποδοθεί από την σχέση:

$$x(T_{10}) = 0.0477T_{10} + 0.004$$

Η τιμή αυτή του x ορίζεται με την τιμή φωτισμού αμφιβληστροειδούς για το ερέθισμα αναφοράς των 589nm. Φυσικά η προσαρμογή στην μεσοπική περιοχή δεν μπορεί να χαρακτηρίζεται από φωτοπικά Td, αλλά από μεγέθη που συνυπολογίζουν τα κωνία και τα ραβδία.. Η σύνδεση όμως αυτή είναι εξόχως περίπλοκη και έτσι η εξίσωση δίνει την σχέση για το συγκεκριμένο ερέθισμα, αν αυτό αλλάξει τότε αλλάζει και η σχέση. Το ιδανικό θα ήταν η εξίσωση να περιείχε όρους T_{mes} , και έτσι θα χαρακτήριζε την αληθή μεσοπική προσαρμογή ανεξάρτητα από το ερέθισμα αναφοράς.

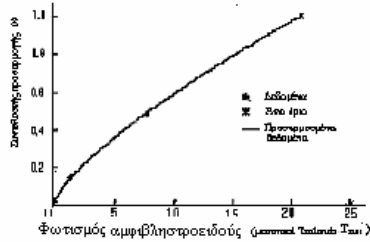


Σχήμα 4.10.4. Σχέση ανάμεσα στο x και τον φωτισμό αμφιβληστροειδούς [74].

Οι τιμές της T_{mes} για τα 589nm μπορούν να υπολογισθούν χρησιμοποιώντας τις μεσοπικές καμπύλες του σχήματος 4.10.2. Έτσι η T_{mes} περιγράφεται από την εξίσωση του He και μπορεί να εφαρμοσθεί γενικά για κάθε φασματική κατανομή και κάθε επίπεδο λαμπρότητας. Η γραφική της παράσταση γίνεται στο σχήμα 4.10.5

$$x(T_{mes}) = 0.115(T_{mes} + 0.006)^{0.71} \quad T_{mes} < 21$$

$$x(T_{mes}) = 1 \quad T_{mes} \geq 21$$



Σχήμα 4.10.5 Σχέση ανάμεσα στο x και τον μεσοπικό φωτισμό αμφιβληστροειδούς [74].

Φυσικά ο υπολογισμός θα πρέπει να γίνει με την μέθοδο των επαναλήψεων.

Η διαδικασία είναι η ακόλουθη:

1) Μετράται η φωτοπική λαμπρότητα L σε cd/m^2 , για την φασματική κατανομή $L_{e\lambda}$ σε $\text{W/m}^2\text{sr}$.

2) Υπολογίζεται το μέγεθος κόρης με μια από τις δύο σχέσεις

$$1. \quad A = [5 - 3 \tanh(0.41 \cdot \log(L))]^{2/4}$$

$$2. \quad A = [4.77 - 2.44 \tanh(0.3 \cdot \log(L))]^{2/4}$$

3) Υπολογίζεται ο φωτισμός του αμφιβληστροειδούς T_{10} (σε φωτοπικά Td), χρησιμοποιώντας την ως αρχική τιμή για την T_{mes} την:

$$T_{10} = A \cdot K \cdot \int L_e(\lambda) V_{10}(\lambda) d\lambda$$

όπου $K=683\text{lm/W}$.

4) Υπολογίζεται η τιμή του $x(T_{mes})$ από την εξίσωση του He.

5) Χρησιμοποιείται η ευρεθείσα τιμή για να υπολογισθεί η $V_{mes}(\lambda, T_{mes})$ από την εξίσωση:

$$T_{mes} = A \cdot K_{mes} \cdot \int L_e(\lambda) V_{mes}(\lambda, T_{mes}) d\lambda$$

όπου η K_{mes} υπολογίζεται από την σχέση:

$$K \cdot V(555) = K_{mes} \cdot V_{mes}(555) \Rightarrow K_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(555)}$$

6) Χρησιμοποιείται η ευρεθείσα τιμή στην εξίσωση του He και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου οι διαφορές καταστούν αμελητέες.

7) Υπολογίζεται η μεσοπική λαμπρότητα ως:

$$L_{mes} = \frac{T_{mes}}{A}$$

Πίνακας 4.10.2 Τιμές του x και της μεσοπικής λαμπρότητας για διάφορες τιμές του λόγου S/P(στήλες) και φωτοπικής λαμπρότητας(γραμμές)

| | 0,001 | | 0,003 | | 0,01 | | 0,03 | | 0,1 | | 0,3 | | 0,55 | |
|------|--------------|---|--------------|------|-------------|------|-------------|------|------------|------|------------|------|-------------|------|
| S/P | X | L | X | L | X | L | X | L | X | L | X | L | X | L |
| 0,25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,06 | 0,03 | 0,33 | 0,2 | 0,88 | 0,53 |
| 0,35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0,01 | 0,07 | 0,05 | 0,37 | 0,22 | 0,89 | 0,53 |
| 0,45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0,02 | 0,01 | 0,09 | 0,06 | 0,39 | 0,24 | 0,89 | 0,54 |
| 0,55 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,11 | 0,07 | 0,42 | 0,25 | 0,9 | 0,54 |
| 0,65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,12 | 0,07 | 0,44 | 0,26 | 0,9 | 0,54 |
| 0,75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,14 | 0,08 | 0,46 | 0,28 | 0,91 | 0,54 |
| 0,85 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,15 | 0,09 | 0,48 | 0,29 | 0,91 | 0,55 |
| 0,95 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,05 | 0,03 | 0,16 | 0,1 | 0,49 | 0,3 | 0,91 | 0,55 |
| 1,05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0,01 | 0,05 | 0,03 | 0,17 | 0,1 | 0,51 | 0,3 | 0,92 | 0,55 |
| 1,15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0,01 | 0,05 | 0,03 | 0,18 | 0,11 | 0,52 | 0,31 | 0,92 | 0,55 |
| 1,25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0,01 | 0,06 | 0,04 | 0,19 | 0,12 | 0,53 | 0,32 | 0,92 | 0,55 |
| 1,35 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0,02 | 0,01 | 0,06 | 0,04 | 0,2 | 0,12 | 0,54 | 0,33 | 0,93 | 0,56 |
| 1,45 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0,02 | 0,01 | 0,07 | 0,04 | 0,21 | 0,13 | 0,55 | 0,33 | 0,93 | 0,56 |
| 1,55 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0,02 | 0,02 | 0,07 | 0,04 | 0,22 | 0,13 | 0,56 | 0,34 | 0,93 | 0,56 |
| 1,65 | 0 | 0 | 0,01 | 0 | 0,03 | 0,02 | 0,08 | 0,05 | 0,23 | 0,14 | 0,57 | 0,34 | 0,93 | 0,56 |
| 1,75 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,08 | 0,05 | 0,24 | 0,14 | 0,58 | 0,35 | 0,94 | 0,56 |
| 1,85 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,08 | 0,05 | 0,24 | 0,15 | 0,59 | 0,36 | 0,94 | 0,56 |
| 1,95 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,09 | 0,05 | 0,25 | 0,15 | 0,6 | 0,36 | 0,94 | 0,56 |
| 2,05 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,09 | 0,06 | 0,26 | 0,16 | 0,61 | 0,36 | 0,94 | 0,56 |
| 2,15 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,09 | 0,06 | 0,27 | 0,16 | 0,61 | 0,37 | 0,94 | 0,57 |
| 2,25 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,1 | 0,06 | 0,27 | 0,16 | 0,62 | 0,37 | 0,94 | 0,57 |
| 2,35 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,1 | 0,06 | 0,28 | 0,17 | 0,63 | 0,38 | 0,94 | 0,57 |
| 2,45 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,1 | 0,06 | 0,29 | 0,17 | 0,64 | 0,38 | 0,95 | 0,57 |
| 2,55 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,11 | 0,07 | 0,29 | 0,18 | 0,64 | 0,39 | 0,95 | 0,57 |
| 2,65 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,11 | 0,07 | 0,3 | 0,18 | 0,65 | 0,39 | 0,95 | 0,57 |
| 2,75 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,11 | 0,07 | 0,3 | 0,18 | 0,65 | 0,39 | 0,95 | 0,57 |

4.11 Το πρόγραμμα MOVE

Το πρόγραμμα MOVE ήταν ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα μελέτης της μεσοπικής όρασης. Στο πρόγραμμα αυτό συμμετείχαν χώρες της ευρωπαϊκής ένωσης και συγκεκριμένα: ως οργανωτής το HUT Lighting Laboratory της Φιλανδίας και ως συνοργανωτές το City University AVRC και το National Physical Laboratory της Μεγάλης Βρετανίας, το TNO Human Factors της Ολλανδίας, το Darmstadt University of Technology στη Γερμανία και τέλος το University of Veszprém της Ουγγαρίας.

Στόχος του προγράμματος ήταν η δημιουργία δεδομένων για τη μεσοπική όραση χρησιμοποιώντας διαφορετικές πειραματικές μεθόδους. Έγιναν εργαστηριακά πειράματα με χρήση οθονών, ολοκληρώνουσας σφαίρας, εξομοιώσεις συνθηκών οδήγησης και τέλος αναζήτηση οπτικών κατωφλίων. Στόχος η επεξεργασία και η μοντελοποίηση των νέων δεδομένων [78 - 81].

Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν πειράματα οπτικής οξύτητας στα πανεπιστήμια HUT, TUD και UV. Πειράματα χρόνων αντίδρασης στα πανεπιστήμια HUT, CU, TNO, TUD. Αχρωματικό κατώφλι αναγνώρισης στο πανεπιστήμιο UV. Στο πίνακα 12.1 αναγράφονται οι πειραματικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν και ο αριθμός ατόμων σε κάθε μια. Χρησιμοποιήθηκε μεγάλος αριθμός υποκειμένων πάνω από 100. Πρέπει όμως να παρατηρηθεί ότι ο αριθμός των πειραμάτων ήταν μεγάλος ώστε τελικά ο αριθμός των υποκειμένων ανά πείραμα να είναι από 4 έως 12.

Είναι αξιοπρόσεκτο ότι ο κύριος όγκος δεδομένων προκύπτει από χρόνους αντίδρασης, 64 υποκείμενα χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα χρόνων αντίδρασης από τα 109 άτομα που έλαβαν μέρος.

Το μοντέλο για τη μεσοπική όραση που χρησιμοποιήθηκε ήταν γραμμικό της μορφής:

$$M(x)V_{MOVE}(\lambda) = x V(\lambda) + (1-x) V'(\lambda) \quad 4.12.1$$

Οπότε η λαμπρότητα δίνεται από τη σχέση:

$$L_{MOVE} = K(x) \int E(\lambda) V_{MOVE}(\lambda) d\lambda \quad 4.12.2$$

Όπου $K(x)$ σταθερά η οποία ορίζεται από την εξίσωση 4.12.1.

Πρέπει να τονιστεί ότι και στο μοντέλο αυτό όπως και στο μοντέλο του M.Rea η μεσοπική λαμπρότητα εξαρτάται μόνο από το λόγο σκοτοπικής προς φωτοπική λαμπρότητα και είναι ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά της φασματικής

κατανομής της φωτίζουσας ακτινοβολίας. Αυτό το χαρακτηριστικό θα συζητηθεί στο κεφάλαιο πέντε.

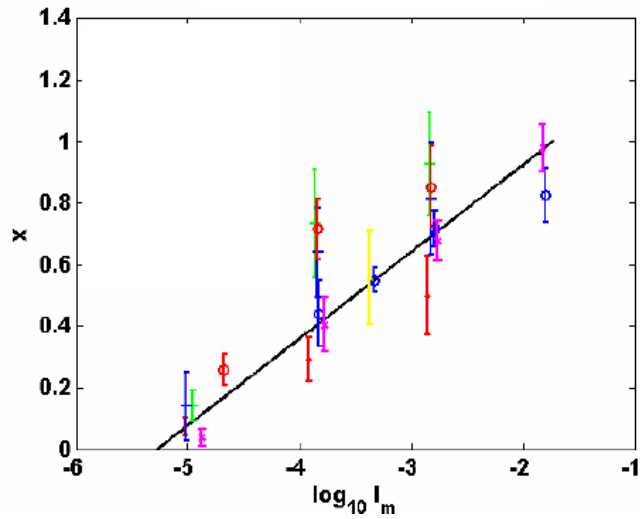
Στο σχήμα 4.12.1 φαίνονται τα πειραματικά δεδομένα και μια γραμμική προσέγγιση του x σε αυτά, συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας.

Στο σχήμα 4.12.2 φαίνεται μια καμπύλη φασματικής ευαισθησίας για λαμπρότητα 0.1 cd/m² και οι πειραματικές τιμές που αντιστοιχούν σε αυτή. Παρατηρούμε ότι η σύμπτωση δεν είναι ικανοποιητική, ιδιαίτερα για τα μικρά μήκη κύματος.

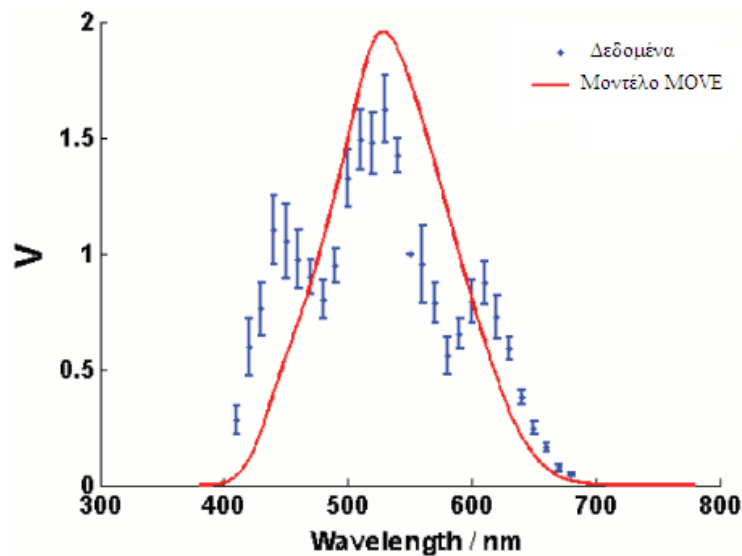
Στο σχήμα 4.12.3 παρουσιάζονται οι τιμές του x σαν συνάρτηση του λόγου σκοτοπικής προς φωτοπική λαμπρότητα για διάφορες τιμές φωτοπικής λαμπρότητας. Οι τιμές του x που υπολογίζονται συναρτήσει του λόγου S/P και της φωτοπικής λαμπρότητας δίνονται από το πίνακα 4.12.2

4.12.1 Πίνακας πειραμάτων στο πρόγραμμα MOVE

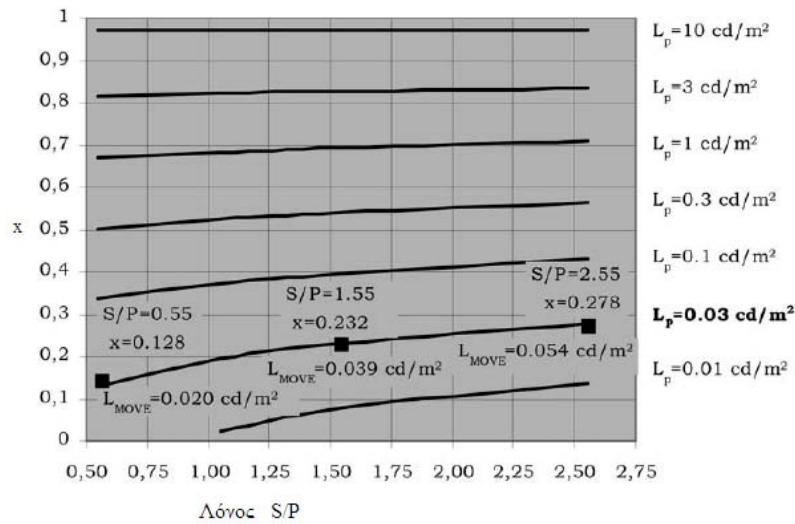
| Μέθοδος | Ερέθισμα | Αντίθεση στόχου | Λαμπρότητα cd/m ² | Αριθμός υποκειμένων |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|
| Κατώφλι αντίθεσης | 380-700nm Βήμα10nm | κατώφλιου | 0,01-10 | 6 |
| | 450-700nm Βήμα10nm | κατώφλιου | 0,01-1 | 10 |
| | Μπλε – κόκκινο - πράσινο | κατώφλιου | 0,01-10 | 19 |
| Χρόνοι αντίδρασης | 466,503,522,638nm | 0.05-3 | 0.01-10 | 23 |
| | Διάφορα μήκη κύματος | μεταβαλλόμενο | 0,01-10 | 11 |
| | Λευκό – κίτρινο - κόκκινο - μπλε | 0,14 | 0,01-10 | 23 |
| | 380-700nm Βήμα10nm | Κοντά στο κατώφλι | 0,3-1 | 7 |
| Αχρωματικό κατώφλι αναγνώρισης | 450-700nm Βήμα10nm | Κοντά στο κατώφλι | 0,01-1 | 10 |



Σχήμα 4.12.1 Γραμμικό μοντέλο του MOVE της παραμέτρου x σαν συνάρτηση του λογαρίθμου της φωτοπικής λαμπρότητας και οι πειραματικές τιμές. Οι ράβδοι παρουσιάζουν τη τυπική αβεβαιότητα $[x-2u(x), x+2u(x)]$.
 _ χρόνοι αντίδρασης 1,+ χρόνοι αντίδρασης 2,_ αντίθεση κατωφλίου 1,x χρόνοι αντίδρασης 3,_ χρόνοι αντίδρασης 4,+ αντίθεση κατωφλίου 2,_ Αχρωματικό κατώφλι αναγνώρισης [80]



Σχήμα 4.12.2 Καμπύλη φασματικής ευαισθησίας για λαμπρότητα 0.1 cd/m^2 [80]



Σχήμα 4.12.3 τιμές του x σαν συνάρτηση του λόγου σκοτοπικής προς φωτοπική λαμπρότητα για διάφορες τιμές φωτοπικής λαμπρότητας [81].

Πίνακας 4.12.2 Τιμές του x συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας (γραμμές) και του λόγου S/P (στήλες)

| S/P | 0.01 | 0.03 | 0.1 | 0.3 | 1 | 3 | 10 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.25 | | 0.0000 | 0.3035 | 0.4874 | 0.6645 | 0.8141 | 0.9705 |
| 0.35 | | 0.0625 | 0.3161 | 0.4930 | 0.6672 | 0.8152 | 0.9707 |
| 0.45 | | 0.1034 | 0.3268 | 0.4983 | 0.6697 | 0.8164 | 0.9708 |
| 0.55 | | 0.1283 | 0.3362 | 0.5032 | 0.6722 | 0.8175 | 0.9710 |
| 0.65 | | 0.1467 | 0.3445 | 0.5078 | 0.6745 | 0.8186 | 0.9711 |
| 0.75 | | 0.1616 | 0.3521 | 0.5122 | 0.6768 | 0.8197 | 0.9713 |
| 0.85 | 0.0000 | 0.1742 | 0.3589 | 0.5162 | 0.6790 | 0.8207 | 0.9714 |
| 0.95 | 0.0087 | 0.1851 | 0.3652 | 0.5201 | 0.6811 | 0.8217 | 0.9716 |
| 1.05 | 0.0243 | 0.1947 | 0.3711 | 0.5238 | 0.6832 | 0.8227 | 0.9717 |
| 1.15 | 0.0376 | 0.2034 | 0.3765 | 0.5272 | 0.6851 | 0.8237 | 0.9718 |
| 1.25 | 0.0492 | 0.2113 | 0.3817 | 0.5306 | 0.6871 | 0.8247 | 0.9720 |
| 1.35 | 0.0595 | 0.2186 | 0.3865 | 0.5338 | 0.6889 | 0.8256 | 0.9721 |
| 1.45 | 0.0688 | 0.2253 | 0.3910 | 0.5369 | 0.6907 | 0.8266 | 0.9723 |
| 1.55 | 0.0772 | 0.2315 | 0.3954 | 0.5398 | 0.6925 | 0.8275 | 0.9724 |
| 1.65 | 0.0849 | 0.2374 | 0.3995 | 0.5427 | 0.6942 | 0.8284 | 0.9725 |
| 1.75 | 0.0921 | 0.2429 | 0.4034 | 0.5454 | 0.6959 | 0.8292 | 0.9727 |
| 1.85 | 0.0988 | 0.2481 | 0.4071 | 0.5480 | 0.6975 | 0.8301 | 0.9728 |
| 1.95 | 0.1050 | 0.2529 | 0.4107 | 0.5506 | 0.6991 | 0.8310 | 0.9729 |
| 2.05 | 0.1109 | 0.2576 | 0.4142 | 0.5531 | 0.7006 | 0.8318 | 0.9730 |
| 2.15 | 0.1165 | 0.2620 | 0.4175 | 0.5554 | 0.7022 | 0.8326 | 0.9732 |
| 2.25 | 0.1217 | 0.2662 | 0.4206 | 0.5578 | 0.7036 | 0.8334 | 0.9733 |
| 2.35 | 0.1267 | 0.2702 | 0.4237 | 0.5600 | 0.7051 | 0.8342 | 0.9734 |
| 2.45 | 0.1315 | 0.2741 | 0.4267 | 0.5622 | 0.7065 | 0.8350 | 0.9735 |
| 2.55 | 0.1360 | 0.2778 | 0.4296 | 0.5643 | 0.7079 | 0.8357 | 0.9737 |
| 2.65 | 0.1403 | 0.2814 | 0.4323 | 0.5664 | 0.7092 | 0.8365 | 0.9738 |
| 2.75 | 0.1445 | 0.2848 | 0.4350 | 0.5684 | 0.7106 | 0.8372 | 0.9739 |

4.12 Σύγκριση και σχολιασμός των αναφερθέντων μοντέλων

Τα μοντέλα τα οποία παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους αποτελούν τα κυριότερα που έχουν προταθεί, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν άλλα, [50,82]. Το κριτήριο επιλογής των συγκεκριμένων μοντέλων ήταν το γεγονός της σχετικής αποδοχής τους, τουλάχιστον σε επίπεδο έρευνας. Στη συνέχεια συγκρίνονται τα παλαιότερα μοντέλα, ενώ τα μοντέλα του Re και του προγράμματος MOVE θα συζητηθούν στο κύριο μέρος της διατριβής.

Η ποικιλία των τρόπων αντιμετώπισης της μεσοπικής όρασης προδίδει και τον βαθμό δυσκολίας κατασκευής ενός συνεπούς φωτομετρικού συστήματος για την περιοχή αυτή, αυτό όμως είναι κάτι που θα εξετασθεί στην συνέχεια.

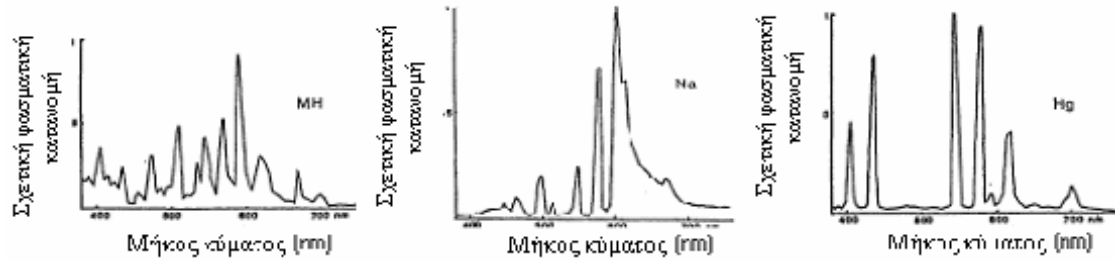
Όπως είναι αναμενόμενο, οι υπολογιζόμενες λαμπρότητες με βάση τα διάφορα μοντέλα δεν συγκλίνουν σε ικανοποιητικό βαθμό. Αυτό οφείλεται αφ' ενός στην χρησιμοποιούμενη πειραματική μέθοδο οπτικής ταύτισης και αφ' ετέρου στο θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιεί κάθε ερευνητής. Για παράδειγμα σύμφωνα με τις απόψεις Trezona η μεσοπική περιοχή δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκεται ανάμεσα στις δύο άλλες, πράγμα το οποίο αποτελεί σημείο εκκίνησης για κάποιους ερευνητές.

Στον πίνακα 4.12.1 δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά μερικών από τα αναφερθέντα μοντέλα, τα οποία έχουν και την μεγαλύτερη βαρύτητα σύμφωνα με την άποψη του γράφοντος.

Για την σύγκριση των περιγραφέντων μοντέλων υπάρχουν δεδομένα στην βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα η Palmer εκτέλεσε δύο σειρές πειραμάτων για τον καθορισμό ισοδυνάμων λαμπροτήτων. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος heterochromatic brightness matching. Χρησιμοποιήθηκε οπτικό πεδίο 10° , κυκλικό. Λευκό αναφοράς 2042°K . Οι μετρήσεις έδωσαν δύο σειρές αποτελεσμάτων:

- α) μία σειρά με χρήση λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων, νατρίου υψηλής πίεσης και νατρίου χαμηλής πίεσης και
- β) μια δεύτερη σειρά με χρήση ακτινοβολιών χρωματισμένων με ευρεία φασματική κατανομή.

Στο σχήμα 4.12.1, φαίνονται οι φασματικές κατανομές των χρησιμοποιούμενων λαμπτήρων.



Σχήμα 4.12.1 Φασματικές κατανομές.

Πίνακας 4.12.1 Συγκριτικός πίνακας των περιγραφέντων μοντέλων.

| Ερευνητής | Πειραματική Μέθοδος | Θέση ερεθίσματος | Οπτικού πεδίου | Υπόβαθρο | Περιοχή λαμπρότητας | Παρατηρήσεις | Προτεινόμενο μοντέλο |
|-----------|---------------------|------------------|---|----------|-----------------------------------|--|---|
| Palmer | HBM | O.A. | 15 ⁰ | λευκό | 0.01, 0.1, 1 (cd/m ²) | Χρήση μονοχρωματικών ακτινοβολιών. Ακτινοβολία αναφοράς 2042 K | Εμπειρική σχέση μη γραμμική |
| Ikeda | HBM | O.A | 10 ⁰ | Όχι | 0.01, 0.1, 1, 10, 100, (Td) | Μίξεις τεσσάρων ακτινοβολιών (460.6, 490.6, 470.58, 500.57) σε διάφορες αναλογίες. ακτινοβολία αναφοράς λευκό. | Λογαριθμικό μοντέλο |
| Sagawa | HBM | O.A | 10 ⁰ | Όχι | 0.1 έως 100 (Td) | Χρήση τεχνητής κόρης 3mm. Καμπύλες φασματικής ευαισθησίας κανονικοποιημένες στα 570nm | Σύστημα εξισώσεων με δύο συντελεστές a ₁ , a ₂ , για μονοχρωματικές φασματικές κατανομές και ένα συντελεστή για ευρείες κατανομές. Γραφική λύση |
| Kokoshcka | HBM | O.A | 3 ⁰ 9.5 ⁰ 64 ⁰ | Όχι | 0.003 έως 30 (Td) | Ερεθίσματα σχεδόν μονοχρωματικά. Ερέθισμα αναφοράς 530nm | Σύστημα εξισώσεων με τέσσερις παραμέτρους. Λύση με επαναλήψεις ή γραφική |
| Trezona | HBM | O.A | 10 ⁰ | Όχι | 0.001 έως 10 (cd/m ²) | Ερεθίσματα μονοχρωματικά. Ακτινοβολίας αναφοράς 588nm | Σύστημα εξισώσεων με χρήση της υπερβολικής εφαπτομένης, με τέσσερις μεταβλητές. |
| Rea | RT | Π.Ο | | Ναι | 0.3 3.0 10 (Td) | Ερεθίσματα μονοχρωματικά. Ακτινοβολία αναφοράς 589nm | Γραμμικό μοντέλο |
| Lewis | RT | Π.Ο | | Ναι | 0.1 10 (cd/m ²) | Χρήση λαμπτήρων εμπορίου (MH, INC, HPS, LPS) | Βρίσκει σχετική απόδοση |
| MOVE | RT, OO | Π.Ο | | Ναι | 0.1 10 (cd/m ²) | Πολλαπλές πειραματικές μέθοδοι | Γραμμικό μοντέλο |

Υπόμνημα πίνακα: HBM=ετεροχρωματική φωτεινή ταύτιση(heterochromatic brightness matching), RT=χρόνοι αντίδρασης, OA= οπτικός άξονας

Οι χρωματικές συντεταγμένες των ακτινοβολιών που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στους πίνακες 4.12.2 και 4.12.3. Χρησιμοποιήθηκαν οι χρωματικές συναρτήσεις για οπτικό πεδίο 10°. Η CIE έχει δώσει τιμές για τις φωτεινές αποδόσεις ορισμένων μονοχρωματικών ακτινοβολιών σε μεσοπικές συνθήκες. Αυτές έχουν δοθεί ως προς λευκό αναφοράς 2042° K. (Πίνακας 4.12.4)

Στους πίνακες 4.12.5 και 4.12.6 δίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και οι θεωρητικώς υπολογισμένες τιμές ισοδύναμης λαμπρότητας σύμφωνα με κάθε μοντέλο.

Από τους πίνακες παρατηρείται ότι οι διαφορές αν και δεν είναι μεγάλες σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις οι διαφορές αυτές είναι σημαντικές.

Παρατηρούμε ότι οι μεγάλες αποκλίσεις εμφανίζονται στα μικρά μήκη κύματος.

Πίνακας 4.12.2 Χρωματικές συντεταγμένες των λαμπτήρων

| Τύποι λαμπτήρων | Νατρίου υψηλή πίεσης | Μεταλλικών αλογονιδίων | Υδραργύρου |
|-----------------|----------------------|------------------------|------------|
| x ₁₀ | 0.539 | 0.392 | 0.406 |
| y ₁₀ | 0.400 | 0.039 | 0.370 |

Πίνακας 4.12.3 Χρωματικές συντεταγμένες των ακτινοβολιών

| Ευρέως φάσματος χρωματισμένες ακτινοβολίες | 1 γαλαζωπές | 2 πρασινωπές | 5 κίτρινο-πράσινες | 6 ροζ | 7 κοκκινωπές | 9 πορτοκαλιές |
|--|----------------|-----------------|-----------------------|----------|-----------------|------------------|
| x ₁₀ | 0.186 | 0.271 | 0.432 | 0.472 | 0.509 | 0.629 |
| y ₁₀ | 0.315 | 0.630 | 0.426 | 0.382 | 0.251 | 0.370 |

Πίνακας 4.12.4 Φωτεινές αποδόσεις μονοχρωματικών ακτινοβολιών στην περιοχή της μεσοπικής όρασης.

| Συνθήκες | Λαμπρότητα (cd/m ²) | Μήκος κύματος (nm) | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------|------|------|------|
| | | 450 | 520 | 580 | 650 |
| οπτικό πεδίο 2° | 3.4 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| | 0.34 | 1.65 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| | 0.034 | 7.23 | 1.13 | 0.78 | 1.09 |
| οπτικό πεδίο 10° | 3.4 | 2.27 | 1.03 | 0.96 | 0.97 |
| | 0.34 | 6.92 | 1.18 | 0.83 | 1.08 |
| | 0.034 | 16.89 | 1.37 | 0.74 | 0.60 |
| Κατώφλι σκοτοπικής (καμπύλη της CIE) | | 30.62 | 3.37 | 0.36 | 0.01 |

Πίνακας 4.12.5 Συγκρίσεις ισοδυνάμων λαμπροτήτων για τους λαμπτήρες

| Leq | | Νατρίου υψηλής πίεσης | Μεταλλικών αλογονιδίων | Υδραργύρου |
|------|-----|-----------------------|------------------------|------------|
| 1 | S | 0.68 | 1.63 | 1.14 |
| | P2 | 1.03 | 0.93 | 0.99 |
| | P10 | 1.04 | 0.97 | 1.05 |
| | L1 | 1.02 | 0.99 | 1.05 |
| | L2 | 0.99 | 1.03 | 1.06 |
| | L3 | 1.02 | 1.02 | 1.09 |
| | L4 | 1.04 | 0.97 | 1.05 |
| | L5 | 0.99 | 0.93 | 0.95 |
| 0.1 | S | 0.076 | 0.161 | 0.122 |
| | P2 | 0.114 | 0.092 | 0.106 |
| | P10 | 0.115 | 0.096 | 0.112 |
| | L1 | 0.105 | 0.115 | 0.115 |
| | L2 | 0.104 | 0.112 | 0.115 |
| | L3 | 0.106 | 0.116 | 0.123 |
| | L4 | 0.112 | 0.1 | 0.113 |
| | L5 | 0.094 | 0.116 | 0.109 |
| 0.01 | S | 0.0094 | 0.0147 | 0.0119 |
| | P2 | 0.0142 | 0.0084 | 0.0104 |
| | P10 | 0.143 | 0.0087 | 0.0109 |
| | L1 | 0.0107 | 0.0136 | 0.0117 |
| | L2 | 0.016 | 0.0118 | 0.0114 |
| | L3 | 0.0109 | 0.013 | 0.012 |
| | L4 | 0.0118 | 0.0119 | 0.0114 |
| | L5 | 0.0102 | 0.0129 | 0.0111 |

Πίνακας 4.12.6 Συγκρίσεις ισοδυνάμων λαμπροτήτων για χρωματισμένες ακτινοβολίες.

| Leq | | 1 γαλαζωπές | 2 πρασινωπές | 5 κίτρινο- πράσινες | 6 ροζ | 7 κοκκινωπές | 9 πορτοκαλιές |
|---------|----------|----------------|-----------------|---------------------------|----------|-----------------|------------------|
| 0.316 | S | 0.7370 | 0.4830 | 0.4480 | 0.5030 | 0.2880 | 0.0890 |
| | P10 | 0.1570 | 0.1780 | 0.2450 | 0.3130 | 0.2040 | 0.3190 |
| | L1 | 0.3180 | 0.2550 | 0.2850 | 0.3440 | 0.2240 | 0.2830 |
| | L2 | 0.2570 | 0.2370 | 0.2840 | 0.3470 | 0.2230 | 0.2600 |
| | L3 | 0.2190 | 0.2250 | 0.2710 | 0.3280 | 0.1830 | 0.2770 |
| | L4 | 0.1720 | 0.1870 | 0.2510 | 0.3170 | 0.2080 | 0.3080 |
| | L5 | 0.2880 | 0.2770 | 0.2890 | 0.3230 | 0.2670 | 0.2190 |
| | 0.0316 | S | 0.0470 | 0.0393 | 0.0373 | 0.0428 | 0.0352 |
| P10 | | 0.0100 | 0.0144 | 0.0204 | 0.0226 | 0.0256 | 0.0421 |
| L1 | | 0.0418 | 0.0345 | 0.0329 | 0.0379 | 0.0324 | 0.0243 |
| L2 | | 0.0259 | 0.0254 | 0.0278 | 0.0335 | 0.0297 | 0.0267 |
| L3 | | 0.0275 | 0.0274 | 0.0287 | 0.0338 | 0.0262 | 0.0253 |
| L4 | | 0.0268 | 0.0246 | 0.0264 | 0.0315 | 0.0285 | 0.0312 |
| L5 | | 0.0370 | 0.0298 | 0.0287 | 0.0338 | 0.0352 | 0.0202 |
| 0.00316 | | S | 0.0035 | 0.0031 | 0.0034 | 0.0032 | 0.0037 |
| | P10 | 0.0007 | 0.0011 | 0.0019 | 0.0020 | 0.0026 | 0.0068 |
| | L1 | 0.0034 | 0.0031 | 0.0033 | 0.0032 | 0.0037 | 0.0024 |
| | L2 | 0.0027 | 0.0026 | 0.0029 | 0.0029 | 0.0034 | 0.0032 |
| | L3 | 0.0029 | 0.0027 | 0.0031 | 0.0030 | 0.0034 | 0.0027 |
| | L4 | 0.0033 | 0.0030 | 0.0032 | 0.0031 | 0.0036 | 0.0027 |
| | L5 | 0.0036 | 0.0032 | 0.0035 | 0.0031 | 0.0038 | 0.0021 |
| | 0.000316 | S | 0.0003 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0004 |
| P10 | | 0.0001 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0011 |
| L1 | | 0.0003 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0003 |
| L2 | | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0004 |
| L3 | | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0004 |
| L4 | | 0.0003 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0003 |
| L5 | | 0.0003 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0003 |

Υπόμνημα: S: σκοτοπική, P₁₀: φωτοπική 10⁰, P₂: φωτοπική 2⁰, L₁:α' σχέση Palmer
L₃:Kokoschka, L₂:β σχέση Palmer, L₄:Ikeda και L₅:Sagawa

Κεφάλαιο 5: Θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη μοντέλου στη μεσοπική όραση

5.1 Γενικά

Ένας γενικότερος ορισμός για το φως είναι «φως είναι η ακτινοβολία που έχει διαμορφωθεί σύμφωνα με τη καμπύλη φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού» [22]. Όπως παρατηρείται από την CIE η λέξη διαμορφωθεί συνεπάγεται μετρήσεις και πράγματι η φωτομετρία αφορά τη μέτρηση του φωτός.

Πάντα σύμφωνα με την CIE [23] η φωτομετρία έχει δύο βασικούς στόχους:

- A) «Τη μέτρηση της ορατής ακτινοβολίας ή φωτός, με τέτοιο τρόπο ώστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι, όσο το δυνατόν περισσότερο, συσχετισμένα με το οπτικό αίσθημα ενός μέσου παρατηρητή που εκτίθεται στη μετρούμενη ακτινοβολία»
- B) «Η πρακτική της εφαρμογή να είναι συνεπής, σε λογικά πλαίσια, ακριβής και επαναλήψιμη»

Η ικανοποίηση του πρώτου στόχου απαιτεί να λαμβάνονται υπόψη δύο παράγοντες: το οπτικό ερέθισμα αφ' ενός και τα χαρακτηριστικά του οπτικού οργάνου που παράγουν την αίσθηση της όρασης.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η φωτομετρία οφείλει να μετρά προσεγγιστικά έστω το οπτικό αίσθημα του μέσου παρατηρητή κατά τρόπο συνεπή.

Εδώ πρέπει να γίνει μια διάκριση ανάμεσα στη φωτομετρία και την οπτική αντίληψη.

Η φωτομετρία αποτελεί ένα συνεπή τρόπο μέτρησης του φωτός. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα μικρό αριθμό συμβάσεων, οι οποίες είναι καθολικά αποδεκτές. Αντίθετα, η οπτική αντίληψη διαφέρει από άτομο σε άτομο ακόμα και στη περίπτωση ατόμων με κανονική όραση.

Φαίνεται λοιπόν ότι η φωτομετρία και η οπτική αντίληψη είναι δύο εντελώς διαφορετικές έννοιες. Αυτό όμως είναι εντελώς λανθασμένο. Η φωτομετρία οφείλει να περιγράφει την ανθρώπινη οπτική αντίληψη. Κάθε τέτοιος διαχωρισμός θα καθιστούσε την φωτομετρία άχρηστη. Για παράδειγμα, ραδιομετρικές μετρήσεις περιορισμένες στο ορατό τμήμα του φάσματος θα ήταν εξίσου κατάλληλες με τις

φωτομετρικές. Θα αποτελούσαν ένα συνεπές σύστημα μέτρησης του φωτός, το οποίο όμως δεν περιέγραφε την ανθρώπινη οπτική αντίληψη.

Η συμπεριφορά του ανθρώπινου οφθαλμού προσαρμοσμένου στο φως ήταν η αιτία της εισαγωγής της φωτοπικής καμπύλης, ενώ η συμπεριφορά του ανθρώπινου οφθαλμού προσαρμοσμένου στο σκοτάδι ήταν η αιτία της εισαγωγής της σκοτοπικής καμπύλης. Δηλαδή κατά τη κατασκευή του φωτοπικού και σκοτοπικού φωτομετρικού συστήματος ελήφθη υπόψη η ανθρώπινη αντίληψη. Επομένως, κατά τη κατασκευή ενός μεσοπικού φωτομετρικού συστήματος πέρα από τη συνέπεια και την επαναληπτικότητα του, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ικανότητα του να περιγράψει, προσεγγιστικά έστω, τη οπτική αντίληψη του παρατηρητή.

Οπότε συνοψίζοντας, ενώ φωτομετρία και οπτική αντίληψη είναι δύο διαφορετικά πράγματα σε καμιά περίπτωση δεν είναι ασύνδετα.

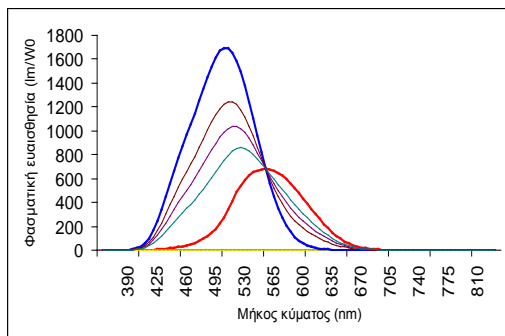
Επομένως, η φωτομετρία μπορεί να θεωρηθεί ως η «γέφυρα» ανάμεσα σε αντικειμενικά ερεθίσματα και στα ερεθίσματα που αυτά προκαλούν. Στο φωτομετρικό σύστημα υπάρχουν στοιχεία αυθαίρετα ή με άλλα λόγια συμβάσεις. Οι συμβάσεις αυτές λειτουργούν καλά όσο βρισκόμαστε στην φωτοπική περιοχή. Αυτό υπό την έννοια ότι τα μετρούμενα μεγέθη απεικονίζουν την πραγματικότητα που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής με ένα τρόπο αν όχι εντελώς συνεπής, όμως ικανοποιητικό. Η αιτία της συνέπειας του φωτομετρικού συστήματος είναι η σταθερότητα της καμπύλης φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού, στη φωτοπική και σκοτοπική περιοχή. Κατ' αυτό τον τρόπο τα οριζόμενα φωτομετρικά μεγέθη αντανακλούν προσεγγιστικά την αντίληψη του παρατηρητή στις δύο αυτές περιοχές όρασης.

Δηλαδή, όταν η λαμπρότητα μεταβάλλεται μεν αλλά είναι πάντα μεγαλύτερη από 10cd/m^2 ο ανθρώπινος οφθαλμός προσαρμόζεται στην ίδια καμπύλη ευαισθησίας, δηλαδή την $V(\lambda)$ ανεξαρτήτως της μεταβολής της λαμπρότητας. Το ανάλογο δε συμβαίνει όταν η λαμπρότητα μεταβάλλεται αλλά είναι πάντα μικρότερη από 10^{-3}cd/m^2 , και πάλι η καμπύλη παραμένει η αυτή, η $V'(\lambda)$, ανεξαρτήτως της μεταβολής της λαμπρότητας. Αυτή η παρατηρούμενη ανεξαρτησία από την λαμπρότητα, εφ' όσον αυτή βρίσκεται στην φωτοπική ή σκοτοπική περιοχή, καθιστά δυνατή την κατασκευή φίλτρων, των οποίων η διαπερατότητα προσομοιάζει με την αντίστοιχη καμπύλη φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού. Αυτό με την σειρά του έχει σαν αποτέλεσμα την γρήγορη και εύκολη μέτρηση των διαφόρων φωτομετρικών μεγεθών στις δύο αυτές περιοχές όρασης, ανεξάρτητα από την

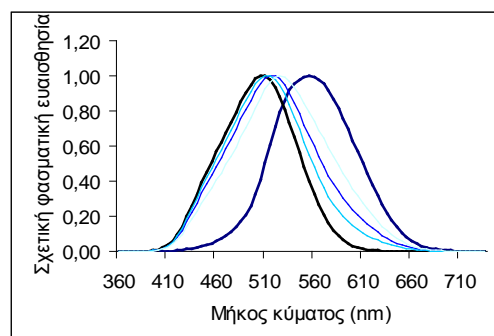
λαμπρότητα και την φασματική κατανομή της ακτινοβολίας που προκαλεί τον φωτισμό.

Στην μεσοπική περιοχή όμως ο ανθρώπινος οφθαλμός προσαρμόζεται σε μια καμπύλη φασματικής ευαισθησίας, διαφορετική από τη $V(\lambda)$, ανάλογα με τα επίπεδο φωτισμού. Η λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής δεν έχει σχέση με τη μετρούμενη φωτοπική ή σκοτοπική λαμπρότητα, αυτή καθορίζεται από τη καμπύλη φασματικής ευαισθησίας στην οποία προσαρμόστηκε ο οφθαλμός του. Υπάρχει δηλαδή, μια σαφής εξάρτηση της καμπύλης φασματικής ευαισθησίας στην οποία προσαρμόζεται ο οφθαλμός του παρατηρητή από την λαμπρότητα που αυτός αντιλαμβάνεται, τη μεσοπική λαμπρότητα.

Έτσι λοιπόν ότι δεν θα υπάρχει μια μόνο καμπύλη φασματικής ευαισθησίας αλλά μια οικογένεια καμπυλών. Στα σχήματα 5.1.1 και 5.1.2, παριστάνονται υποθετικές φασματικές ευαισθησίες και οι αντίστοιχες σχετικές φασματικές ευαισθησίες. Οι καμπύλες αυτές θα πρέπει να εξασφαλίζουν την ομαλή μετάβαση από την φωτοπική στην σκοτοπική περιοχή.



Σχήμα 5.1.1 Φασματική απόδοση για υποθετικές μεσοπικές καμπύλες



Σχήμα 5.1.2 Κανονικοποιημένες υποθετικές μεσοπικές καμπύλες

Συνοψίζοντας για τη καμπύλη φασματικής ευαισθησίας μπορούμε να πούμε ότι περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} & \rightarrow V(\lambda) \text{ αν } L > 10 \text{ cd/m}^2 && 5.1.1\alpha \\ \text{καμπύλη φασματικής ευαισθησίας} & \Rightarrow V''(\lambda, L) \text{ αν } 10^{-3} \text{ cd/m}^2 < L < 10 \text{ cd/m}^2 && 5.1.1\beta \\ & \rightarrow V'(\lambda) \text{ αν } L < 10^{-3} \text{ cd/m}^2, && 5.1.1\gamma \end{aligned}$$

Όπου $V''(\lambda, L)$ η μεσοπική καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας.

Αναλογικά με τις άλλες περιοχές, για τη μεσοπική περιοχή θα πρέπει να ισχύει:

$$\Phi'' = K''_{\max} \int_{360}^{780} P_e(\lambda) \cdot V''(\lambda, L) \cdot d\lambda \quad 5.1.2\alpha$$

$$L'' = K''_{\max} \int_{360}^{780} L_e(\lambda) \cdot V''(\lambda, L) \cdot d\lambda \quad 5.1.2\beta$$

Όπου Φ'' , L'' ή μεσοπική φωτεινή ροή και η μεσοπική λαμπρότητα αντίστοιχα, $V''(\lambda, L)$ είναι η καμπύλη σχετικής μεσοπικής φασματικής ευαισθησίας στην συγκεκριμένη περιοχή λαμπρότητας εξαρτώμενη από το λ και την L και K''_{\max} είναι η μέγιστη φασματική ευαισθησία στην συγκεκριμένη μεσοπική περιοχή η οποία προσδιορίζεται από την σχέση

$$K''_{\max} \cdot V''(555) = K_{\max} \cdot V(555) = 683lm/W \quad 5.1.3$$

Αμέσως γίνεται εμφανές το πρόβλημα κυκλικότητας, το οποίο εκφράζεται σε μαθηματική μορφή από τις σχέσεις (5.1.2α), (5.1.2β). Η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας εξαρτάται από την λαμπρότητα, η οποία όμως ορίζεται με την βοήθεια της καμπύλης φασματικής ευαισθησίας. Δηλαδή, το ότι στην μεσοπική περιοχή οι καμπύλες φασματικής ευαισθησίας είναι συναρτήσεις όχι μόνο του μήκους κύματος αλλά και της λαμπρότητας.

Κοινός στόχος των προσπαθειών για τη κατασκευή ενός φωτομετρικού συστήματος, εφαρμόσιμου στην μεσοπική περιοχή, είναι να καθίσταται δυνατή η μέτρηση των φωτομετρικών μεγεθών στην περιοχή αυτή έτσι ώστε οι μετρήσεις αυτές να εκφράζουν την οπτική εντύπωση του μέσου παρατηρητή. Αυτό θα πρέπει να γίνει κατά τρόπο απλό, ενώ ταυτόχρονα θα ήταν επιθυμητό να μην είναι απαραίτητη η γνώση της φασματικής κατανομής της ακτινοβολίας, που προκαλεί το φωτεινό αίσθημα. Με άλλα λόγια θα πρέπει να είναι δυνατή η κατασκευή των καμπύλων φασματικής ευαισθησίας, για διάφορες περιοχές λαμπρότητας και κατ' επέκταση η κατασκευή φίλτρων, των οποίων η διαπερατότητα να προσομοιάζει με τις καμπύλες της φασματικής ευαισθησίας στην αντίστοιχη περιοχή. Εναλλακτικά, θα πρέπει να είναι δυνατή η κατασκευή αλγορίθμου, με την βοήθεια του οποίου η μεσοπική λαμπρότητα να παράγεται από την γνώση της φωτοπικής και σκοτοπικής λαμπρότητας στην περιοχή αυτή. Αυτό βέβαια θα πρέπει να ισχύει για κάθε φασματική κατανομή, δηλαδή το μοντέλο ή ο αλγόριθμος θα είναι κοινός για κάθε τύπο φασματικής κατανομής και θα εξαρτάται μόνο από τις τιμές της φωτοπικής λαμπρότητας. Από τα μέχρι τώρα εκτεθέντα είναι φανερό, ότι οι προσπάθειες και προς τις δύο αυτές κατευθύνσεις δεν έχουν αποδώσει μια κοινώς αποδεκτή λύση.

Όμως ακόμα και αν είναι γνωστή μια οποιαδήποτε από τις δύο μεθόδους, όπως περιγράφεται παρακάτω η χρησιμοποίησή τους είναι προβληματική λόγω αδυναμίας καθορισμού της μεσοπικής λαμπρότητας

5.2 Εξάρτηση της φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού από τη φασματική κατανομή της φωτεινής πηγής

Η φασματική κατανομή της πηγής που δημιουργεί τον φωτισμό, στην φωτοπική ή την σκοτοπική περιοχή, επιδρά μόνο ως προς τις αριθμητικές τιμές της λαμπρότητας. Δηλαδή, αν υποθεθεί ότι μια περιοχή φωτίζεται από λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων και παρουσιάζει λαμπρότητα, έστω 16cd/m^2 . Εάν αντικατασταθεί ο λαμπτήρας φωτισμού με λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης, ο οποίος να έχει την ίδια ενέργεια ακτινοβολίας, τότε η λαμπρότητα έχει τιμή μεγαλύτερη λόγω του διαφορετικού τρόπου με το οποίο κατανέμεται η ενέργεια στα διάφορα μήκη κύματος των δύο πηγών. Όμως ο ανθρώπινος οφθαλμός και στις δύο περιπτώσεις προσαρμόζεται στη φωτοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας.

Στην μεσοπική περιοχή η φασματική κατανομή της πηγής επιδρά και πάλι στις τιμές της λαμπρότητας αλλά με αυτό το τρόπο, έμμεσα, καθορίζει και την καμπύλη φασματικής ευαισθησίας στην οποία θα προσαρμοσθεί ο οφθαλμός. Αυτό γίνεται γιατί η τιμή της λαμπρότητας καθορίζει σε ποια καμπύλη φασματικής ευαισθησίας προσαρμόζεται ο ανθρώπινος οφθαλμός. Αποτέλεσμα αυτής της περίπλοκης κατάστασης είναι, ότι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε φωτοπικές μονάδες για την μέτρηση μεσοπικών λαμπροτήτων. Αυτό όχι μόνο σε επίπεδο πραγματικών τιμών, αλλά και σε επίπεδο τιμών οι οποίες να επιτρέπουν σύγκριση επιπέδων λαμπρότητας. Το επόμενο παράδειγμα διασαφηνίζει τη θέση αυτή.

Ας υποθεθεί, ότι χρησιμοποιείται για τον φωτισμό μιας περιοχής ένας λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσεως. Έστω ότι, χρησιμοποιώντας φωτοπικές μονάδες, μετράται η λαμπρότητα και βρίσκεται ίση με 1cd/m^2 . Η λαμπρότητα αυτή ανήκει στην μεσοπική περιοχή. Φυσικά η μεσοπική λαμπρότητα δεν θα είναι και αυτή 1cd/m^2 , αλλά θα έχει μια άλλη άγνωστη τιμή. Εάν τεθεί η απαίτηση η φωτοπική λαμπρότητα να είναι ίση με την λαμπρότητα που θα καθοριζόταν με την βοήθεια της φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού που αντιστοιχεί σε αυτήν την συγκεκριμένη περιοχή μεσοπικής όρασης, θα πρέπει

$$K''_{\max} \int_{360}^{780} L_e(\lambda) \cdot V''(\lambda) \cdot d\lambda = K_{\max} \int_{360}^{780} L_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Εάν τώρα θεωρηθεί ότι χρησιμοποιούνται κανονικοποιημένες φασματικές κατανομές τότε έχουμε:

$$K''_{\max} \int_{360}^{780} A \cdot L_e^{norm}(\lambda) \cdot V''(\lambda) \cdot d\lambda = K_{\max} \int_{360}^{780} A \cdot L_e^{norm}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

όπου A ο συντελεστής κανονικοποίησης. Αυτό συνεπάγεται ότι τα ολοκληρώματα

$$\int_{360}^{780} L_e^{norm}(\lambda) \cdot V''(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{και} \quad \int_{360}^{780} L_e^{norm}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

πρέπει να έχουν σταθερό λόγο ίσο προς $\frac{K''_{\max}}{K_{\max}}$.

Αυτό μπορεί να είναι δυνατό για μια φασματική κατανομή, δεν μπορεί όμως να ισχύει για κάθε φασματική κατανομή

Ας θεωρηθεί τώρα, ότι ο λαμπτήρας νατρίου χαμηλής πίεσεως αντικαθίσταται από ένα λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων ο οποίος ρυθμίζεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η μετρούμενη φωτοπική λαμπρότητα να είναι και πάλι 1cd/m^2 .

Ένα ερώτημα το οποίο φυσιολογικά εγείρεται είναι: την στιγμή που έχουν την ίδια φωτοπική λαμπρότητα μήπως έχουν και την ίδια μεσοπική; Η απάντηση είναι ρητά όχι. Μειούμενης της λαμπρότητας, από τα φωτοπικά προς τα σκοτοπικά επίπεδα φωτισμού η φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού γίνεται περισσότερο ευαίσθητη στα μικρά μήκη κύματος. Έτσι λοιπόν η μεσοπική λαμπρότητα του λαμπτήρα Νατρίου χαμηλής, θα είναι μικρότερη από την λαμπρότητα που μετράται σε φωτοπικές μονάδες ενώ του λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων θα είναι μεγαλύτερη. Αυτό γίνεται προφανές αν υποθέσουμε ότι οι δύο λαμπτήρες έχοντας την ίδια φωτοπική λαμπρότητα έχουν και την ίδια μεσοπική. Τότε θα ισχύει

$$K''_{\max 1} \int_{360}^{780} L_{e1}(\lambda) \cdot V_1''(\lambda) \cdot d\lambda = K''_{\max 2} \int_{360}^{780} L_{e2}(\lambda) \cdot V_2''(\lambda) \cdot d\lambda$$

Δηλαδή πάλι τα ολοκληρώματα

$$K''_{\max 1} \int_{360}^{780} L_{e1}(\lambda) \cdot V_1''(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{και} \quad K''_{\max 2} \int_{360}^{780} L_{e2}(\lambda) \cdot V_2''(\lambda) \cdot d\lambda$$

Θα πρέπει να έχουν λόγο $K''_{\max 1} / K''_{\max 2}$ πράγμα που και πάλι μπορεί να είναι δυνατό για μια φασματική κατανομή, δεν μπορεί όμως να ισχύει για κάθε φασματική κατανομή

Με άλλα λόγια, η γνώση της φωτοπικής λαμπρότητας δεν παρέχει πληροφορίες για την τιμή της μεσοπικής λαμπρότητας. Ποια είναι η πληροφορία που παίρνουμε λέγοντας ότι η μετρούμενη φωτοπική λαμπρότητα είναι 1cd/m^2 ;

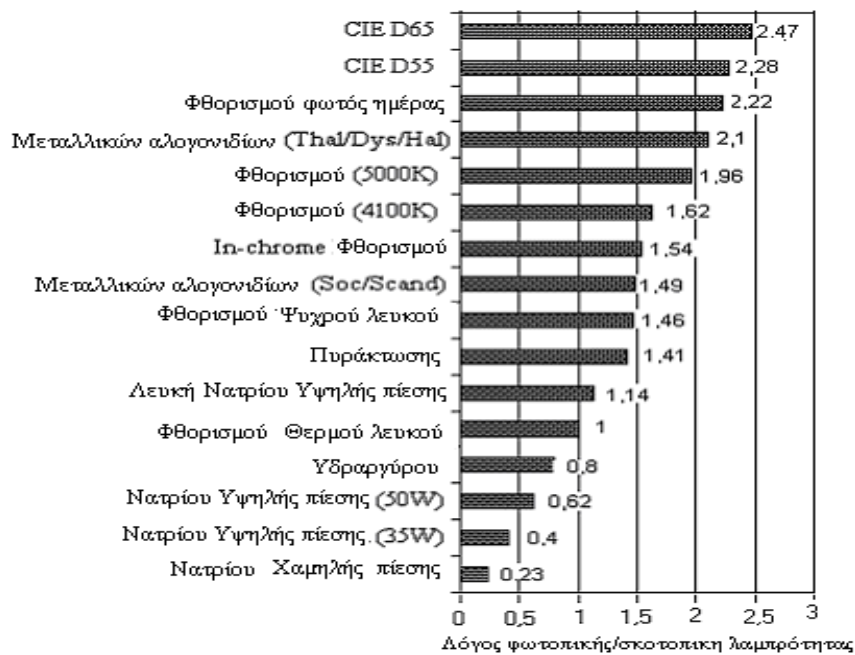
Δυστυχώς, η ποσότητα πληροφορίας που περιέχεται σε τέτοιου είδους μετρήσεις είναι ελάχιστη. Στην πραγματικότητα αυτό το οποίο καθίσταται γνωστό από μια τέτοια μέτρηση είναι:

- α) το προφανές ότι δεν βρισκόμαστε στην φωτοπική περιοχή και
- β) με την δεδομένη φωτεινή πηγή δημιουργείται μεσοπική λαμπρότητα που αντιστοιχεί σε 1cd/m^2 φωτοπικής. Αυτό επιτρέπει να πραγματοποιούνται συγκρίσεις μεσοπικών λαμπροτήτων, εάν και μόνο εάν αυτές προκαλούνται από την ίδια φωτεινή πηγή.

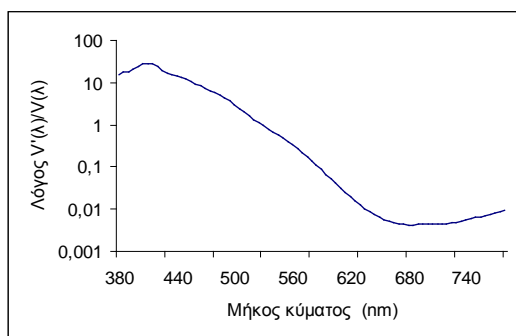
Γίνεται λοιπόν αμέσως φανερό, ότι η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας επηρεάζει τα μεγέθη όχι μόνο ποσοτικά, αλλά και ποιοτικά. Δηλαδή αν αλλάξει η φασματική κατανομή της πηγής ενώ ταυτόχρονα διατηρείται σταθερή η φωτοπική λαμπρότητα, ο ανθρώπινος οφθαλμός προσαρμόζεται σε διαφορετική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας.

Αυτό οφείλεται στην φασματική κατανομή της φωτεινής πηγής, στην μορφή της. Με άλλα λόγια στο "βάρος", το οποίο έχει κάθε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Έχουν γίνει προσπάθειες αποτίμησης αυτού του βάρους. Ο λόγος σκοτοπικής προς φωτοπική λαμπρότητα αποτελεί ένα μέτρο του βάρους αυτού. Ένα άλλο μέτρο εκτίμησης θα είναι οι λόγοι οι λόγοι των χρωματικών συναρτήσεων προς την $V(\lambda)$. Στα σχήματα 5.2.1 έως 5.2.7. δίνονται οι λόγοι αυτοί.

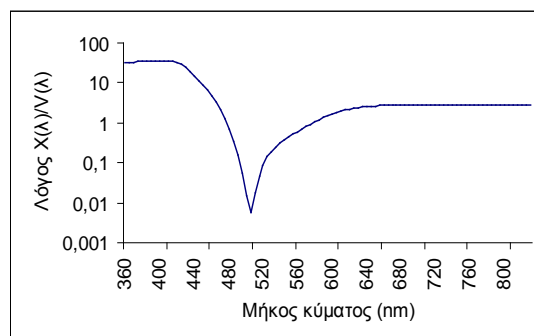
Είναι γεγονός ότι αυτοί οι λόγοι μπορούν να δώσουν μια ποιοτική εικόνα του είδους της φασματικής κατανομής. Λόγω όμως του γεγονότος ότι οι φασματικές κατανομές δεν είναι καθόλου ομαλές η εικόνα αυτή δεν είναι ακριβής και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση σύγκρισης.



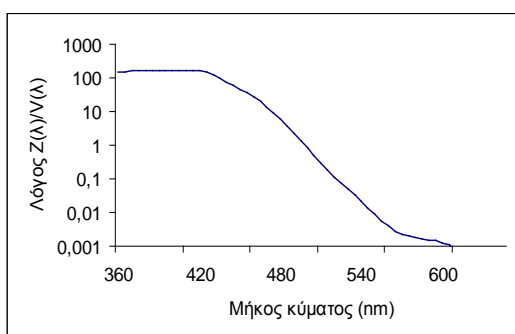
Σχήμα 5.2.1 Λόγος φωτοπική προς σκοτοπική λαμπρότητα, [83] για διάφορους τύπους λαμπτήρων.



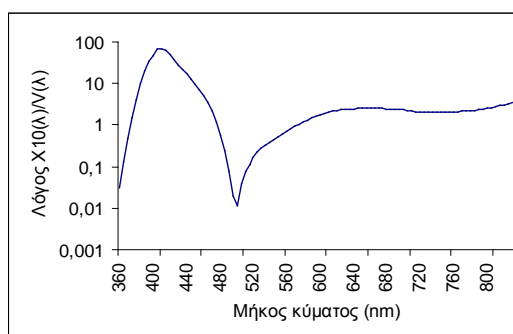
Σχήμα 5.2.2 Λόγος $V'(\lambda)/V(\lambda)$.



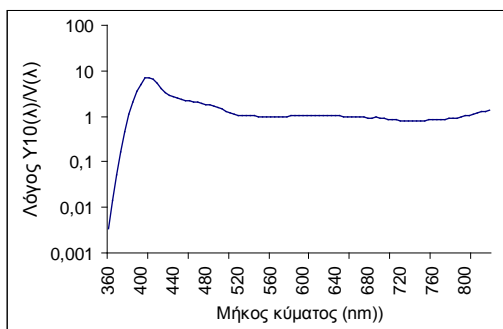
Σχήμα 5.2.3 Λόγος $x(\lambda)/V(\lambda)$.



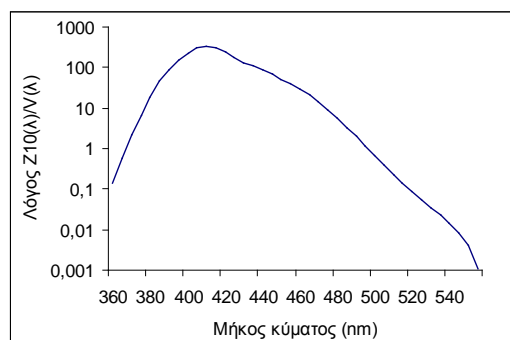
Σχήμα 5.2.4 Λόγος $z(\lambda)/V(\lambda)$.



Σχήμα 5.2.5 Λόγος $x_{10}(\lambda)/V(\lambda)$.



Σχήμα 5.2.6 Λόγος $y_{10}(\lambda)/V(\lambda)$.



Σχήμα 5.2.7 Λόγος $z_{10}(\lambda)/V(\lambda)$.

Ακόμη δεν πρέπει να αμελείται το ότι τα φωτομετρικά μεγέθη ορίζονται με τη βοήθεια ορισμένων ολοκληρωμάτων, δηλαδή αντιστοιχούν σε εμβαδά. Για παράδειγμα η φωτεινή ροή αντιστοιχεί στο εμβαδόν που περικλείεται από τον άξονα του μήκους κύματος και μιας καμπύλης που ορίζεται από το γινόμενο ανά μήκος κύματος της φασματικής κατανομής και της καμπύλης φασματικής ευαισθησίας. Είναι προφανές ότι δύο τελείως διαφορετικές καμπύλες μπορεί να δώσουν το ίδιο εμβαδό και κατά συνέπεια την ίδια φωτεινή ροή. Αυτό αναφέρεται γιατί παρά το γεγονός ότι αποτελεί τετριμμένη γνώση, ωστόσο δεν λαμβάνεται υπόψη κατά την κατασκευή των διαφόρων μοντέλων. Τελικά λόγοι τέτοιας μορφής που αναφέρθηκαν δεν μπορεί παρά να αποτελούν ένα μάλλον «φτωχό» κριτήριο σύγκρισης φασματικών κατανομών.

5.3 Κατασκευή καμπύλων φασματικής ευαισθησίας στη μεσοπική περιοχή με πειραματική διαδικασία

Η πειραματική μελέτη της μεσοπικής όρασης, παρουσιάζει αρκετές εγγενείς δυσκολίες. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν τα κυριότερα μοντέλα από αυτά που έχουν προταθεί συνολικά. Ωστόσο από την CIE δεν έχει γίνει αποδεκτή καμία καμπύλη φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού, στην περιοχή της μεσοπικής όρασης με εξαίρεση τις καμπύλες της Kinney [84], που και αυτές έχουν υιοθετηθεί από αυτή για περαιτέρω μελέτη.

Υπάρχει ένα κεντρικό σημείο που αποτελεί τον πυρήνα του προβλήματος, η μέτρηση των διαφόρων φωτομετρικών μεγεθών. Το μοναδικό σύστημα που υπάρχει είναι το φωτοπικό. Όλα τα μεγέθη λοιπόν μετρούνται σε αυτό. Από αυτά που αναφέρθηκαν η πειραματική μέθοδος που ακολουθείται, σε επίπεδο αρχής, είναι η

εξής: Επιλέγεται μια μέθοδος ταύτισης π.χ. ταύτιση φωτεινότητας, χρόνοι αντίδρασης. Καθορίζεται μια περιοχή μεσοπικής λαμπρότητας η οποία εκφράζεται σε φωτοπικές μονάδες και ακολούθως λαμβάνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του ανθρώπινου οφθαλμού.

Αυτή την προσέγγιση ακολουθούν τα περισσότερα μοντέλα που έχουν προταθεί π.χ. των Ikeda, Sagawa κλπ. Αυτά θεωρούν τις μεσοπικές καμπύλες σαν συνδυασμό των $V(\lambda)$, $V'(\lambda)$ και προσδιορίζουν τους απαιτούμενους συντελεστές εφαρμόζοντας την σχέση σε πειραματικά ευρισκόμενες καμπύλες. Το μοντέλο του Kokoschka θεωρεί την μεσοπική ως συνδυασμό των χρωματικών συναρτήσεων και της $V'(\lambda)$ και προσδιορίζει πειραματικά τους συντελεστές F . Από τα ανωτέρω φαίνεται ότι οι μετρήσεις αφορούν τις συνθήκες του πειράματος, αφού οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν στην μεσοπική περιοχή είναι φωτοπικές. Στο μοντέλο Trezona βασικό ρόλο έχει η σχέση B/L , μια σχέση η οποία και αυτή ισχύει μόνο στην φωτοπική περιοχή.

Το ζητούμενο όμως είναι τι ακριβώς αναπαριστούν αυτές οι καμπύλες. Σε αυτό το σημείο δημιουργείται μια παρανόηση. Θεωρείται, για παράδειγμα ότι η χ καμπύλη μεσοπικής φασματικής ευαισθησίας είναι έγκυρη όταν η λαμπρότητα έχει τιμή X_{cd}/m^2 , αφού κατασκευάστηκε πειραματικά κάτω από αυτή την τιμή της λαμπρότητας. Όμως ότι η τιμή X μετράται σε φωτοπικές μονάδες. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η πραγματική πληροφορία που λαμβάνεται από αυτά τα πειράματα είναι η εξής: όταν η φωτοπική λαμπρότητα, η οποία προκαλείται από την συγκεκριμένη φωτεινή πηγή (αυτή που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτέλεση του πειράματος) είναι X , τότε η καμπύλη της φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού παριστάνεται από την καμπύλη χ . Υπό αυτή την έννοια, οι παραγόμενες καμπύλες εξ αιτίας της χρησιμοποίησης φωτοπικών μονάδων, δεν ισχύουν πάντα όταν η τιμή της λαμπρότητας είναι αυτή υπό την οποία κατασκευάστηκαν αλλά για την τιμή της λαμπρότητας υπό την οποία κατασκευάστηκαν εφ' όσον αυτή προκαλείται από την ίδια φωτεινή πηγή που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη. Συνεπώς, ενώ δεν αποκλείεται θεωρητικά η κατασκευή μεσοπικών καμπυλών εντούτοις αυτές είναι έγκυρες κάτω από πολύ ειδικές συνθήκες.

Ακόμα πρέπει να εξετασθεί κατά πόσο η φωτεινότητα των ερεθισμάτων επηρεάζει τη μετρούμενη φωτοπική λαμπρότητα. Έχουν διεξαχθεί πειράματα ταύτισης φωτεινότητας με σκοτεινό υπόβαθρο και άλλα με φωτεινό. Είναι προφανές ότι στη πρώτη περίπτωση η φωτοπική λαμπρότητα που μετράται μετρά τη

λαμπρότητα που προκαλείται από μια φασματική κατανομή που συνίσταται από το άθροισμα των φασματικών κατανομών των ερεθισμάτων. Επειδή όμως τα φωτεινά ερεθίσματα αλλάζουν, τουλάχιστον τα υπό εξέταση, η μετρούμενη τιμή λαμπρότητας αναφέρεται σε τελείως διαφορετικές φασματικές κατανομές. Οπότε σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν δεν είναι συγκρίσιμες. Στη δεύτερη περίπτωση, δηλαδή του φωτεινού υποβάθρου για να είναι συγκρίσιμες οι μετρήσεις θα πρέπει η συνεισφορά των ακτινοβολιών των ερεθισμάτων να είναι αμελητέα στη μετρούμενη μέση φωτοπική λαμπρότητα.

Με αυτό το τρόπο εισάγεται λοιπόν το ερώτημα, πως θα προσδιορισθεί η λαμπρότητα με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η επιλογή της κατάλληλης καμπύλης φασματικής ευαισθησίας για τον υπολογισμό της μεσοπικής λαμπρότητας, αν υποθέσουμε ότι αυτές είναι γνωστές.

Η γνώση της φωτοπικής λαμπρότητας όπως είδαμε δεν μας παρέχει κάποια πληροφορία για την αντίστοιχη μεσοπική, εκτός εάν είναι γνωστές οι μεσοπικές καμπύλες για την συγκεκριμένη φασματική κατανομή της φωτίζουσας ακτινοβολίας, η οποία τελικά μπορεί να συνίσταται από παραπάνω από μια φασματικές κατανομές. Έτσι ακόμα και εάν είναι γνωστές οι μεσοπικές καμπύλες για κάθε τύπο λαμπτήρα, δημιουργείται πρόβλημα στην εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος λόγω του μεγάλου αριθμού των υπάρχοντων λαμπτήρων και επιπλέον είναι δυνατόν η φωτίζουσα ακτινοβολία να προέρχεται από διαφορετικούς τύπους λαμπτήρων.

5.4 Κατασκευή καμπύλων φασματικής ευαισθησίας στη μεσοπική περιοχή ως συνάρτηση της φωτοπικής και της σκοτοπικής λαμπρότητας – γραμμικά μοντέλα

Μία άλλη προσέγγιση για τον υπολογισμό της μεσοπικής λαμπρότητας είναι η θεώρηση, ότι αυτή θα είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των λαμπροτήτων για την φωτοπική και σκοτοπική περιοχή. Αυτή τη προσέγγιση ακολουθούν τα μοντέλα της Palmer, του M.Rea και τέλος του προγράμματος MOVE. Εδώ βέβαια υπάρχουν κάποιες αντιρρήσεις αναφορικά με την δυνατότητα μείξης δεδομένων, που προέρχονται από τελείως διαφορετικές πειραματικές μέθοδες. Δηλαδή για τη κατασκευή της φωτοπικής καμπύλης χρησιμοποιηθήκαν πειραματικές μέθοδοι που υπόκεινται στο νόμο της προσθετικότητας, ενώ για τη σκοτοπική καμπύλη δεν υπάρχει τέτοιος περιορισμός γιατί στη σκοτοπική όραση μετέχουν μόνο τα ραβδία και

απουσιάζει το χαρακτηριστικό του χρώματος μιας ακτινοβολίας. Ακόμα όμως και αν παραμερισθούν αυτές υπάρχουν δύο τουλάχιστον προβληματικά σημεία:

α) η γνώση της τιμής της φωτοπικής ή σκοτοπικής λαμπρότητας, δεν παρέχει καμία πληροφορία για την μεσοπική λαμπρότητα.

β) στο σκεπτικό αυτών των μεθόδων υπάρχει η παραδοχή, ότι τα κωνία και τα ραβδία λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο ανεξαρτήτως της λαμπρότητας. Αυτό όμως είναι λανθασμένο. Τα ραβδία στην σκοτοπική περιοχή είναι όλα ενεργά, αυξανόμενης όμως της λαμπρότητας όλο και μεγαλύτερο ποσοστό από αυτά φθάνει σε κατάσταση κορεσμού, με αποτέλεσμα ο αριθμός των "ενεργών" ραβδίων να μειώνεται δραστικά. Από την άλλη μεριά στην φωτοπική περιοχή τα κωνία είναι πλήρως ενεργοποιημένα, ενώ τα ραβδία σε κατάσταση κορεσμού. Όμως τα κατώφλια ενεργοποίησης των κωνίων δεν έχουν την ίδια τιμή. Έχει παρατηρηθεί, ότι ακτινοβολίες πλούσιες σε μικρά μήκη κύματος φθάνουν πιο γρήγορα στα σκοτοπικά επίπεδα λαμπρότητας. Άρα στην μεσοπική περιοχή, επειδή αλλάζει η σχετική συνεισφορά των διαφόρων ειδών των κωνίων, η συνεισφορά των κωνίων στην λαμπρότητα δεν θα είναι ίση με αυτή που παρέχεται από την $V(\lambda)$, πολλαπλασιασμένη επί ένα συντελεστή μικρότερο της μονάδας. Έτσι λοιπόν η μεσοπική λαμπρότητα δεν είναι βέβαιο, ότι μπορεί να προέλθει από ένα συνδυασμό φωτοπικής-σκοτοπικής.

Σε αυτή τη κατεύθυνση κινήθηκε η Palmer η οποία παρουσίασε ένα γραμμικό και δύο μη γραμμικά μοντέλα εύρεσης της μεσοπικής λαμπρότητας από τις αντίστοιχες τιμές της φωτοπικής και σκοτοπικής.

$$L'' = xP + (1-x)S \quad 5.4.1$$

Τα γραμμικά μοντέλα επανήλθαν στο προσκήνιο τα τελευταία χρόνια με τα μοντέλα του Rea και το μοντέλο του προγράμματος MOVE. Και στα δύο μοντέλα οι μεσοπικές καμπύλες θεωρούνται γραμμικός συνδυασμός των $V(\lambda)$ και $V'(\lambda)$, ενώ ανάλογη σχέση ισχύει και για τις σταθερές K_{max} . Και τα δύο μοντέλα έχουν τη μορφή:

$$V'' = x \cdot V(\lambda) + (1-x) \cdot V'(\lambda) \quad 5.4.2$$

Όπως αναφέρθηκε και στα αντίστοιχα κεφάλαια η διαφορά ανάμεσα στα μοντέλα αυτά είναι ότι στη περίπτωση της Palmer επιχειρείται η εύρεση της μεσοπικής λαμπρότητας από τις τιμές της φωτοπικής και σκοτοπικής ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις κατασκευάζεται η μεσοπική καμπύλη σχετικής φασματικής

ευαισθησίας από την αντίστοιχη φωτοπική και σκοτοπική. Και στις δύο τελευταίες περιπτώσεις η εύρεση του x γίνεται με πειραματικές μεθόδους που βασίζονται κυρίως στο χρόνο αντίδρασης. Στο μοντέλο του Rea αποκλειστικά ενώ στο μοντέλο του MOVE σε ποσοστό 58%. Η μέθοδος των χρόνων αντίδρασης που χρησιμοποιείται δεν είναι καθαρά οπτική, δεν μετρά μόνο το οπτικό αίσθημα. Για παράδειγμα ο χρόνος που αντιδρά κάποιος δεν ταυτίζεται με το χρόνο που αντιλαμβάνεται το ερέθισμα. Η συσχέτιση αυτών των δύο χρόνων δε μπορεί να είναι ίδια για κάθε άνθρωπο, διαφέρει από υποκείμενο σε υποκείμενο. Έτσι λοιπόν με τη μέθοδο αυτή εισάγεται ένας ακόμα αστάθμητος παράγοντας που περιπλέκει περισσότερο τον ήδη πολύπλοκο μηχανισμό ανθρώπινης όρασης. Οι χρησιμοποιούμενες μονάδες είναι φωτοπικές. Με βάση τα προηγούμενα λοιπόν οι πειραματικές συνθήκες περιορίζουν την εφαρμογή του μοντέλου σε κάθε φασματική κατανομή. Επίσης για τη περίπτωση του μοντέλου του Rea, στο οποίο χρησιμοποιείται επαναληπτική μέθοδος εύρεσης του x , η μέθοδος δε θεμελιώνεται μαθηματικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, λόγω του ότι οι φασματικές κατανομές δεν είναι ομαλές συναρτήσεις του λ και συνήθως παρουσιάζουν παραπάνω του ενός μέγιστα με την μορφή απότομων κορυφών, να μην αποκλείεται η περίπτωση η επαναληπτική μέθοδος να μη συγκλίνει πάντα, αλλά να παρουσιάζει παλινδρόμηση.

Σίγουρα δημιοι φγείται η απορία ότι αν και το μοντέλο της Palmer έχει παρουσιασθεί αρκετές δεκαετίες πριν και δεν είχε γίνει αποδεκτό, επανεμφανίζεται και σήμερα με ελαφρά τροποποιημένη μορφή. Όμως όπως θα δούμε τα τρία αυτά μοντέλα είναι ταυτόσημα.

Το μοντέλο της Palmer προφανώς μπορεί να γραφεί:

$$L'' = [x + (1-x) \cdot R] \cdot P \quad 5.4.3$$

Όπου R ο λόγος σκοτοπικής προς φωτοπική λαμπρότητα και P η φωτοπική λαμπρότητα.

Στα άλλα δύο μοντέλα θα πρέπει να βρεθεί καταρχήν η σταθερά K'' . Αυτό μπορεί να γίνει από τη φωτομετρική συνθήκη στα 555nm η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας να έχει τιμή 683lm/W, δηλαδή θα πρέπει:

$$K''_{\max} V''(555) = 683 \Rightarrow$$

$$K''_{\max} [x \cdot V(555) + (1-x) \cdot V'(555)] = 683 \Rightarrow$$

$$K''_{\max} [x \cdot 1 + (1-x) \cdot 0.402] = 683 \Rightarrow$$

Δηλαδή

$$K''_{\max} = \frac{683}{x \cdot 1 + (1-x) \cdot 0.402}$$

5.4.4

Βρίσκοντας τη μέγιστη τιμή φασματικής απόδοσης η μεσοπική λαμπρότητα θα δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} L'' &= K''_{\max} \int_{360}^{780} L_e(\lambda) \cdot V''(\lambda, x) \cdot d\lambda \\ &= K''_{\max} \int_{360}^{780} L_e(\lambda) \cdot [x \cdot V(\lambda) + (1-x) \cdot V''(\lambda)] \cdot d\lambda = \\ &= K''_{\max} \int_{360}^{780} L_e(\lambda) \cdot x \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda + K''_{\max} \int_{360}^{780} L_e(\lambda) \cdot (1-x) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda = \\ &= K''_{\max} \frac{x}{683} \cdot \int_{360}^{780} L_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda + K''_{\max} \frac{(1-x)}{1700} \cdot \int_{360}^{780} L_e(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda = \\ &= K''_{\max} \frac{x}{683} \cdot P + K''_{\max} \frac{(1-x)}{1700} \cdot S = \\ &= \frac{683}{x \cdot 1 + (1-x) \cdot 0.402} \frac{x}{683} \cdot P + \frac{683}{x \cdot 1 + (1-x) \cdot 0.402} \frac{(1-x)}{1700} \cdot S = \\ &= \frac{x}{x \cdot 1 + (1-x) \cdot 0.402} \cdot P + \frac{0.402 \cdot (1-x)}{x \cdot 1 + (1-x) \cdot 0.402} \cdot S = \\ &= a \cdot P + b \cdot S \end{aligned} \tag{5.4.5}$$

Παρατηρούμε ότι

$$\begin{aligned} a + b &= \frac{x}{x \cdot 1 + (1-x) \cdot 0.402} + \frac{0.402 \cdot (1-x)}{x \cdot 1 + (1-x) \cdot 0.402} = \\ &= \frac{x + 0.402 \cdot (1-x)}{x \cdot 1 + (1-x) \cdot 0.402} = 1 \end{aligned} \tag{5.4.6}$$

Οπότε θέτοντας $a=x$ και $b=1-x$

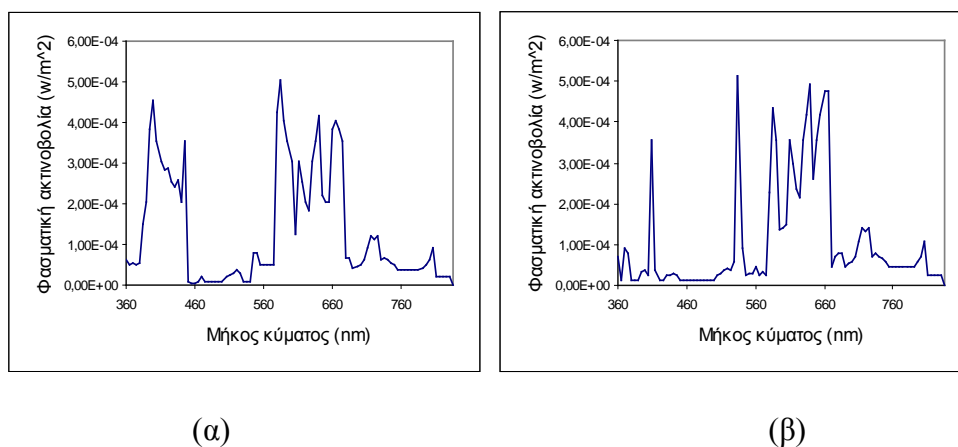
$$L'' = [x \cdot + (1-x) \cdot R] \cdot P \tag{5.4.6}$$

Άρα και αυτή μπορεί να τεθεί στη μορφή της εξίσωσης 5.4.3.

Παρατηρούμε ότι τα μοντέλα αυτά είναι ταυτόσημα. Η διαφοράς τους οφείλονται απλά και μόνο στις πειραματικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για το προσδιορισμό του x . Αυτό είναι άλλωστε φυσικό, δεν μπορεί να υπάρχουν πολλοί τύποι γραμμικών μοντέλων με μια μόνο παράμετρο.

Το σημαντικότερο όμως με τα γραμμικά μοντέλα είναι ότι μπορούν πάντα να πάρουν τη μορφή της 5.4.3. Αυτό σημαίνει ότι η μεσοπική λαμπρότητα εκφράζεται

συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας και του λόγου σκοτοπικής λαμπρότητας προς φωτοπική (S/P). Ο λόγος αυτός αποτελεί χαρακτηριστικό της φωτεινής πηγής. Με άλλα λόγια δύο πηγές με διαφορετική φασματική κατανομή αλλά με το ίδιο λόγο S/P αν έχουν την ίδια φωτοπική λαμπρότητα θα έχουν και την ίδια μεσοπική. Όπως όμως αναφέρθηκε, λόγω του ότι η λαμπρότητα είναι ένα ορισμένο ολοκλήρωμα είναι δυνατόν να έχουν τον ίδιο λόγο S/P δύο τελείως διαφορετικές κατανομές. Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζονται δύο υποθετικές πηγές με αυτό το χαρακτηριστικό, δηλαδή τον ίδιο λόγο S/P. Αυτές σύμφωνα με τα γραμμικά μοντέλα θα έχουν την ίδια συμπεριφορά στη μεσοπική περιοχή, αν έχουν την ίδια φωτοπική λαμπρότητα θα έχουν και την ίδια μεσοπική για κάθε τιμή της φωτοπικής λαμπρότητας. Εύκολα παρατηρείται όμως ότι η πηγή (α) είναι πολύ «πλούσια» σε ακτινοβολίες μικρών μηκών κύματος ενώ η (β) πολύ «φτωχή» σε αυτές, Σύμφωνα όμως με τη καθολικά αποδεκτή θεωρία της μεσοπικής όρασης (φαινόμενο Purkinje) η πηγή (α) θα έχει καλύτερη απόδοση από την πηγή (β). Δηλαδή για την ίδια τιμή φωτοπικής λαμπρότητας θα παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή μεσοπικής λαμπρότητας από την άλλη.



Σχήμα 5.1 Φασματικές κατανομές δύο υποθετικών πηγών α και β οι οποίες έχουν το ίδιο λόγο S/P

5.5 Κεντρική όραση

Κατά τη κεντρική όραση, γωνιακού ανοίγματος 2° , το ανθρώπινο αίσθημα οφείλεται αποκλειστικά στη δράση των κόνιων. Αυτό γιατί στη περιοχή αυτή του αμφιβληστροειδή δεν υπάρχουν ραβδία. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στη κεντρική όραση η καμπύλη προσαρμογής του ανθρώπινου οφθαλμού θα είναι μοναδική και συγκεκριμένα η φωτοπική. Το συμπέρασμα μπορεί να είναι λογικό

όμως στηρίζεται σε μία μάλλον αυθαίρετη υπόθεση. Την υπόθεση ότι τα διάφορα είδη κονίων συνεισφέρουν το ίδιο σε κάθε περιοχή λαμπρότητας. Όμως ο αριθμός των L, M και S κονίων δεν είναι ίδιος. Τα S-κωνία αποτελούν το 7-8% του συνολικού αριθμού των κονίων ενώ τα L-κωνία είναι διπλάσια σε αριθμό από τα M-κωνία. Επίσης τα κατώφλια ενεργοποίησης των κονίων δεν είναι ίδια. Αυτό σημαίνει ότι σε χαμηλές συνθήκες φωτισμού η συνεισφορά των διάφορων τύπων κονίων στην όραση ενδέχεται να μην είναι ίδια όπως στη φωτοπική, με άλλα λόγια η καμπύλη προσαρμογής του ανθρώπινου οφθαλμού να μην είναι η φωτοπική.

Αυτό μπορεί να ελεγχθεί σχετικά εύκολα. Εάν για χαμηλά επίπεδα φωτισμού ($L < 10 \text{cd/m}^2$), η κεντρική όραση είναι ανεξάρτητη της φασματικής κατανομής τότε αυτό θα σημαίνει ότι πράγματι στη κεντρική όραση υπάρχει μια μόνο καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας, η $V(\lambda)$. Αν όμως η όραση εξαρτάται και από τη φασματική κατανομή, τότε αυτό θα σημαίνει ότι ο οφθαλμός ακόμα και στη κεντρική όραση προσαρμόζεται σε διαφορετικές καμπύλες σχετικής φασματικής ευαισθησίας, μεσοπικές. Βέβαια ο όρος «μεσοπική καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας», δε χρησιμοποιείται με την ίδια έννοια που χρησιμοποιείτο μέχρι τώρα. Ο όρος μεσοπική όραση αναφέρεται στη περίπτωση όπου και τα τέσσερα είδη ανιχνευτών συνεισφέρουν στη όραση. Στη περίπτωση όμως της κεντρικής όρασης η μεσοπική όραση, αν παρουσιάζεται, θα οφείλεται στη διαφοροποίηση της συνεισφοράς των τριών ειδών κονίων από αυτή που παρουσιάζουν στη φωτοπική περιοχή. Για αυτό το λόγο στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο όρος «κεντρική μεσοπική όραση».

Για τον έλεγχο αυτής της υπόθεσης σχεδιάστηκε πειραματική διάταξη βασισμένη στο κριτήριο της οπτικής οξύτητας. Τα πείραμα και τα αποτελέσματα του παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 6.

5.6 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τις παραγράφους 5.1 έως 5.4 μπορούμε να πούμε τα εξής;

- Η φωτομετρία και η οπτική αντίληψη είναι δύο εντελώς διαφορετικές έννοιες, σε καμία όμως περίπτωση μη συσχετισμένες. Η φωτομετρία οφείλει να περιγράφει την ανθρώπινη οπτική αντίληψη. Η φωτομετρία μπορεί να θεωρηθεί ως η «γέφυρα» ανάμεσα σε αντικειμενικά ερεθίσματα και στα ερεθίσματα που αυτά προκαλούν.

- Στην μεσοπική περιοχή ο οφθαλμός του παρατηρητή προσαρμόζεται σε διάφορες καμπύλες φασματικής ευαισθησίας, ανάλογα με την λαμπρότητα που αυτός αντιλαμβάνεται, τη μεσοπική λαμπρότητα
- Οι καμπύλες αυτές θα πρέπει να μεταβάλλονται κατά ομαλό τρόπο από τη φωτοπική προς στη σκοτοπική καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας.
- Η φασματική κατανομή της φωτεινής πηγής, στη μεσοπική περιοχή όρασης, επηρεάζει τα μεγέθη όχι μόνο ποσοτικά, αλλά και ποιοτικά. Δηλαδή αν αλλάξει η φασματική κατανομή της πηγής ενώ ταυτόχρονα διατηρείται σταθερή η φωτοπική λαμπρότητα, ο ανθρώπινος οφθαλμός προσαρμόζεται σε διαφορετική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας.
- Δεν είναι δυνατός ο καθορισμός της μεσοπικής λαμπρότητας αν δεν είναι γνωστή η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας που προσαρμόζεται ο ανθρώπινος οφθαλμός στις συνθήκες αυτές, (πρόβλημα κυκλικότητας).
- Η χρήση φωτοπικών μονάδων στη μεσοπική περιοχή δε δίνει πληροφορίες για τη μεσοπική λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής.
- Η μέτρηση των μεγεθών σε φωτοπικές μονάδες κατά τη πειραματική διαδικασία εύρεσης μεσοπικών καμπύλων φασματικής ευαισθησίας περιορίζει τη χρήση των καμπύλων αυτών στις συνθήκες του πειράματος.
- Η έκφραση της μεσοπικής λαμπρότητας συναρτήσει της φωτοπικής και σκοτοπικής λαμπρότητας μέσω γραμμικών μοντέλων οδηγεί στην έκφραση της μεσοπικής λαμπρότητας συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας και του λόγου S/P
- Ο λόγος S/P αποτελεί ένα πολύ ασθενές κριτήριο ταξινόμησης των φωτεινών πηγών.
- Στη κεντρική όραση δεν είναι αναγκαίο η όραση να προσαρμόζεται στην $V(\lambda)$.

Κεφάλαιο 6: Μελέτη της κεντρικής όρασης σε μεσοπικές συνθήκες φωτισμού

6.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στην ωχρά κηλίδα δεν υπάρχουν ραβδία.[85, 86] Οπότε έπεται λογικά η θέση «κατά τη κεντρική όραση ο ανθρώπινος οφθαλμός προσαρμόζεται μόνο στη φωτοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας». Με άλλα λόγια δεν υφίσταται μεσοπική περιοχή στη κεντρική όραση. Αυτό προϋποθέτει ότι τα τρία είδη κωνίων συνεισφέρουν στην όραση κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο, ανεξάρτητα από τη λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής.

Μια άλλη συνέπεια αυτής της θεώρησης είναι ότι οποιοδήποτε οπτικό κριτήριο θα δίνει, για συγκεκριμένη τιμή λαμπρότητας, τα ίδια αποτελέσματα ανεξάρτητα από τη φασματική κατανομή της φωτίζουσας ακτινοβολίας. Αυτό γιατί η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας παραμένει ίδια, άρα ο παρατηρητής «βλέπει» την ίδια λαμπρότητα.

Σε αυτή τη παρατήρηση στηρίζεται και ο έλεγχος της προαναφερθείσας θέσης. Συγκεκριμένα, είναι δυνατόν να εξετασθεί η ανταπόκριση ενός παρατηρητή σε ένα οπτικό κριτήριο για διάφορες τιμές λαμπρότητας, μικρότερης βέβαια από 10 cd/m², που προκαλείται από διαφορετικές φασματικές κατανομές κάθε φορά.

Επιλέχθηκε το κριτήριο της οπτικής οξύτητας. Ο λόγος για αυτό είναι ότι κωνία είναι υπεύθυνα για την οπτική ευκρίνεια. Ακολούθως μετρήθηκε η οπτική οξύτητα έξι παρατηρητών σε διάφορες τιμές λαμπρότητας, λαμπτήρες διαφορετικής φασματικής κατανομής κάθε φορά.

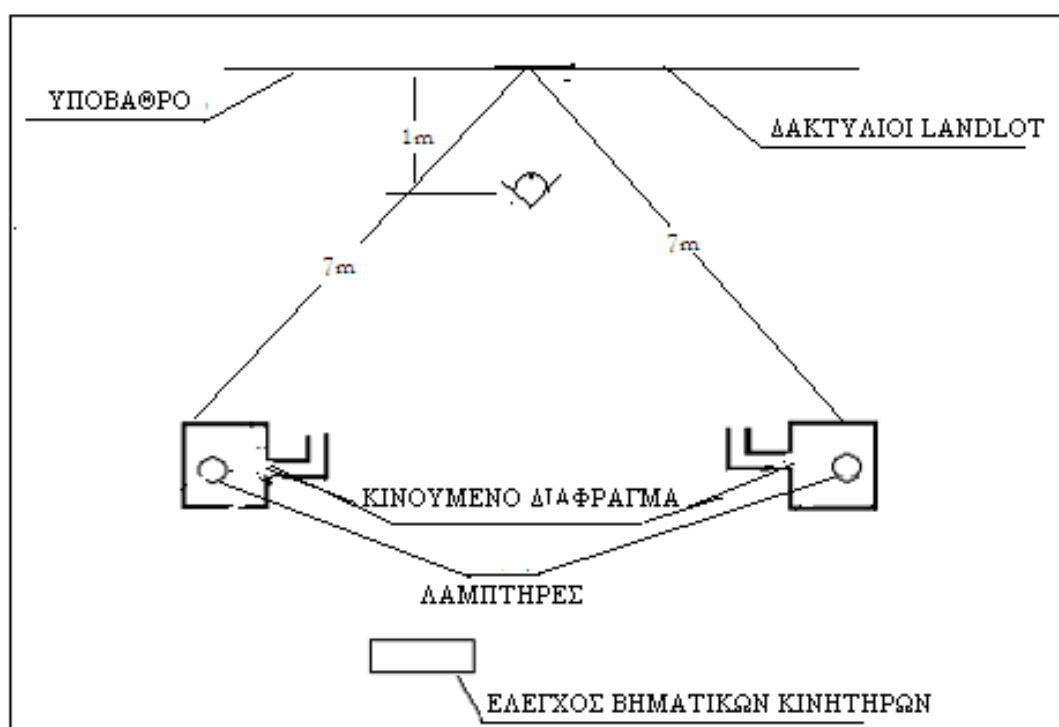
6.2 Πειραματική διάταξη

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων κατασκευάστηκε στο εργαστήριο φωτοτεχνίας κατάλληλη πειραματική διάταξη (σχήμα 6.1).

Η διάταξη αποτελείται από τα εξής μέρη:

Υπόβαθρο: αυτό δημιουργείται από μια επίπεδη επιφάνεια λευκού χρώματος με μεγάλη διαχυτική ικανότητα. Η επιφάνεια φωτίζεται με ειδικό σύστημα διάχυσης φωτός, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή ομοιομορφία.

Οπτικός στόχος: Αυτός αποτελείται από κάρτες δακτυλίων Landlot. Υπάρχουν 24 σειρές, κάθε μια από αυτές περιέχει 5 δακτυλίους. Ο προσανατολισμός του ανοίγματος του κάθε δακτυλίου είναι τυχαίος, έχοντας ως διεύθυνση μία από τις οκτώ βασικές διευθύνσεις, δηλαδή 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 και 360 μοίρες. Στο σχήμα 6.2 φαίνονται οι κάρτες που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 6.1 Πειραματική διάταξη μέτρησης οπτικής οξύτητας

Φωτιστικά σώματα: Ο φωτισμός υποβάθρου και στόχου γίνεται με τους επιλεγμένους λαμπτήρες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε φωτοστεγή δοχεία. Το εσωτερικό των δοχείων είναι επιχρισμένο με BaSO_4 , στις εσωτερικές επιφάνειες.

Οδήγηση της ακτινοβολίας: Το φως οδηγείται στον οπτικό στόχο με φωτοσωλήνες σχήματος Γ, οι οποίοι εσωτερικά, είναι επίσης επιχρισμένοι με BaSO_4 . Αυτοί προσαρμόζονται σε κατάλληλη οπή του φωτοδοχείου. Οι εξωτερικές επιφάνειες είναι χρωματισμένες με μαύρο χρώμα, συντέλεση ανάκλασης 0,08, ώστε να εμποδίζεται ο παράσιτος φωτισμός.

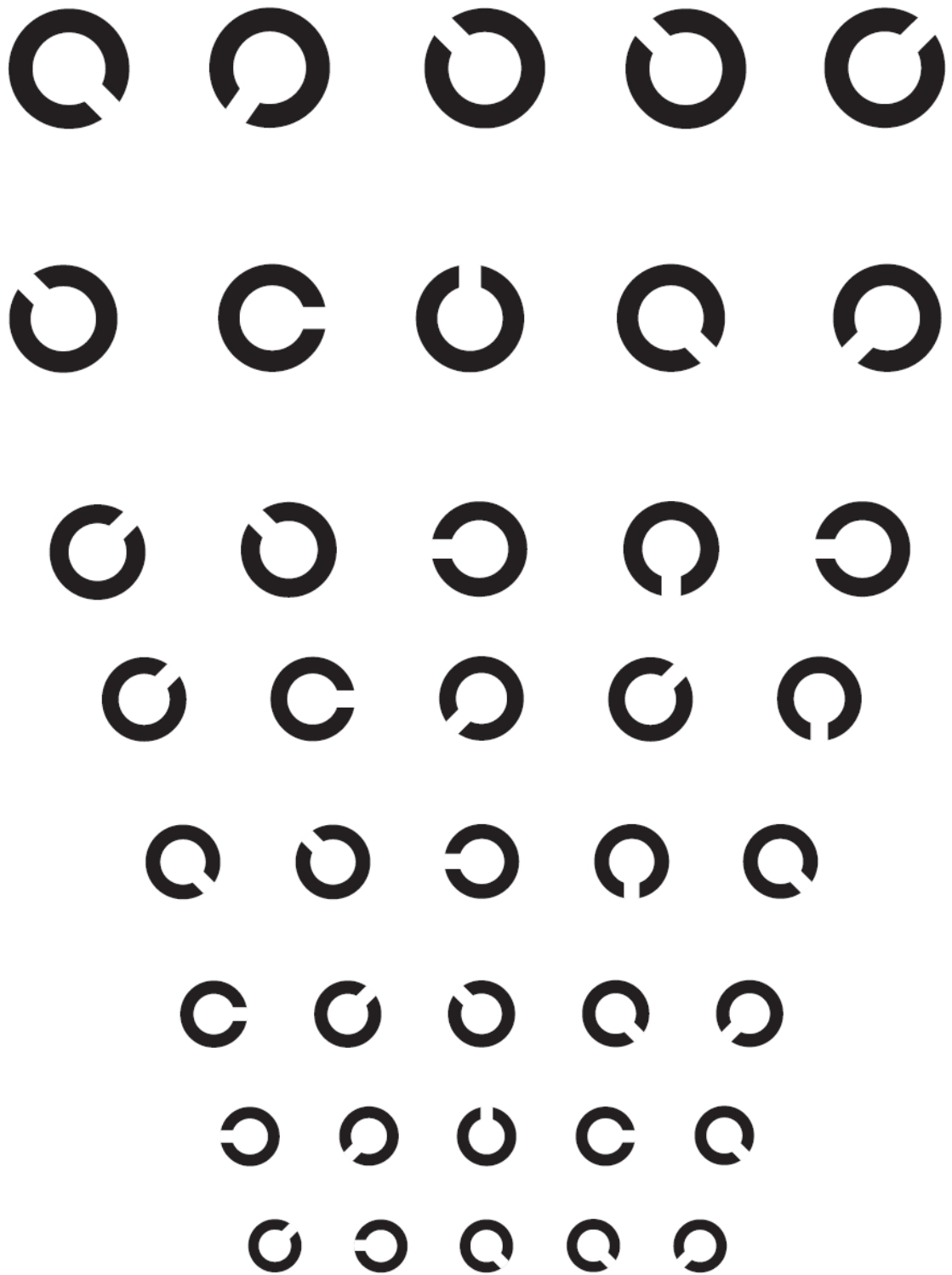
Ρύθμιση φωτισμού: Ένα αδιαφανές διάφραγμα είναι τοποθετημένο στο εσωτερικό του φωτοδοχείου μπροστά από την οπή στην οποία συνδέονται οι φωτοσωλήνες. Το

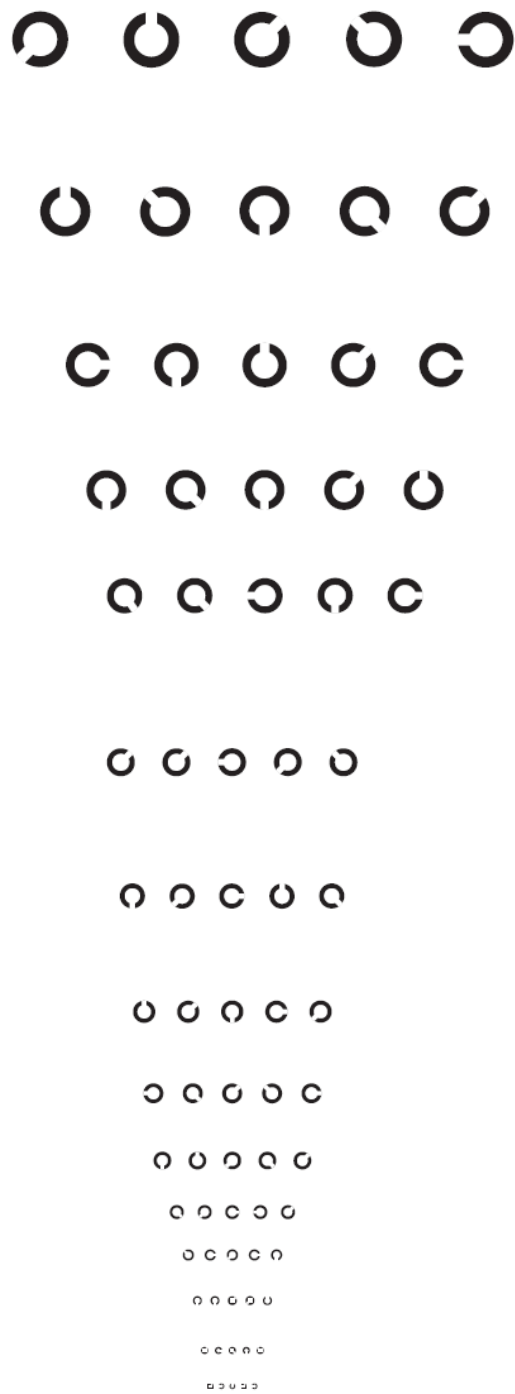
διάφραγμα μπορεί να περιστρέφεται μεταβαλλόντας έτσι τη ποσότητα φωτός που εισέρχεται στον φωτοσωλήνα.

Έλεγχος κίνησης διαφραγμάτων: Η περιστροφή των διαφραγμάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση βηματικών κινητήρων. Οι κινητήρες οδηγούνται με κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα. Η κίνηση του διαφράγματος είναι δυνατή και κατά τις δύο φορές περιστροφής. Η τροφοδοσία των κινητήρων και του ηλεκτρονικού κυκλώματος γίνεται από τροφοδοτικό συνεχούς τάσης.

Οδήγηση λαμπτήρων: οι λαμπτήρες οδηγούνται από τα αντίστοιχα μπάλαστ, σε όσους λαμπτήρες αυτό είναι αναγκαίο. Η τροφοδοσία γίνεται μέσω σταθεροποιητή τάσης.

Θέση παρατήρησης: Στο κέντρο της επιφάνειας και σε απόσταση 1 m από αυτήν είναι κατάλληλα τοποθετημένη μάσκα στην οποία προσαρμόζει το κεφάλι του ο παρατηρητής, έτσι ώστε η θέση του οφθαλμού του να είναι καθορισμένη και η ίδια κάθε φορά.



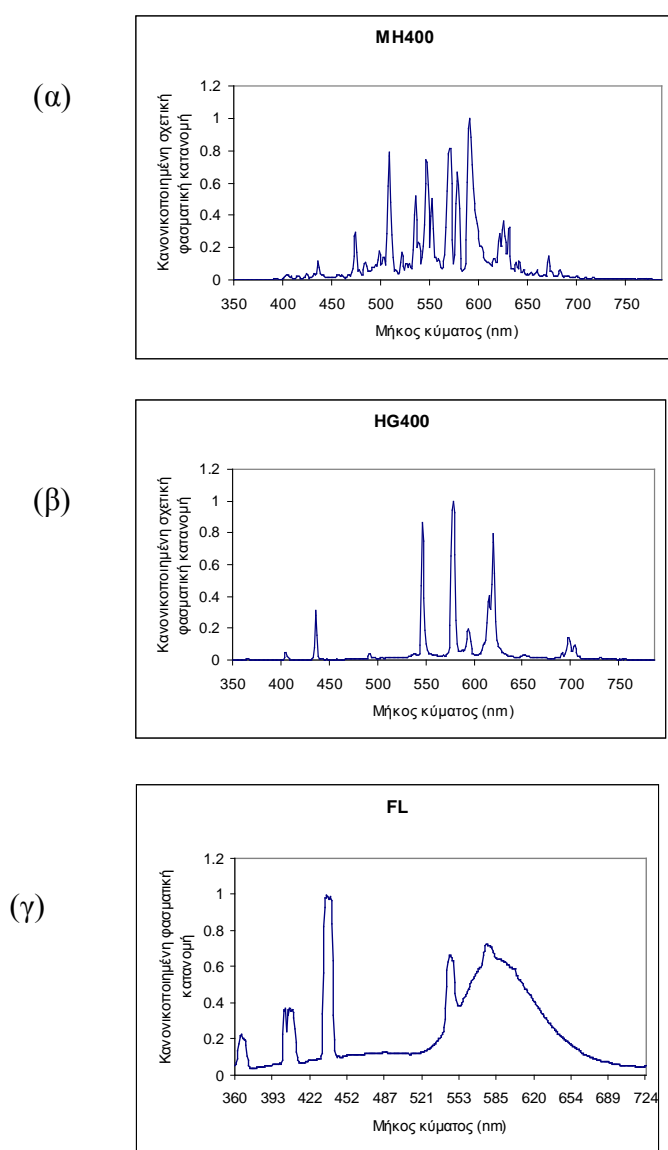


Σχήμα 6.2 Δακτύλιοι του Landlot που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. (σμίκρυνση 69.1%)

6.3 Πειραματική διαδικασία

Έγιναν μετρήσεις οπτικής οξύτητας σε έξι νέα άτομα ηλικίας μικρότερης των 30 ετών και μεγαλύτερων των 20, με φυσιολογική όραση. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν σε διάφορα επίπεδα φωτοπικής λαμπρότητας, συγκεκριμένα σε 1, 0.5, 0.1, 0.05, 0.01 και 0.005 cd/m². Δηλαδή σε επίπεδα λαμπρότητας της χαμηλής μεσοπικής όρασης.

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα είδη λαμπτήρων με φασματικές κατανομές που διαφέρουν πολύ η μία της άλλης, Χρησιμοποιήθηκαν οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων, ατμών υδραργύρου, λαμπτήρας πυράκτωσης και τέλος λαμπτήρας φθορισμού. Οι φασματικές κατανομές των λαμπτήρων παρίστανται στα σχήματα 6.3



Σχήμα 6.3 Κανονικοποιημένες φασματικές κατανομές στο ορατό φάσμα για τους λαμπτήρες α: μεταλλικών αλογονιδίων β: ατμών υδραργύρου γ: φθορισμού

Λόγω του ότι ο λόγος της σκοτοπικής προς τη φωτοπική λαμπρότητα αποτελεί ένα βασικό παράγοντα ταξινόμησης στα γραμμικά μοντέλα έγιναν μετρήσεις αυτού του λόγου για τους λαμπτήρες που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Συγκεκριμένα στη μια οπή σφαίρας Ulbricht διαμέτρου 50 cm προσαρμόζεται ο φωτοσωλήνας του φωτιστικού. Στην άλλη τοποθετείται ο αισθητήρας του λουξομέτρου. Γίνονται δύο είδη μετρήσεων τοποθετώντας διαδοχικά στον αισθητήρα το φωτοπικό και το σκοτοπικό φίλτρο. Λόγω της ίδιας γεωμετρίας οι λόγοι φωτισμού είναι ίσοι με τους λόγους λαμπρότητας. Στο πίνακα 6.1 αναγράφονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας.

Πίνακας 6.1 Λόγοι σκοτοπικής προς φωτοπική λαμπρότητα των λαμπτήρων ατμών υδραργύρου, μεταλλικών αλογονιδίων, φθορισμού και πυράκτωσης.

| Λαμπτήρας | Λόγος S/P |
|------------------------|-----------|
| Ατμών υδραργύρου | 0.9 |
| Πυράκτωσης | 0.97 |
| Φθορισμού | 1.32 |
| Μεταλλικών αλογονιδίων | 1.62 |

Η πειραματική διαδικασία έχει ως εξής:

Τοποθετείται ο λαμπτήρας στο φωτοδοχείο και μετακινώντας το διάφραγμα επιτυγχάνεται η επιθυμητή τιμή φωτοπικής λαμπρότητας. Η μέτρηση της λαμπρότητας έγινε με λαμπρόμετρο MINOLTA LS100. Η διακύμανση της λαμπρότητας βρέθηκε της τάξης του 7% για τα ακραία σημεία του οπτικού πεδίου του παρατηρητή και 1% για το φωτισμό των καρτών Landlot.

Τα υποκείμενα αφού προσαρμόσουν την όραση τους στο σκοτάδι για χρόνο 30min καλούνται να αναγνωρίσουν το διάκενο στους δακτυλίους, Η μικρότερη σειρά δακτυλίων που μπορεί να αναγνωρισθεί είναι αυτή στην οποία το υποκείμενο βρίσκει επιτυχώς τους τρεις από τους πέντε δακτυλίους της σειράς, Η οπτική οξύτητα μετράται ως το αντίστροφο της γωνίας, σε λεπτά της μοίρας, υπό την οποία φαίνεται το άνοιγμα της μικρότερης σειράς δακτυλίων που είναι διακριτή. Στον πίνακα 6.2 φαίνονται τα χαρακτηριστικά κάθε σειράς δακτυλίων και η αντίστοιχη οπτική οξύτητα, για απόσταση παρατηρητή ενός μέτρου από τη κάρτα.

Πίνακας 6.2 Χαρακτηριστικά των δακτυλίων Landlot

| | εφ(1') | Μήκος 5 μονάδων | Λόγος | Οπτική οξύτητα |
|----|-------------|-----------------|--------|----------------|
| 1 | 0.000290888 | 36.958 | 1/25.4 | 0.039 |
| 2 | 0.000290888 | 33.148 | 1/22.8 | 0.044 |
| 3 | 0.000290888 | 29.333 | 1/20.2 | 0.050 |
| 4 | 0.000290888 | 26.307 | 1/18.1 | 0.055 |
| 5 | 0.000290888 | 23.28 | 1/16.0 | 0.062 |
| 6 | 0.000290888 | 20.878 | 1/14.4 | 0.070 |
| 7 | 0.000290888 | 18.478 | 1/12.7 | 0.079 |
| 8 | 0.000290888 | 16.57 | 1/11.4 | 0.088 |
| 9 | 0.000290888 | 14.665 | 1/10.1 | 0.099 |
| 10 | 0.000290888 | 13.152 | 1/9.0 | 0.111 |
| 11 | 0.000290888 | 11.639 | 1/8.0 | 0.125 |
| 12 | 0.000290888 | 10.438 | 1/7.2 | 0.139 |
| 13 | 0.000290888 | 9.237 | 1/6.4 | 0.157 |
| 14 | 0.000290888 | 8.284 | 1/5.7 | 0.176 |
| 15 | 0.000290888 | 7.331 | 1/5.0 | 0.198 |
| 16 | 0.000290888 | 6.575 | 1/4.5 | 0.221 |
| 17 | 0.000290888 | 5.818 | 1/4.0 | 0.250 |
| 18 | 0.000290888 | 5.218 | 1/3.6 | 0.279 |
| 19 | 0.000290888 | 4.618 | 1/3.2 | 0.315 |
| 20 | 0.000290888 | 3.665 | 1/2.5 | 0.397 |
| 21 | 0.000290888 | 2.909 | 1/2.0 | 0.500 |
| 22 | 0.000290888 | 2.308 | 1/1.6 | 0.630 |
| 23 | 0.000290888 | 1.832 | 1/1.3 | 0.794 |
| 24 | 0.000290888 | 1.454 | 1/1.0 | 1.000 |

6.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε κάθε υποκείμενο και κάθε λαμπτήρα φωτισμού υποβάθρου αναγράφονται στο ψ πίνακες 6.3 έως 6.6. Στο πίνακα 6.7 αναγράφεται ο μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε λαμπτήρα φωτισμού υποβάθρου και κάθε επίπεδο λαμπρότητας, Χρήσιμο επίσης είναι για να γίνονται ευκολότερα οι συγκρίσεις να θεωρηθεί ένας από τους λαμπτήρες ως αναφορά. Θεωρώντας το λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων ως λαμπτήρα αναφοράς, δηλαδή θεωρώντας την απόδοση του ως 100 κατασκευάζεται ο πίνακας 6.8. Τέλος στα σχήματα 6.4 και 6.5 παρίστανται γραφικά η μεταβολή της οπτικής οξύτητας συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας και συναρτήσει του λόγου σκοτοπικής προς φωτοπική λαμπρότητα (S/P).

Πίνακας 6.3 Οπτική οξύτητα με φωτισμό υποβάθρου από λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων

| ΛΑΜΠΗΤΗΡΑΣ | ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΛΟΓΟΝΙΔΙΩΝ | | | | | | ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ |
|--|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| ΛΟΓΟΣ S/P | 1,62 | | | | | | |
| ΛΑΜΠΡΟΤΗΤΑ (Φωτοπικές cd/m ²) | ΟΠΤΙΚΗ ΟΞΥΤΗΤΑ | | | | | | |
| | ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 1 | 0.794 | 0.500 | 0.315 | 0.315 | 0.500 | 0.630 | 0.509 |
| 0.5 | 0.794 | 0.500 | 0.315 | 0.315 | 0.500 | 0.630 | 0.509 |
| 0.1 | 0.630 | 0.397 | 0.250 | 0.198 | 0.250 | 0.500 | 0.371 |
| 0.05 | 0.500 | 0.279 | 0.198 | 0.175 | 0.250 | 0.315 | 0.286 |
| 0.01 | 0.198 | 0.125 | 0.111 | 0.111 | 0.125 | 0.139 | 0.135 |
| 0.005 | 0.111 | 0.099 | 0.044 | 0.039 | 0.05 | 0.099 | 0.074 |

Πίνακας 6.4 Οπτική οξύτητα με φωτισμό υποβάθρου από λαμπτήρα ατμών υδραργύρου

| ΛΑΜΠΗΤΗΡΑΣ | ΑΤΜΩΝ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ 400W | | | | | | ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ |
|--|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| ΛΟΓΟΣ S/P | 0,9 | | | | | | |
| ΛΑΜΠΡΟΤΗΤΑ (Φωτοπικές cd/m ²) | ΟΠΤΙΚΗ ΟΞΥΤΗΤΑ | | | | | | |
| | ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 1 | 1 | 0.630 | 0.397 | 0.397 | 0.630 | 0.794 | 0.641 |
| 0.5 | 1 | 0.630 | 0.397 | 0.397 | 0.630 | 0.794 | 0.641 |
| 0.1 | 0.697 | 0.500 | 0.279 | 0.315 | 0.397 | 0.630 | 0.470 |
| 0.05 | 0.500 | 0.397 | 0.279 | 0.279 | 0.397 | 0.397 | 0.375 |
| 0.01 | 0.198 | 0.139 | 0.139 | 0.139 | 0.157 | 0.175 | 0.158 |
| 0.005 | 0.139 | 0.111 | 0.044 | 0.039 | 0.099 | 0.125 | 0.093 |

Πίνακας 6.5 Οπτική οξύτητα με φωτισμό υποβάθρου από λαμπτήρα πυράκτωσης

| ΛΑΜΠΗΤΗΡΑΣ | ΠΥΡΑΚΤΩΣΗΣ | | | | | | ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ |
|--|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| ΛΟΓΟΣ S/P | 0,97 | | | | | | |
| ΛΑΜΠΡΟΤΗΤΑ (Φωτοπικές cd/m ²) | ΟΠΤΙΚΗ ΟΞΥΤΗΤΑ | | | | | | |
| | ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 1 | 1.000 | 0.630 | 0.500 | 0.500 | 0.630 | 0.794 | 0.676 |
| 0.5 | 1.000 | 0.630 | 0.500 | 0.500 | 0.630 | 0.794 | 0.676 |
| 0.1 | 0.794 | 0.500 | 0.315 | 0.279 | 0.500 | 0.630 | 0.503 |
| 0.05 | 0.63 | 0.315 | 0.279 | 0.279 | 0.397 | 0.500 | 0.400 |
| 0.01 | 0.221 | 0.175 | 0.157 | 0.139 | 0.175 | 0.198 | 0.178 |
| 0.005 | 0.139 | 0.111 | 0.050 | 0.050 | 0.099 | 0.125 | 0.096 |

Πίνακας 6.6 Οπτική οξύτητα με φωτισμό υποβάθρου από λαμπτήρα φθορισμού

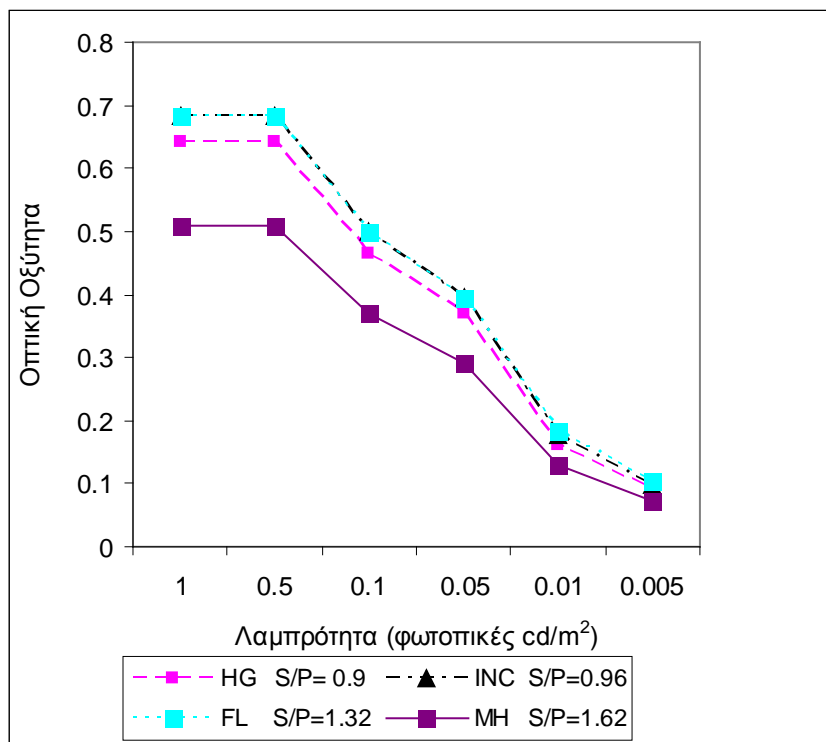
| ΛΑΜΠΤΗΡΑΣ | ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ | | | | | | ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ |
|--|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| ΛΟΓΟΣ S/P | 1.32 | | | | | | |
| ΛΑΜΠΡΟΤΗΤΑ ΦΩΤΟΠΙΚΗ cd/m ² | ΟΠΤΙΚΗ ΟΞΥΤΗΤΑ | | | | | | |
| | ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 1 | 1 | 0.630 | 0.500 | 0.500 | 0.630 | 0.794 | 0.676 |
| 0.5 | 1 | 0.630 | 0.500 | 0.500 | 0.630 | 0.794 | 0.676 |
| 0.1 | 0.697 | 0.500 | 0.315 | 0.315 | 0.500 | 0.697 | 0.504 |
| 0.05 | 0.620 | 0.315 | 0.279 | 0.279 | 0.397 | 0.500 | 0.398 |
| 0.01 | 0.221 | 0.175 | 0.157 | 0.139 | 0.175 | 0.198 | 0.181 |
| 0.005 | 0.139 | 0.111 | 0.050 | 0.050 | 0.099 | 0.125 | 0.100 |

Πίνακας 6.7 Μέση τιμή οπτικής οξύτητας για διάφορους φωτισμούς υποβάθρου

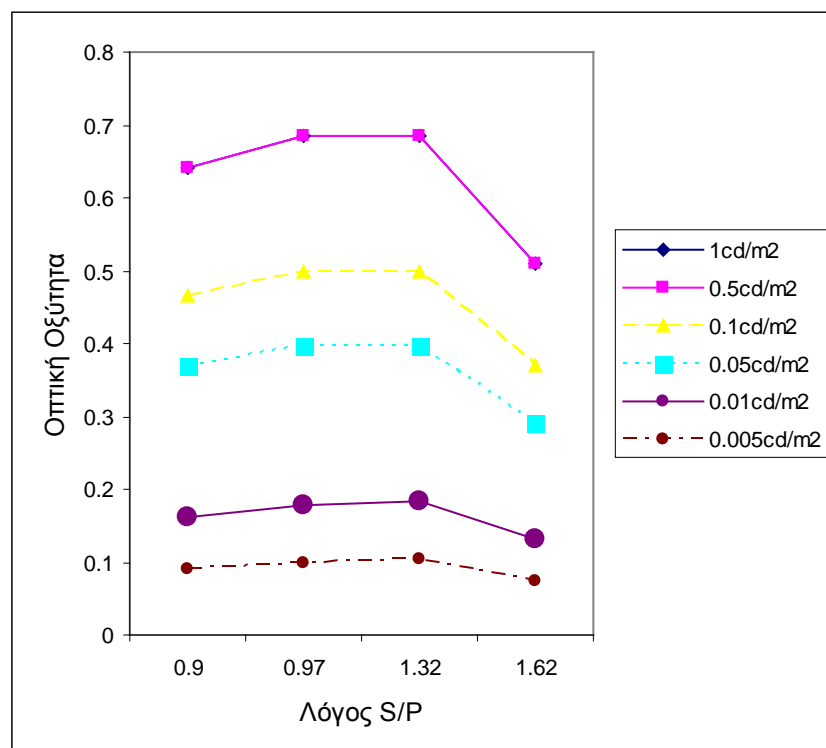
| ΛΑΜΠΤΗΡΑΣ | ΑΤΜΩΝ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ | ΠΥΡΑΚΤΩΣΗΣ | ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ | ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΛΟΓΟΝΙΔΙΩΝ |
|--|------------------------------|------------|-----------|---------------------------|
| ΛΟΓΟΣ S/P | 0.9 | 0.97 | 1.32 | 1.62 |
| ΛΑΜΠΡΟΤΗΤΑ ΦΩΤΟΠΙΚΗ cd/m ² | ΟΠΤΙΚΗ ΟΞΥΤΗΤΑ (ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ) | | | |
| 1 | 0.64 | 0.68 | 0.68 | 0.51 |
| 0.5 | 0.64 | 0.68 | 0.68 | 0.51 |
| 0.1 | 0.47 | 0.50 | 0.50 | 0.37 |
| 0.05 | 0.37 | 0.40 | 0.40 | 0.29 |
| 0.01 | 0.16 | 0.18 | 0.18 | 0.13 |
| 0.005 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.07 |

Πίνακας 6.7 Σχετική οπτική οξύτητα με λαμπτήρα αναφοράς το λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων

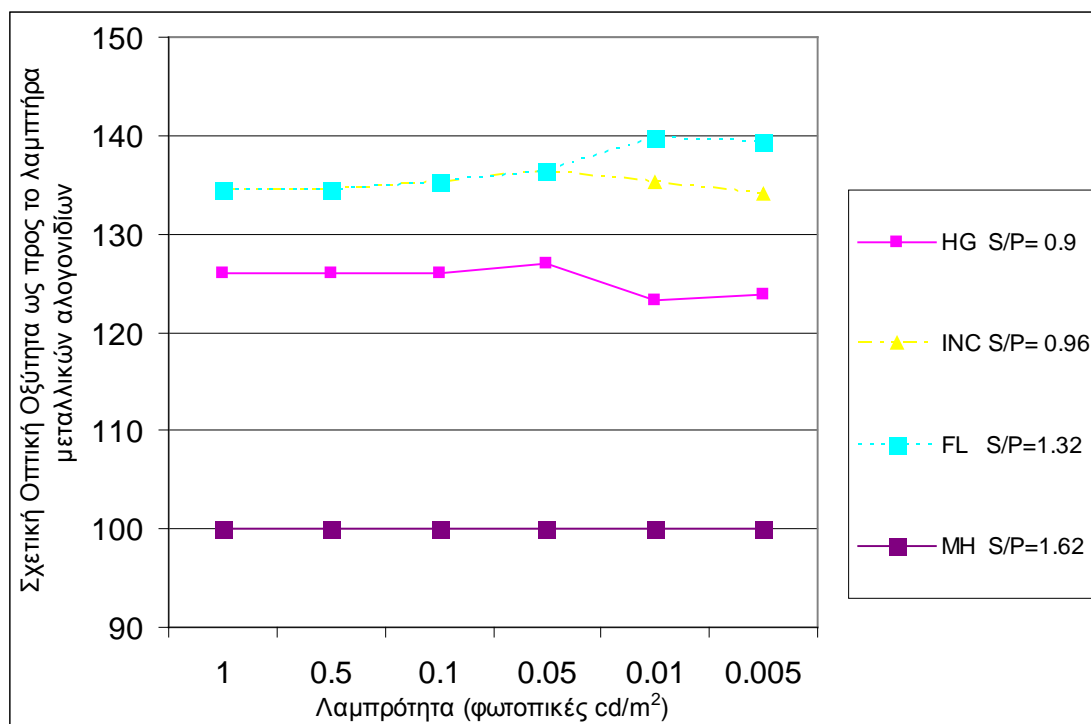
| ΛΑΜΠΤΗΡΑΣ | ΑΤΜΩΝ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ | ΠΥΡΑΚΤΩΣΗΣ | ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ | ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΑΛΟΓΟΝΙΔΙΩΝ |
|--|------------------------------|------------|-----------|---------------------------|
| ΛΟΓΟΣ S/P | 0.9 | 0.97 | 1.32 | 1.62 |
| ΛΑΜΠΡΟΤΗΤΑ ΦΩΤΟΠΙΚΗ cd/m ² | ΟΠΤΙΚΗ ΟΞΥΤΗΤΑ (ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ) | | | |
| 1 | 126 | 133 | 133 | 100 |
| 0.5 | 126 | 133 | 133 | 100 |
| 0.1 | 127 | 136 | 137 | 100 |
| 0.05 | 131 | 135 | 140 | 100 |
| 0.01 | 117 | 132 | 135 | 100 |
| 0.005 | 126 | 130 | 135 | 100 |



Σχήμα 6.4 Οπτική οξύτητα συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας



Σχήμα 6.5 Οπτική οξύτητα συναρτήσει του λόγου S/P



Σχήμα 6.6 Σχετική οπτική οξύτητα με λαμπτήρα αναφοράς το λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων

6.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Η πρώτη εμφανής παρατήρηση που προκύπτει από το σχήμα 6.4 είναι ότι υπάρχει σαφής εξάρτηση ανάμεσα στη φασματική κατανομή του λαμπτήρα που χρησιμοποιείται για φωτισμό και της οπτικής οξύτητας. Η οπτική οξύτητα επηρεάζεται από τη λαμπρότητα του στόχο ν την οποία αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής. Έτσι λοιπόν θα πρέπει να δεχθούμε ότι η λαμπρότητα ρ ν αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής δεν είναι η μετρούμενη φωτοπική, γιατί έτσι η διακριτική ικανότητα του θα ήταν ανεξάρτητη από τη φωτίζουσα ακτινοβολία αφού σε κάθε περίπτωση είχαμε την ίδια φωτοπική λαμπρότητα. Μια τέτοια παραδοχή όμως οδηγεί στο ότι ακόμα και στη κεντρική όραση για φωτοπικές λαμπρότητες μικρότερες των 10cd/m^2 η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας στην οποία προσαρμόζεται ο οφθαλμός του παρατηρητή δεν είναι η φωτοπική. Είναι αξιοσημείωτο ότι παρόμοια πειράματα [87] έχουν δώσει ανάλογα αποτελέσματα.

Η αλλαγή της καμπύλης φασματικής ευαισθησίας μας αναγκάζει να δεχθούμε ότι και στη κεντρική όραση υπάρχει κάτι αντίστοιχο της μεσοπικής όρασης. Λέμε αντίστοιχο γιατί η μεσοπική όραση, για μεγάλα ανοίγματα οπτικού πεδίου, οφείλεται

στο ότι στην όραση συνεισφέρουν και τα ραβδία. Αυτό στη κεντρική όραση δεν είναι δυνατό δεδομένου ότι στην ωχρά κηλίδα δε υπάρχουν ραβδία. Αυτό το είδος της όρασης το ονομάζουμε κεντρική μεσοπική όραση. Η εξήγηση της αναγκαστικά γίνεται με τη παραδοχή ότι η συνεισφορά των τριών ειδών κωνίων δεν παραμένει ίδια όταν η λαμπρότητα είναι φωτοπική και όταν είναι μικρότερη από αυτήν.

Από τα σχήματα 6.5 και 6.6 παρατηρείται ότι τη χειρότερη οπτική οξύτητα τη παρουσιάζει ο λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων, ο οποίος όμως έχει το καλύτερο λόγο S/P, 1.62. Επίσης παρατηρούμε ότι για διαφορετικούς λόγους S/P μετράται παρόμοια οπτική οξύτητα. Για παράδειγμα, στη περίπτωση του λαμπτήρα πυράκτωσης και του λαμπτήρα φθορισμού, με λόγους S/P 0.97 και 1.32 αντίστοιχα, έχουν την ίδια σχεδόν οπτική οξύτητα με εξαίρεση τις λαμπρότητες 0.01 και 0.005 cd/m². Έτσι λοιπόν τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι ο λόγος S/P δεν αποτελεί ικανό κριτήριο προσδιορισμού της συμπεριφοράς μιας φασματικής κατανομής στη μεσοπική περιοχή. Με άλλα λόγια ο λόγος αυτός δε μπορεί να περιγράψει τη διαφοροποίηση της σχετικής συνεισφοράς των κωνίων σε σχέση με τα επίπεδα φωτοπικής λαμπρότητας. Πρέπει να αναφερθεί ότι η διαφορά στην οπτική οξύτητα ανάμεσα στους λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου σε άλλα πειράματα [87] ευρίσκεται 20% για επίπεδο φωτοπικής λαμπρότητας 0.4 cd/m².

6.6 Συμπεράσματα

Το τελικό συμπέρασμα που συνάγεται από τα προηγούμενα, είναι βασικό και με δραστικές επιπτώσεις στη μελέτη της μεσοπικής όρασης. Εκ των αποτελεσμάτων του πειράματος, που βρίσκονται σε συμφωνία με παρόμοια πειράματα στη βιβλιογραφία, αναγκαζόμαστε να δεχθούμε ότι στη κεντρική όραση υπάρχει ένα είδος μεσοπικής όρασης, η κεντρική μεσοπική όραση. Αυτή οφείλεται στη διαφοροποίηση της σχετικής συνεισφοράς των τριών ειδών κωνίων ανάλογα με τη λαμπρότητα την οποία αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής. Εάν αυτό συμβαίνει για τα κωνία της ωχράς κηλίδας είναι αυτονόητο ότι θα συμβαίνει και για όλα τα κωνία που βρίσκονται στον αμφιβληστροειδή. Δηλαδή η φωτοπική καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας δε περιγράφει με ακρίβεια τη συμπεριφορά των κωνίων του ανθρωπίνου οφθαλμού σε μεσοπικές συνθήκες. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ο λόγος S/P δεν περιγράφει τη συμπεριφορά μιας φασματικής κατανομής στη μεσοπική περιοχή καθιστά τα γραμμικά μοντέλα ακατάλληλα για τη περιγραφή της μεσοπικής όρασης.

για μεγάλο οπτικό άνοιγμα. Αυτό γιατί όπως είδαμε τα γραμμικά μοντέλα εκφράζουν τη μεσοπική λαμπρότητα συναρτήσει της φωτοπικής και του λόγου S/P.

Η διαφοροποίηση της δράσης των κωνίων μπορεί να αποδοθεί στις διαφορετικές τους ιδιότητες. Ειδικότερα σημαντικό ρόλο σε αυτή διαδραματίζει η αλλαγή της δράσης των S-κωνίων. Η δράση αυτών των κωνίων στη μεσοπική περιοχή ελαχιστοποιείται, οπότε η κεντρική όραση στη μεσοπική περιοχή οφείλεται στα L και M κωνία [88]. Αυτός πρέπει να είναι και ο λόγος που φωτεινές πηγές με μεγάλο λόγο S/P, δηλαδή πηγές πλούσιες σε μικρά μήκη κύματος έχουν άσχημη απόδοση στη κεντρική μεσοπική όραση. Επιπλέον ο αριθμός των L-κωνίων είναι διπλάσιος των M [89]. Είναι γνωστό ότι στο ερυθρό άκρο του φάσματος μόνο τα L-κωνία είναι ενεργά. Οπότε φωτεινές πηγές πλούσιες σε ερυθρές ακτινοβολίες είναι αποδοτικότερες στη κεντρική μεσοπική όραση.

Κεφάλαιο 7: Διαμόρφωση μοντέλου για τη μεσοπική όραση

7.1 Συνθήκες που πρέπει να ικανοποιεί ένα μοντέλο για τη μεσοπική όραση

Από αυτά που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5 συνεπάγεται ότι ένα μοντέλο για τη μεσοπική όραση θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τους παρακάτω παράγοντες:

- I. Θα πρέπει να εκφράζει τη μεσοπική λαμπρότητα σε σχέση με τη μετρούμενη φωτοπική λαμπρότητα. Αυτό αφενός γιατί η φωτοπική λαμπρότητα είναι ένα εύκολα μετρούμενο μέγεθος και αφετέρου υπάρχει η αδυναμία καθορισμού της μεσοπικής λαμπρότητας λόγω του προβλήματος κυκλικότητας που υπάρχει στη μεσοπική περιοχή.
- II. Ένα μοντέλο για τη μεσοπική όραση δε μπορεί να είναι ανεξάρτητο από τη φασματική κατανομή της φωτιζουσας ακτινοβολίας. Αυτό γιατί είναι γνωστό ότι εάν δημιουργήσουμε ίδια λαμπρότητα, με διαφορετικές φασματικές κατανομές στη μεσοπική περιοχή η λαμπρότητα θα είναι διαφορετική. Αυτό έχει επίδραση, όπως αναφέρθηκε, στη λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων για το προσδιορισμό καμπύλων μεσοπικής φασματικής ευαισθησίας. Δηλαδή δε μπορεί ένα μοντέλο να ισχύει αυτούσιο για κάθε φασματική κατανομή. Αντίθετα θα πρέπει σε κάθε φασματική κατανομή να υπάρχει ένα διαφορετικό μοντέλο. Η λογική απαίτηση που τίθεται είναι τα μοντέλα αυτά να έχουν την ίδια μορφή. Δηλαδή να ακολουθούν το ίδιο μαθηματικό τύπο και να διαφοροποιούνται οι συντελεστές ανάλογα με τη υπάρχουσα κατανομή.
- III. Για να είναι εφαρμόσιμο το μοντέλο θα πρέπει οι προτεινόμενες από αυτό μεσοπικές καμπύλες φασματικής ευαισθησίας να είναι συνδυασμός των γνωστών καμπύλων φασματικής ευαισθησίας για τη φωτοπική και τη σκοτοπική όραση. Αυτή η συνθήκη καθιστά το μοντέλο έγκυρο. Είναι γεγονός ότι οι μόνες πειραματικά επικυρωμένες και καθολικώς αποδεκτές καμπύλες φασματικής ευαισθησίας είναι οι καμπύλες της φωτοπικής και σκοτοπικής όρασης.

- IV. Το μοντέλο δεν πρέπει να είναι γραμμικό. Όπως είδαμε τα γραμμικά μοντέλα εκφράζουν τη μεσοπική λαμπρότητα σε σχέση με τη φωτοπική και το λόγο S/P. Δηλαδή κατηγοριοποιούν τις φασματικές κατανομές με βάση τον λόγο S/P. Αυτό όπως δείχθηκε στο κεφάλαιο 6 δεν αποτελεί μια ορθή ταξινόμηση.
- V. Οποσδήποτε υπάρχει η απαίτηση η εφαρμογή του μοντέλου να περιγράφει έστω και προσεγγιστικά το αίσθημα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής. Δηλαδή υπάρχει η απαίτηση με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου να είναι δυνατός ο καθορισμός του βαθμού προσαρμογής του ανθρώπινου οφθαλμού για μια συγκεκριμένη φασματική κατανομή σε συνάρτηση με τα επίπεδα φωτισμού. Εάν αυτό είναι γνωστό τότε μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια η ισοδύναμη λαμπρότητα για όποια άλλη φωτεινή πηγή με δεδομένο βέβαια ότι είναι γνωστή η φασματική της κατανομή. Αυτό δεν είναι προβληματικό γιατί τη σημερινή εποχή οι περισσότερες κατασκευάστριες εταιρείες διαθέτουν στις ιστοσελίδες τους τις φασματικές κατανομές των λαμπτήρων που κατασκευάζουν για τη περιοχή του ορατού φάσματος.
- VI. Ο βαθμός προσαρμογής του ανθρώπινου οφθαλμού να περιγράφεται συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας, συνοδευμένη από το είδος της φωτίζουσας ακτινοβολίας Κάτι τέτοιο καθιστά ένα μοντέλο ιδιαίτερα εύχρηστο. Είναι γεγονός ότι σχεδόν όλα τα όργανα που χρησιμοποιούνται στη φωτομετρία και διενεργούμενες μετρήσεις γίνονται με βάση τη φωτοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας. Με άλλα λόγια η φωτοπική λαμπρότητα είναι εύκολα μετρούμενη και δεν χρειάζονται ειδικά όργανα ή η προσαρμογή των ήδη υπαρχόντων με κατάλληλα φίλτρα. Η γνώση όμως της φωτοπικής λαμπρότητας από μόνη της δεν δίνει αρκετή πληροφορία για τη κατάσταση προσαρμογής του ανθρώπινου οφθαλμού. Όπως έχουμε περιγράψει αποκτά νόημα μόνο αν γνωρίζουμε τη φασματική κατανομή της φωτίζουσας ακτινοβολίας.

7.2 Η μορφή του μοντέλου της μεσοπικής όρασης.

Αποκλείοντας τα γραμμικά μοντέλα δε σημαίνει ότι πρέπει να υποτιμηθεί ο ρόλος της φωτοπικής καμπύλης ιδιαίτερα στην υψηλή μεσοπική περιοχή. Προτείνεται λοιπόν ένα μοντέλο το οποίο παρουσιάζει τις μεσοπικές καμπύλες σαν γραμμικό συνδυασμό της φωτοπικής καμπύλης αφενός και ενός όρου που δημιουργείται από το γινόμενο της φωτοπικής καμπύλης υψωμένης σε μια παράμετρο y επί τη σκοτοπική καμπύλη υψωμένης στην παράμετρο $(1-y)$, δηλαδή:

$$V''(\lambda) = x \cdot V(\lambda) + (1-x) \cdot V^y(\lambda) \cdot V^{(1-y)}(\lambda) \quad 7.2.1$$

Πλεονεκτήματα αυτού του μοντέλου μπορεί να θεωρηθούν τα εξής:

Κατ' αρχή δεν είναι γραμμικό, οπότε διαφορετικές φασματικές κατανομές οι οποίες όμως έχουν τον ίδιο λόγο σκοτοπικής προς φωτοπική λαμπρότητα θα χαρακτηρίζονται από διαφορετικά τιμές των παραμέτρων x και y .

Από τις εργασίες άλλων ερευνητών έχει βρεθεί ότι η κατάσταση προσαρμογής του ανθρώπινου οφθαλμού για τιμές λαμπρότητας μεγαλύτερες από τις 5cd/m^2 προσεγγίζει αρκετά την φωτοπική προσαρμογή. Έτσι στην ανώτερη μεσοπική περιοχή περιμένουμε ότι η φωτοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας θα έχει μεγαλύτερο βάρος. Αυτό εξασφαλίζεται από το μοντέλο αυτό.

Από την άλλη μεριά για μικρές τιμές των x , y η ανθρώπινη όραση καθορίζεται κυρίως από τη σκοτοπική καμπύλη.

Η μεσοπική λαμπρότητα θα δίνεται από τη σχέση:

$$L'' = K''_{\max} \int_{360}^{780} L_e(\lambda) \cdot V''(\lambda, L) \cdot d\lambda \quad 7.2.2$$

Θα πρέπει να υπολογισθεί η τιμή της K''_{\max} , αυτό μπορεί να γίνει από την εξίσωση:

$$K''_{\max} \cdot V''(555) = K_{\max} \cdot V(555) = K'_{\max} \cdot V'(555) = 683 \text{lm/W} \quad 7.2.3$$

Η αντικατάσταση της 7.2.1 στην 7.2.3 μπορεί να δώσει τη τιμή της K''_{\max} για την συγκεκριμένη κατανομή και επίπεδο φωτισμού ωστόσο εισάγει ένα επιπλέον στοιχείο πολυπλοκότητας που είναι δυνατόν να αποφευχθεί.

Οι καμπύλες $V(\lambda)$ και $V'(\lambda)$ δεν είναι τίποτα παραπάνω από τις κανονικοποιημένες καμπύλες φασματικής ευαισθησίας για τη φωτοπική και σκοτοπική όραση, δεν προσφέρουν κάτι παραπάνω στη θεωρία της φωτομετρίας. Η εισαγωγή τους απλά κάνει δυνατή τη κατασκευή φίλτρων με συντελεστή διαπερατότητας όμοιο με των καμπύλων $V(\lambda)$ και $V'(\lambda)$ και ως εκ τούτου την εύκολη μέτρηση των φωτομετρικών μεγεθών. Το προτεινόμενο μοντέλο όμως δεν αποσκοπεί στη κατασκευή τέτοιων φίλτρων ή στην άμεση μέτρηση της μεσοπικής λαμπρότητας. Επομένως η χρήση των καμπύλων σχετικής φασματικής ευαισθησίας δεν είναι απαραίτητη, αντίθετα το κάνουν πολυπλοκότερο.

Η φωτοπική λαμπρότητα μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση 7.2.4

$$L = Km \cdot \int_{380}^{830} V(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda \quad 7.2.4$$

Αυτή η σχέση μπορεί να μετασχηματισθεί ως εξής:

$$\begin{aligned} L &= Km \cdot \int_{380}^{830} V(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda = \\ &= \int_{380}^{830} Km \cdot V(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda = \int_{380}^{830} K(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad 7.2.5$$

Δηλαδή μπορεί στους υπολογισμούς αντί της σχετικής φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού να χρησιμοποιηθεί η φασματική ευαισθησία. Το ίδιο ισχύει και για τη σκοτοπική περιοχή και φυσικά θα πρέπει να ισχύει και για τη μεσοπική περιοχή.

Οπότε το μοντέλο μπορεί να διαφοροποιηθεί και να πάρει τη μορφή

$$K''(\lambda) = x \cdot K(\lambda) + (1-x) \cdot K^y(\lambda) \cdot K'^{(1-y)}(\lambda) \quad 7.2.6$$

Το μοντέλο με τη μορφή 7.2.6 είναι περισσότερο εύχρηστο και οι υπολογισμοί γίνονται γρηγορότερα. Η μεσοπική λαμπρότητα θα δίνεται από τη σχέση

$$L'' = \int_{380}^{830} K''(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda \quad 7.2.7$$

Προφανώς για μήκος κύματος 555nm η τιμή μεσοπικής καμπύλης φασματικής ευαισθησίας που δίνεται από αυτό το μοντέλο είναι 683 lm/W διότι:

$$\begin{aligned}
 K''(555) &= x \cdot K(555) + (1-x) \cdot K^y(555) \cdot K^{(1-y)}(555) = \\
 &= x \cdot 683lm/W + (1-x) \cdot (683lm/W)^y \cdot (683lm/W)^{(1-y)} = & 7.2.8 \\
 &= x \cdot 683lm/W + (1-x) \cdot (683lm/W) = \\
 &= 683lm/W
 \end{aligned}$$

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων x και y μπορεί να γίνει πειραματικά. Η ιδέα επί της οποίας βασίζεται ο σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης για την εύρεση των παραμέτρων είναι η εξής:

Έστω ότι μπορούμε να υπολογίσουμε τις ισοδύναμες λαμπρότητες ανάμεσα σε μια φασματική κατανομή, έστω A, και δύο άλλων φασματικών κατανομών B και Γ. Αυτό σημαίνει ότι η εξίσωση 7.2.7 θα δίνει την ίδια λαμπρότητα για τις πηγές A,B και Γ. Επομένως με τη μέθοδο των επαναλήψεων είναι δυνατόν να βρεθούν οι τιμές των παραμέτρων x και y, οι οποίες αν αντικαθιστούν στην 7.2.6 θα δώσουν τέτοια μεσοπική καμπύλη ώστε η 7.2.7 να δίνει τις ίδιες τιμές και για τις τρεις φασματικές κατανομές. Βέβαια αυτό από μό του δε αποτελεί λύση. Αν για παράδειγμα ταυτίσουμε τις λαμπρότητες των A και B σε σκοτεινό υπόβαθρο τότε ο ανθρώπινος οφθαλμός προσαρμόζεται στη συνδυασμένη φασματική κατανομή των A και B και η ταύτιση αυτή, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 5, δεν δίνει επαρκείς και χρήσιμες πληροφορίες για πρακτική εφαρμογή. Έτσι λοιπόν θα πρέπει να προσεχθεί η φασματική κατανομή η οποία δημιουργεί τα επίπεδα λαμπρότητας που προσαρμόζεται ο ανθρώπινος οφθαλμός.

Έτσι λοιπόν δημιουργείται το υπόβαθρο της επιθυμητής λαμπρότητας από το λαμπτήρα τύπου A και γίνονται οι ταυτίσεις λαμπρότητας με τις πηγές B και Γ. Ακολούθως επαναλαμβάνεται η διαδικασία άλλες δύο φορές τη μία με τον λαμπτήρα B να δημιουργεί το υπόβαθρο και να βρίσκονται οι ισοδύναμες λαμπρότητες A και Γ και την άλλη με το ν λαμπτήρα Γ να δημιουργεί το υπόβαθρο και να βρίσκονται οι ισοδύναμες λαμπρότητες A και B. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να βρούμε τις τιμές των παραμέτρων x και y, δηλαδή τις μεσοπικές καμπύλες που προσαρμόζεται ο ανθρώπινος οφθαλμός για κάθε μια φασματική κατανομή.

Θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η επίδραση της ακτινοβολίας των στόχων στην λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής, για αυτό θα πρέπει οι στόχοι να ναι

μικρών διαστάσεων ώστε η συνεισφορά της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από αυτούς να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

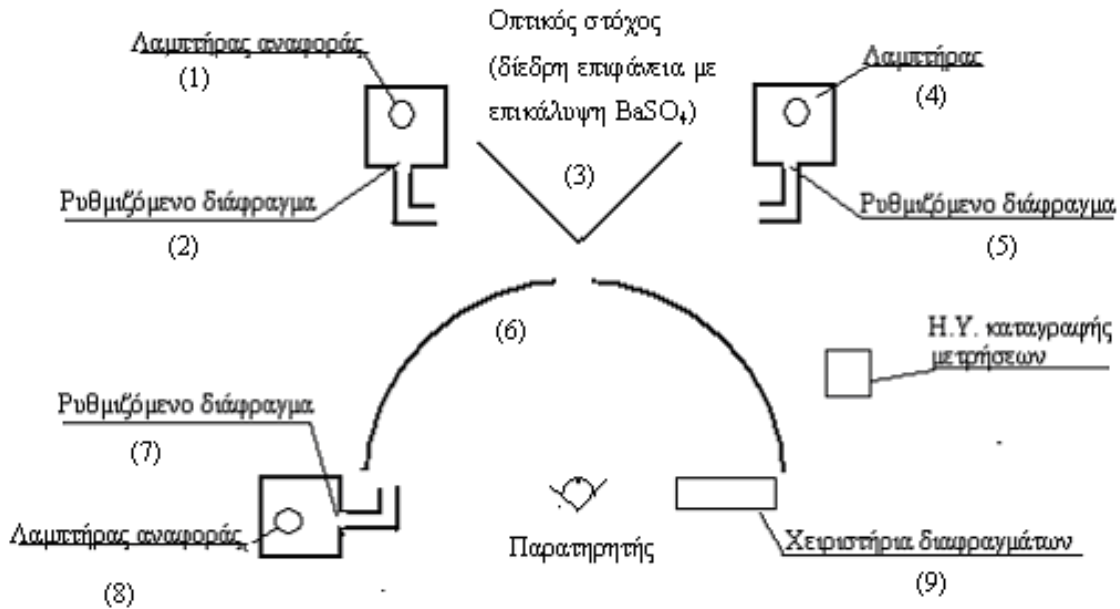
Σημαντικό επίσης είναι η επιλογή του κριτηρίου τάντισης. Επιλέχτηκε καθαρά οπτικό κριτήριο, για λόγους που έχο ν αναφερθεί, το κριτήριο του ελάχιστο υ διαχωριστικού ορίου. Ο λόγος είναι ότι τα αποτελέσματα του ακολουθούν τους κανόνες του Abney.

Στη παράγραφο 7.3 περιγράφεται πλήρως η πειραματική διάταξη και πειραματική διαδικασία ενώ στη παράγραφο 7.4 γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων.

7.3 Πειραματική διάταξη

7.3.1 Περιγραφή

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων κατασκευάστηκε στο εργαστήριο φωτοτεχνίας κατάλληλη πειραματική διάταξη (σχήμα 7.3.1).



Σχήμα 7.3.1 Πειραματική διάταξη

Η διάταξη αποτελείται από τα εξής μέρη:

Υπόβαθρο: αυτό δημιουργείται από ένα ημισφαιριο σφαίρας Ulbricht (6) διαμέτρου 1m, το οποίο φωτίζεται με ειδικό σύστημα διάχυσης φωτός, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή ομοιομορφία. Στο κέντρο του ημισφαιρίου υπάρχει οπή από την οποία είναι ορατός ο οπτικός στόχος.

Οπτικός στόχος: Αυτός αποτελείται από μια διεδρη επιφάνεια με επικάλυψη BaSO₄, που παρέχει συντελεστή διαχέουσας ανάκλασης 0,95 ώστε να εξασφαλίζεται διάχυτος φωτισμός. Οι πλευρές του οπτικού στόχου φωτίζονται από τις υπό εξέταση ακτινοβολίες, δημιουργώντας τα δύο οπτικά πεδία που ο παρατηρητής ταυτίζει. Η ακμή της διέδρης

γωνίας δημιουργεί το διαχωριστικό όριο όπως φαίνεται στο σχήμα 7.3.2. Η διέδρη επιφάνεια είναι τοποθετημένη με τέτοιο τρόπο, ώστε κάθε επιφάνεια να φωτίζεται από μία μόνο φωτεινή πηγή. Ταυτόχρονα λειτουργεί ως διάφραγμα, το οποίο εμποδίζει την ανάμειξη των ακτινοβολιών των δύο φωτεινών πηγών.

Η θέση του οπτικού στόχου καθορίζεται έτσι ώστε οι ανακλώμενες από αυτόν οπτικές ακτίνες να είναι αδύνατον να φωτίσουν το εσωτερικό της σφαίρας. Κατ' αυτό τον τρόπο δεν αλλάζει ο φωτισμός υποβάθρου και πολύ περισσότερο η φασματική κατανομή αυτού.

Φωτιστικά σώματα: Ο φωτισμός υποβάθρου και στόχου γίνεται με τους επιλεγμένους λαμπτήρες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε φωτοστεγή δοχεία. Το εσωτερικό των δοχείων είναι επιχρισμένο με BaSO_4 , στις εσωτερικές επιφάνειες.

Οδήγηση της ακτινοβολίας: Το φως οδηγείται στον οπτικό στόχο με φωτοσωλήνες σχήματος Γ, οι οποίοι εσωτερικά, είναι επίσης επιχρισμένοι με BaSO_4 . Αυτοί προσαρμύζονται σε κατάλληλη οπή του φωτοδοχείου. Οι εξωτερικές επιφάνειες είναι χρωματισμένες με μαύρο χρώμα, συντέλεση ανάκλασης 0,08, ώστε να εμποδίζεται ο παράσιτος φωτισμός.

Ρύθμιση φωτισμού: Ένα αδιαφανές διάφραγμα (2,5,6) είναι τοποθετημένο στο εσωτερικό του φωτοδοχείου μπροστά από την οπή στην οποία συνδέονται οι φωτοσωλήνες. Το διάφραγμα μπορεί να περιστραφεί μεταβαλλόντας έτσι τη ποσότητα φωτός που εισέρχεται στον φωτοσωλήνα.

Έλεγχος κίνησης διαφραγμάτων: Η περιστροφή των διαφραγμάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση βηματικών κινητήρων (9). Οι κινητήρες οδηγούνται με κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα. Η κίνηση του διαφράγματος είναι δυνατή και κατά τις δύο φορές περιστροφής. Η τροφοδοσία των κινητήρων και του ηλεκτρονικού κυκλώματος γίνεται φυσικά από τροφοδοτικό συνεχούς τάσης.

Οδήγηση λαμπτήρων: οι λαμπτήρες οδηγούνται από τα αντίστοιχα μπάλαστ τροφοδοτούμενα από τροφοδοτικό εναλλασσόμενου ρεύματος.

Θέση παρατήρησης: Στο κέντρο της σφαίρας είναι κατάλληλα τοποθετημένη μάσκα στην οποία προσαρμόζει το κεφάλι του ο παρατηρητής, έτσι ώστε η θέση του οφθαλμού του να είναι καθορισμένη και η ίδια κάθε φορά. Η μάσκα είναι δυνατόν να περιστραφεί ώστε να επιτρέπει τη παρατήρηση του στόχου είτε κεντρικά είτε σχηματίζοντας την επιθυμητή γωνία με τον οπτικό άξονα. Η εικόνα την οποία αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής είναι αυτή του σχήματος 7.3.2.



Σχήμα 7.3.2 Εικόνα του οπτικού στόχου, την οποία αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής.

Παράσιτος φωτισμός: Η ελεύθερη επιφάνεια του ημισφαιρίου στη οποία τοποθετείται ο παρατηρητής τοποθετείται εντός ορθογωνίου κατασκευής επί της οποίας τοποθετούνται πετάσματα τα οποία εμποδίζουν τον παράσιτο φωτισμό στο χώρο παρατήρησης. Με δεδομένο μάλιστα ότι το πείραμα έγινε στο χώρο του εργαστηρίου φωτοτεχνίας όπου οι τοίχοι είναι επιχρισμένοι με μαύρο χρώμα, ο παράσιτος φωτισμός μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος.

7.3.2 Χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης

Στη κατασκευή της διάταξης ελήφθη σοβαρά υπόψη η σταθερότητα της φασματικής κατανομής στην οποία προσαρμόζεται ο οφθαλμός του παρατηρητή. Το μέγεθος του στόχου είναι πολύ μικρό σε σχέση με το δημιουργημένο υπόβαθρο. Αυτό

έχει ως αποτέλεσμα η συνεισφορά της ακτινοβολίας του στόχου να είναι πολύ μικρή, σχεδόν αμελητέα, στην λαμπρότητα στην οποία προσαρμόζεται ο παρατηρητής. Δηλαδή, εξασφαλίζεται ότι ο παρατηρητής προσαρμόζεται σε μια συγκεκριμένη λαμπρότητα που δημιουργείται από μια μόνο συγκεκριμένη και γνωστή κατανομή.

Σύμφωνα με αυτό τον τρόπο σκέψης για την μεταβολή του φωτισμού του υποβάθρου και των στόχων δεν επελέγη το dimming των λαμπτήρων, κάτι τέτοιο είναι γνωστό ότι αλλάζει τη φασματική κατανομή της πηγής, όχι σε μεγάλο βαθμό αλλά ικανό να αλλάξει τις συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος. Για τον ίδιο λόγο απορρίφθηκε και η χρήση φίλτρων. Είναι γνωστό ότι τα ουδέτερα φίλτρα δεν είναι εντελώς ουδέτερα αφενός και αφετέρου λόγω της χρησιμοποίησης λαμπτήρων μεγάλης φωτεινής ισχύος που χρησιμοποιούνται στο φωτισμό δρόμων ο περιορισμός της φωτεινής ροής σε χαμηλά επίπεδα θα ήταν δύσκολος.

Αν αυτών των μεθόδων προτιμήθηκε η χρήση περιστρεφόμενων διαφραγμάτων. Με αυτά η όποια μεταβολή φωτεινής ροής αφήνει ανεπηρέαστη τη φασματική κατανομή. Παράλληλα το εύρος μεταβολής εκτείνεται από τη μέγιστη τιμή (διάφραγμα πλήρως ανοικτό) μέχρι τιμές που είναι κοντά στο μηδέν. Αυτό οφείλεται στο ότι το διάφραγμα δεν εφάπτεται του φωτοδοχείου με αποτέλεσμα μια πολύ μικρή ποσότητα φωτός να εξέρχεται από το φωτοσωλήνα. Πρέπει να σημειωθεί ότι με τη χρήση των βηματικών κινητήρων οι μεταβολές επιτυγχάνονται πολύ εύκολα. Επίσης φράσσοντας τους φωτοσωλήνες στο ανοικτό άκρο επιτυγχάνεται πλήρης αποκλεισμός του φωτός εντός του φωτοδοχείου. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο κατά τη μετρητική διαδικασία.

Το δεύτερο χαρακτηριστικό της πειραματικής διάταξης είναι η χρήση της μεθόδου της ελαχιστοποίησης του διαχωριστικού ορίου (minimum distinct border). Η επιλογή αυτή έγινε με το δεδομένο ότι τουλάχιστον σε φωτοπικά επίπεδα αυτή είναι μια προσθετική μέθοδος. Σε αυτήν ο παρατηρητής δεν επηρεάζεται από τον χρωματισμό των ερεθισμάτων, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο γιατί οι χρησιμοποιούμενοι λαμπτήρες παράγουν φως έντονα χρωματισμένο (HPS).

Τέλος ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην ομοιομορφία. Ο φωτισμός των στόχων και του υποβάθρου μέσω φωτοσωλήνων σχήματος Γ, αποτρέπει τον κατευθείαν φωτισμό από το λαμπτήρα. Ο φωτισμός γίνεται με διάχυτη ακτινοβολία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ομοιομορφία.

7.3.3 Όργανα μέτρησης

Οι μετρήσεις έγιναν με την βοήθεια ενός ραδιομέτρου- φωτομέτρου International Light IL-1700. Τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν στον αισθητήρα ήταν το φωτοπικό, το σκοτοπικό και σποτ-λαμπρόμετρο. Επίσης για τη μέτρηση λαμπρότητας χρησιμοποιήθηκε λαμπρόμετρο ευρέως πεδίου

Τα φάσματα των λαμπτήρων λήφθηκαν με το φασματοφωτόμετρο OCEAN OPTICS HR2000 με φράγμα περίθλασης

Τέλος συγκριτικές μετρήσεις έγιναν με σφαίρα Ulbricht διαμέτρου 50cm.

7.3.4 Φωτεινές πηγές

Στη πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν οι εξείς φωτεινές πηγές: νατρίου υψηλής πίεσης, μεταλλικών αλογονιδίων και τέλος ατμών υδραργύρου. Τέλος για τη παραγωγή μονοχρωματικών ακτινοβολιών χρησιμοποιήθηκαν λαμπτήρας τόξου Xenon 500W με το αντίστοιχο τροφοδοτικό σταθερής έντασης ρεύματος και λαμπτήρας πυράκτωσης 500W που τροφοδοτείται από τροφοδοτικό σταθερής τάσης

Στο πίνακα 6.1 αναγράφονται οι χρησιμοποιηθέντες λαμπτήρες καθώς και η χρήση τους

Πίνακας 7.3.1 Τύποι λαμπτήρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση του πειράματος

| Τύπος λαμπτήρα | Ισχύς (W) | Χρήση |
|------------------------|-----------|-------------------------|
| Νατρίου Υψηλής Πίεσης | 400 | Φωτισμός υποβάθρου |
| Νατρίου Υψηλής Πίεσης | 250 | Φωτισμός οπτικών στόχων |
| Ατμών Υδραργύρου | 400 | Φωτισμός υποβάθρου |
| Ατμών Υδραργύρου | 125 | Φωτισμός οπτικών στόχων |
| Μεταλλικών Αλογονιδίων | 400 | Φωτισμός υποβάθρου |
| Μεταλλικών Αλογονιδίων | 250 | Φωτισμός οπτικών στόχων |

7.3.5 Οπτικά φίλτρα

Για τη παραγωγή μονοχρωματικών ακτινοβολιών χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα με φασματικό εύρος 10nm, της ORIEL . Τα μήκη κύματος κορυφής ήταν στα 440, 500, 540, 560nm

7.3.6 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Η κοίλη επιφάνεια της σφαίρας Ulbricht, φωτίζεται με την ακτινοβολία αναφοράς, από την οπή εξόδου ακτινοβολίας των φωτοστεγών δοχείων και δημιουργεί το υπόβαθρο.

Η λαμπρότητα υποβάθρου ρυθμίζεται στο επιθυμητό επίπεδο στρέφοντας το κινητό διάφραγμα του φωτοδοχείου έτσι ώστε η ποσότητα της εξερχόμενης ροής να είναι η απαιτούμενη.

Η μέτρηση της φωτοπικής λαμπρότητας γίνεται με χρήση λαμπρομέτρου. Μετράται η μέση λαμπρότητα του οπτικού πεδίου του παρατηρητή. Στη διαδικασία η ομοιομορφία του υποβάθρου είχε μια απόκλιση της τάξης 10%.

Στη συνέχεια η μία επιφάνεια του οπτικού στόχου φωτίζεται από την ακτινοβολία αναφοράς και η άλλη από την υπό έλεγχο ακτινοβολία. Η λαμπρότητα της επιφάνειας που φωτίζεται από την ακτινοβολία αναφοράς ρυθμίζεται στην ίδια τιμή με την λαμπρότητα υποβάθρου. Αυτό γίνεται μεταβάλλοντας την θέση του διαφράγματος του φωτοστεγούς δοχείου.

Ο παρατηρητής παραμένει σε σκοτεινό χώρο για χρό ≈ 1 30min, προσαρμόζοντας την όραση του στο σκοτάδι. Ο χρόνος παραμονής του στο σκοτεινό χώρο εξαρτάται από τα επίπεδα λαμπρότητας που θα ελεγχθούν. Ακολούθως τοποθετώντας τον οφθαλμό του στην κατάλληλη θέση της μάσκας, μεταβάλλει μέσω του βηματικού κινητήρα την θέση του διαφράγματος του φωτοδοχείου που περιέχει την υπό εξέταση πηγή μέχρις ότου επέλθει οπτική ταύτιση του διμερούς πεδίου.

Ακολούθως εκτελούνται οι φωτομετρικές μετρήσεις. Αρχικά είχε προγραμματιστεί να μετρηθούν η φωτοπική και η σκοτοπική λαμπρότητα στόχων και υποβάθρου και η ακτινοβολία των στόχων. Από δοκιμαστικές μετρήσεις όμως προέκυψε ότι οι μετρήσεις που έγιναν στους στόχους είχαν τιμές μικρές με αποτέλεσμα το σφάλμα

του οργάνου να είναι σημαντικό. Έτσι αποφασίστηκε να μετρηθεί μόνο η ακτινοβολία των στόχων. Αυτό γιατί κατά τη μέτρηση φωτοπικής ή σκοτοπικής λαμπρότητας το χρησιμοποιούμενο φωτοπικό ή σκοτοπικό φίλτρο απορροφά σημαντικό μέρος της ακτινοβολίας. Αφαιρώντας το, η ποσότητα ακτινοβολίας που φθάνει στον αισθητήρα είναι πολύ περισσότερη με αποτέλεσμα το σφάλμα του οργάνου να μην είναι υπολογίσιμο.

Η μέτρηση της ακτινοβολίας των στόχων γίνεται ως εξής: Κλείνονται οι φωτοσωλήνες με κατάλληλα διαφράγματα και μετράται ο παράσιτος φωτισμός. Ακολούθως ανοίγεται ο ένας φωτοσωλήνας και μετράται η ακτινοβολία του ενός στόχου. Αυτό γίνεται τοποθετώντας τον αισθητήρα στην προσωπίδα στην ίδια θέση από όπου ο παρατηρητής κάνει την ταύτιση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τον δεύτερο στόχο. Εφ' όσον ο παράσιτος φωτισμός δεν είναι αμελητέος σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Αυτό μπορεί να συμβεί γιατί αν τα διαφράγματα δεν κλείνουν ικανοποιητικά τους φωτοσωλήνες υπάρχει παράσιτος φωτισμός ο οποίος μάλιστα δεν γίνεται αντιληπτός από τον ανθρώπινο οφθαλμό, ιδιαίτερα σε χαμηλές τιμές λαμπρότητας.

Με αυτό τον τρόπο οι μετρήσεις που λαμβάνονται αντιστοιχούν στις ποσότητες ακτινοβολίας που δέχεται ο παρατηρητής.

7.3.7 Καθορισμός των χαρακτηριστικών των λαμπτήρων που χρησιμοποιήθηκαν

Όπως είδαμε, θα πρέπει για τις φωτεινές πηγές να καθορισθο ψ οι λόγοι ακτινοβολίας, φωτεινής ροής. Αυτό μπορεί να γίνει είτε πειραματικά είτε έμμεσα από τις φασματικές κατανομές των πηγών.

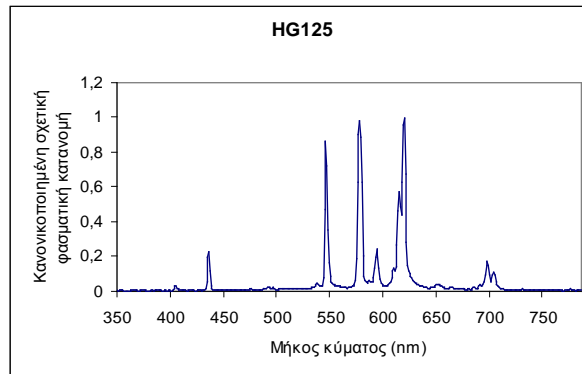
Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής: Στη μια οπή σφαίρας Ulbricht διαμέτρου 50cm προσαρμόζεται ο φωτοσωλήνας του φωτιστικού. Στην άλλη τοποθετείται ο αισθητήρας του λουξομέτρου. Γίνονται τρία είδη μετρήσεων τοποθετώντας στον αισθητήρα το φωτοπικό και το σκοτοπικό φίλτρο. Μετά τις μετρήσεις αυτές λαμβάνεται το φάσμα της φωτεινής πηγής με το φασματοφωτόμετρο. Αυτό λαμβάνεται ως το σχετικό φάσμα προς το φάσμα πρότυπου λαμπτήρα πυράκτωσης θερμοκρασίας χρώματος 3100K ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως φάσμα αναφοράς.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε ένα από τους λαμπτήρες που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα.

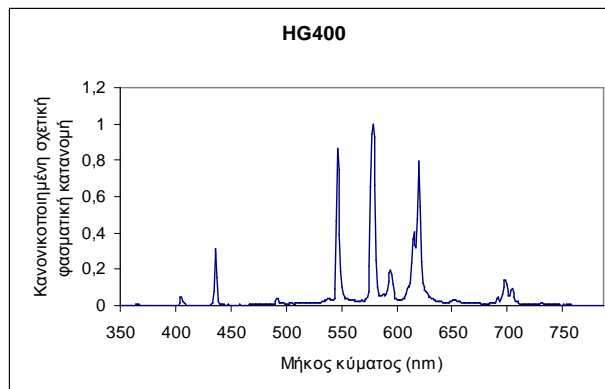
Τα φάσματα που ελήφθησαν συγκρίθηκαν με τα φάσματα των λαμπτήρων που δίνει η κατασκευάστρια εταιρεία. Η σύμπτωση των φασμάτων ήταν ικανοποιητική. Τελικά κρατήθηκαν τα φάσματα που έδωσε το φασματοφωτόμετρο, δεδομένου ότι οι λαμπτήρες είναι λαμπτήρες που κυκλοφορούν στο εμπόριο και είναι δυνατόν να υπάρχουν αποκλίσεις από τα δεδομένα της κατασκευάστριας εταιρείας.

Από τα φάσματα των λαμπτήρων μπορεί να βρεθεί η φωτοπική και η σκοτοπική ροή τους. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας συναρτήσεις σε ένα φύλλο Excel. Έτσι είναι δυνατόν να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Οι πολύ μικρές αποκλίσεις που υπάρχουν όπως φαίνεται από τα δεδομένα των πινάκων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι και οι δύο μετρήσεις μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες.

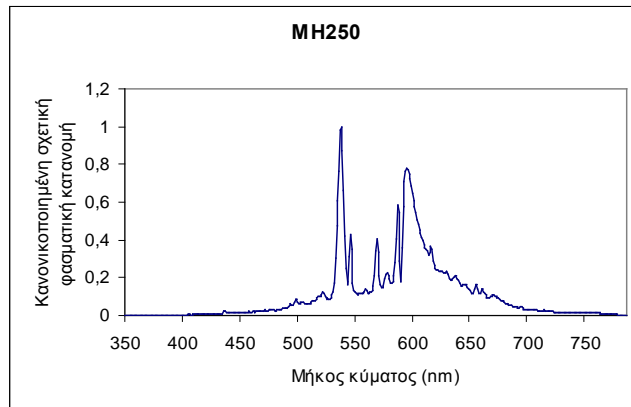
Στα σχήματα 7.3.3 έως 7.3.8 παρουσιάζονται οι φασματικές τους κατανομές.



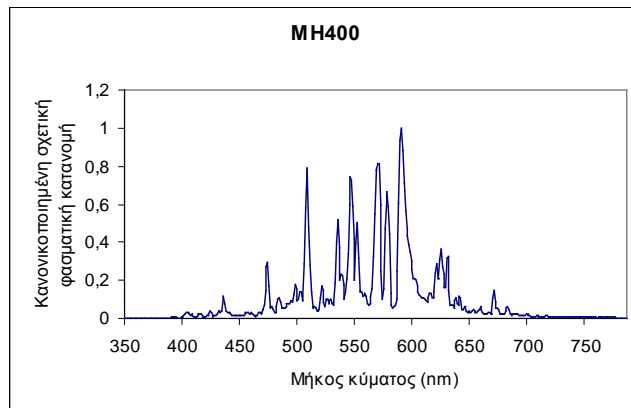
Σχήμα 7.3.3 Κανονικοποιημένη φασματική κατανομή στο ορατό φάσμα για τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου 125W



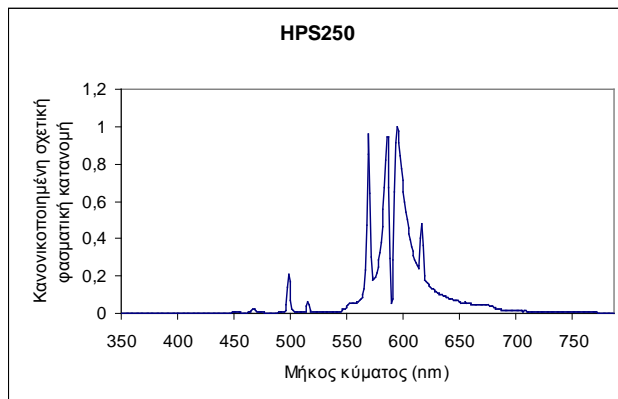
Σχήμα 7.3.4 Κανονικοποιημένη φασματική κατανομή στο ορατό φάσμα για τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου 400W



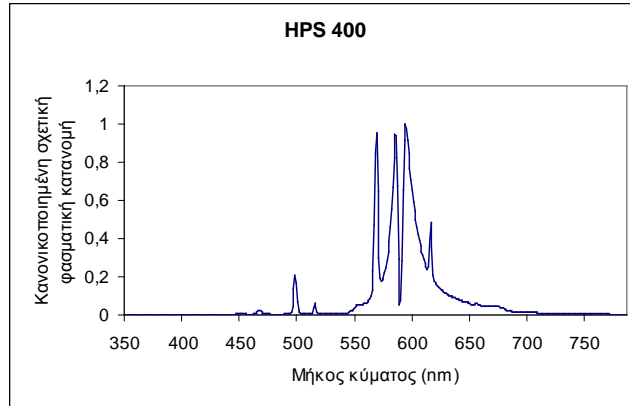
Σχήμα 7.3.5 Κανονικοποιημένη φασματική κατανομή στο ορατό φάσμα για τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων 250W



Σχήμα 7.3.6 Κανονικοποιημένη φασματική κατανομή στο ορατό φάσμα για τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων 400W



Σχήμα 7.3.7 Κανονικοποιημένη φασματική κατανομή στο ορατό φάσμα για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης 250W



Σχήμα 7.3.8 Κανονικοποιημένη φασματική κατανομή στο ορατό φάσμα για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης 4000W

7.4 Έλεγχος της πειραματικής διάταξης

Ο έλεγχος της πειραματικής διάταξης γίνεται εκτελώντας οπτικές ταυτίσεις όταν η τιμή της μέσης λαμπρότητας βρίσκεται στην φωτοπική περιοχή. Εάν τα αποτελέσματα της οπτικής ταύτισης βρίσκονται σε συμφωνία με το τυποποιημένο φωτομετρικό σύστημα τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η διάταξη είναι αξιόπιστη. Χρησιμοποιήθηκε η αναφερθείσα πειραματική διάταξη με ορισμένες αλλαγές που αφορούν το είδος των ακτινοβολιών που χρησιμοποιήθηκαν ως οπτικοί στόχοι και τη θέση του στόχου στο οπτικό πεδίο του παρατηρητή. Η λαμπρότητα υποβάθρου ρυθμίστηκε στην φωτοπική περιοχή, χρησιμοποιώντας λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης 400W, ο οποίος δημιουργούσε το φωτεινό υπόβαθρο. Η λαμπρότητα του υποβάθρου ρυθμίστηκε σε μέση τιμή 15cd/m^2 , ενώ η ομοιομορφία μπορεί να θεωρηθεί πολύ καλή, η μέγιστη τιμή λαμπρότητας ήταν 17cd/m^2 ενώ η ελάχιστη 14cd/m^2 τιμές που παρατηρήθηκαν στις παρυφές του οπτικού πεδίου του παρατηρητή,

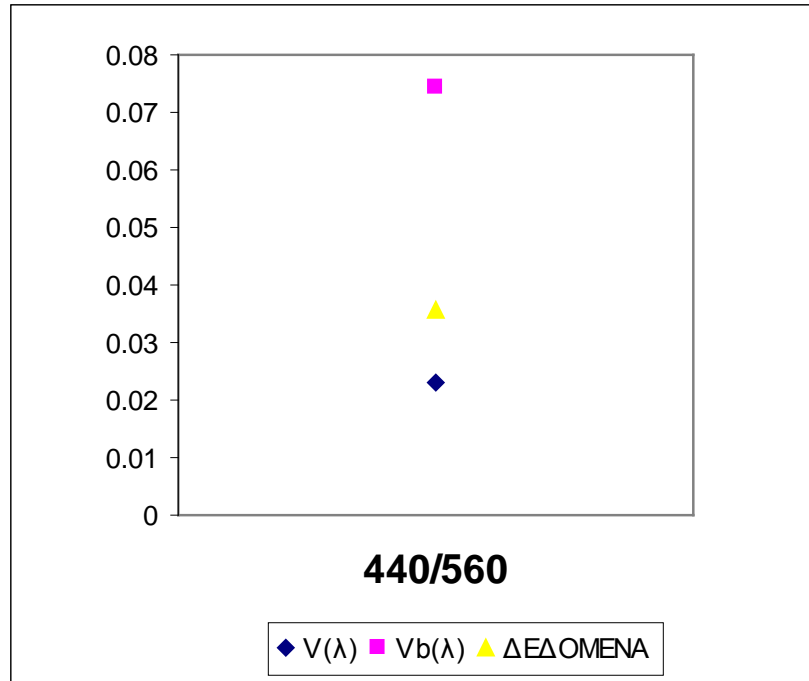
Η μεταβολή στην πειραματική διάταξη συνίσταται στο ότι τα οπτικά ερεθίσματα αποτελούσαν μονοχρωματικές ακτινοβολίες. Αυτές δημιουργούνται με μονοχρωματικά φίλτρα με φασματικό εύρος 1nm , της ORIEL. Ως φωτεινή πηγή αναφοράς χρησιμοποιήθηκε λαμπτήρας τόξου Xenon 500W με το αντίστοιχο τροφοδοτικό σταθερής έντασης ρεύματος η φωτεινή του ροή ρυθμιζόταν στα επιθυμητά επίπεδα μέσω διαφραγμάτων. Η επιλογή αυτού λαμπτήρα ως αναφοράς έγινε λόγω του ισχυρού φάσματος που παρουσιάζει σε μεγάλο εύρος του ορατού φάσματος, ειδικότερα δε στα

μικρά μήκη κύματος. Ως πηγή μεταβαλλόμενου ερεθίσματος χρησιμοποιήθηκε λαμπτήρας πυράκτωσης 500W που τροφοδοτείται από τροφοδοτικό σταθερής τάσης μέσω ποτεσιομετρικής διάταξης, ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση της φωτεινής του ροής. Πρέπει να τονιστεί ότι η ποτεσιομετρική διάταξη μεταβάλλοντας την φωτεινή ροή του λαμπτήρα μεταβάλλει και την φασματική του κατανομή. Στην προκειμένη περίπτωση όμως αυτό δεν έχει επίπτωση στο ερέθισμα που βλέπει ο παρατηρητής γιατί αυτό είναι μονοχρωματικό. Τέλος η μάσκα μέσω της οποίας το υποκείμενο παρατηρεί το στόχο είχε τέτοια θέση ώστε ο στόχος να παρατηρείται κεντρικά, εντός οπτικού γωνιακού ανοίγματος δύο μοιρών.

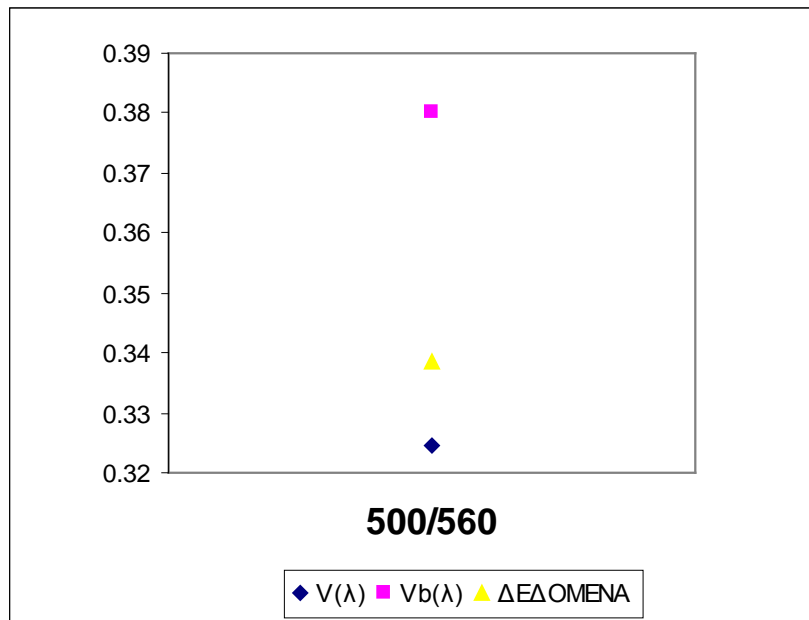
Έγιναν οπτικές ταυτίσεις από εννέα ανθρώπινα υποκείμενα. Έγιναν συγκρίσεις ανάμεσα στις ακτινοβολίες 440, 500, 540, 560nm. Μετρήθηκαν οι φωτοπικές λαμπρότητες των στόχων όταν γινόταν η οπτική ταύτιση των στόχων. Από τις μετρήσεις ελήφθησαν οι μέσοι όροι και υπολογίσθηκαν οι απαιτούμενοι λόγοι. Από τον υπολογισμό των μέσων όρων εξαιρέθηκαν τιμές οι οποίες παρουσίαζαν τεράστιες αποκλίσεις. Αυτό οφείλεται στην δυσκολία του πειράματος καθώς και στη κούραση των υποκειμένων. Στον πίνακα 7.4.1 εμφανίζονται αυτοί οι μέσοι όροι καθώς και οι λόγοι που προκύπτουν για τις συγκεκριμένες ακτινοβολίες αν ληφθούν τιμές από την καμπύλη φασματικής ευαισθησίας για την φωτοπική όραση και την καμπύλη φασματικής ευαισθησίας που προκύπτει από ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας. Στα σχήματα 7.4.1 έως 7.4.5 απεικονίζονται αυτοί οι λόγοι.

Πίνακας 7.4.1 Λόγοι ισοδυνάμων φωτοπικών λαμπροτήτων

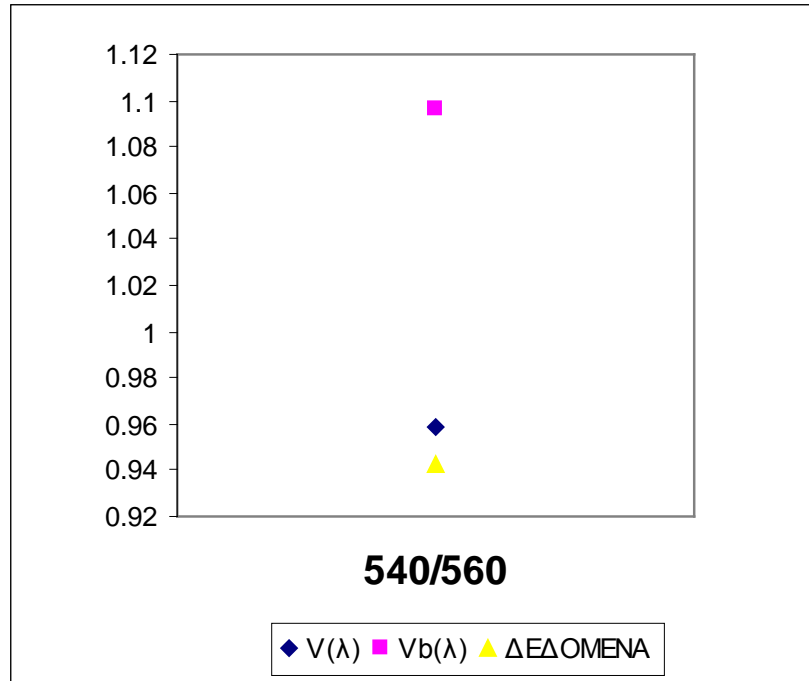
| Μήκη κύματος | Λόγοι που προκύπτουν με χρήση V(λ) | Λόγοι που προκύπτουν με χρήση V _b (λ) | Πειραματικά ευρεθέντες λόγοι | %Διαφορά από τους λόγους που προκύπτουν με χρήση V(λ) | %Διαφορά από τους λόγους που προκύπτουν με χρήση V _b (λ) |
|--------------|--|--|------------------------------|---|---|
| 440/560 | 0.0231 | 0.0741 | 0.0358 | -35.51 | -106.79 |
| 500/560 | 0.3246 | 0.3801 | 0.3384 | -4.095 | -12.32 |
| 540/560 | 0.9587 | 1.0964 | 0.9430 | 1.67 | -16.27 |
| 500/540 | 0.3385 | 0.3467 | 0.3253 | 4.07 | -6.57 |



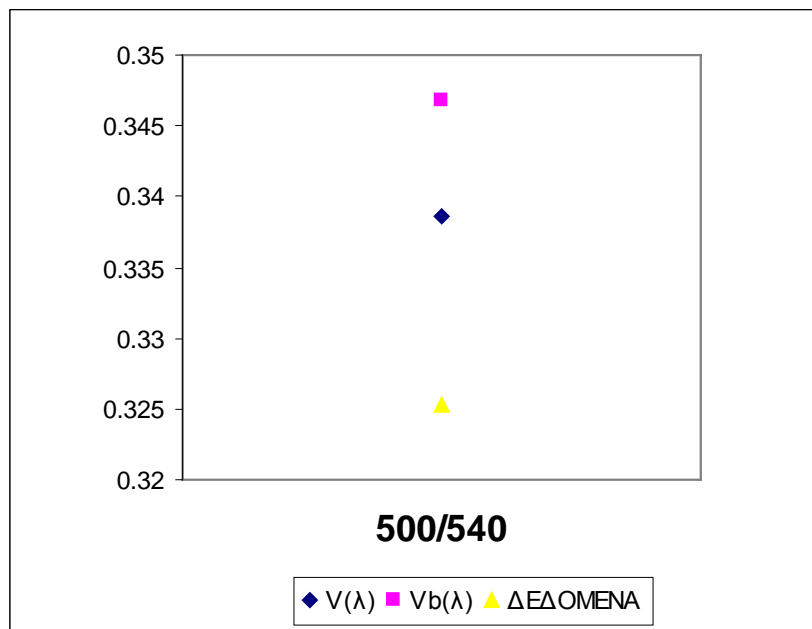
Σχήμα 7.4.1 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων πειραματικά προσδιοριζόμενος και θεωρητικά για τα μήκη κύματος 440 και 560



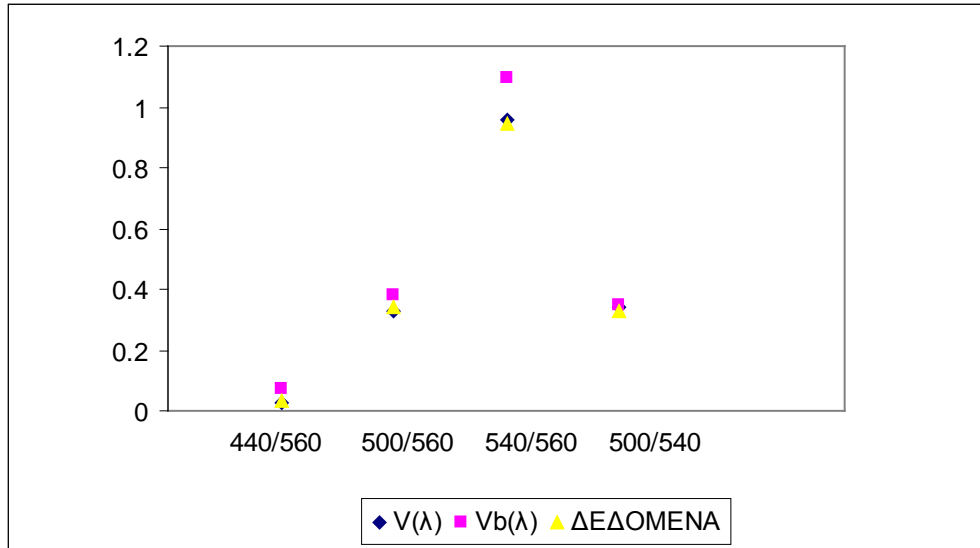
Σχήμα 7.4.2 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων πειραματικά προσδιοριζόμενος και θεωρητικά για τα μήκη κύματος 500 και 560



Σχήμα 7.4.3 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων πειραματικά προσδιοριζόμενος και θεωρητικά για τα μήκη κύματος 540 και 560



Σχήμα 7.4.4 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων πειραματικά προσδιοριζόμενος και θεωρητικά για τα μήκη κύματος 500 και 540



Σχήμα 7.4.5 Λόγοι ισοδυνάμων λαμπροτήτων πειραματικά προσδιοριζόμενος και θεωρητικά για τα εξεταζόμενα μήκη κύματος.

Παρατηρούμε ότι με εξαίρεση τον λόγο 440/560 τα πειραματικά δεδομένα συγκλίνουν στους λόγους που προκύπτουν με την χρήση της $V(\lambda)$. Η σύγκριση ανάμεσα στα 440 και 560nm παρουσιάζει αρκετά μεγάλη απόκλιση. Αυτό οφείλεται στο ότι οι δύο αυτές ακτινοβολίες παρουσιάζουν έντονες χρωματικές διαφορές, ενώ η ακτινοβολία των 440nm βρίσκεται στο άκρο του ορατού φάσματος με αποτέλεσμα η οπτική ταύτιση να είναι δυσκολότερη.

Ως τελικό συμπέρασμα προκύπτει ότι η πειραματική διάταξη λειτουργεί υπακούοντας στο νόμο της προσθετικότητας. Η προαναφερθείσα απόκλιση δεν πρέπει να χαρακτηριστεί ως σημαντική δεδομένου ότι στο πείραμα οι χρωματικές αποκλίσεις των ακτινοβολιών δεν είναι τόσο έντονες όσο ανάμεσα στα 440 και 560nm. Ακόμα αξίζει να αναφερθεί ότι τα δεδομένα ακολουθούν τον νομό της αναλογικότητας, για παράδειγμα ο λόγος 500/540 είναι 0.325, όμως $500/540 = (500/560)/(540/560) = 0.358$ σε πολύ καλή συμφωνία.

7.5 Πειραματικά αποτελέσματα

Η πειραματική διαδικασία διεξήχθη στο εργαστήριο φωτοτεχνίας του Ε.Μ.Π. κατά τη διάρκεια δύο διδακτικών ετών. Έλαβαν μέρος δεκαπέντε συνολικά φοιτητές (επτά αγόρια και οκτώ κορίτσια) με καλή όραση (10/10), χωρίς αχρωματοψία. Στη διαδικασία τα υποκείμενα προσπαθούσαν να ελαχιστοποιήσουν το διαχωριστικό όριο των στόχων. Η μάσκα μέσω της οποίας το υποκείμενο παρατηρεί το στόχο είχε τέτοια θέση ώστε η ευθεία που ενώνει το στόχο με τον οφθαλμό του παρατηρητή να σχηματίζει γωνία είκοσι μοιρών με το οπτικό άξονα του παρατηρητή. Δηλαδή παρόλο που ο στόχος έχει γωνιακό άνοιγμα δύο μοιρών, η όραση είναι περιφερειακή. Η πειραματική διαδικασία είναι αυτή που περιγράφηκε στη 7.3.6. Χρησιμοποιήθηκαν λαμπτήρες 400W νατρίου υψηλής πίεσης, μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου για τη δημιουργία υποβάθρου. Για τους οπτικούς στόχους χρησιμοποιήθηκαν λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης 250W και 125W ατμών υδραργύρου.

Έγιναν μετρήσεις σε τέσσερα επίπεδα λαμπρότητας, συγκεκριμένα σε 0.1, 1, 3 και 5cd/m². Δηλαδή στη περιοχή της χαμηλής μεσοπικής όρασης

Επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων

Οι τιμές που ελήφθησαν από τη πειραματική διαδικασία είναι σε W/m². Για να μετατραπούν σε lux θα πρέπει για κάθε φωτεινή πηγή που χρησιμοποιήθηκε στη πειραματική διαδικασία να καθορισθεί ο λόγος της φωτεινής ροής προς την εκπεμπόμενη ενέργεια της πηγής. Αυτό θα μπορούσε να γίνει από τις φασματικές κατανομές των φωτεινών πηγών. Στη προκειμένη περίπτωση όμως θα οδηγούσε σε λάθος αποτελέσματα. Αυτό γιατί οι φασματικές κατανομές από τις κατασκευάστριες εταιρείες των λαμπτήρων δίνονται για το ορατό φάσμα. Το δε φασματοφωτόμετρο της Ocean Optics του εργαστηρίου είναι και αυτό προσαρμοσμένο στο ορατό φάσμα. Οπότε δεν μπορεί να υπολογισθεί η ενέργεια που εκπέμπει κάθε πηγή με δεδομένο ότι αρκετή από αυτή είναι εκτός του ορατού φάσματος.

Άρα αυτός ο λόγος πρέπει να προσδιορισθεί πειραματικά. Η πειραματική διαδικασία είναι η εξής: Κάθε λαμπτήρας τοποθετείται στο φωτοδοχείο και μέσω του φωτοσωλήνα το φως εισέρχεται στην σφαίρα Ulbricht διαμέτρου 40cm. Στην άλλη οπή της σφαίρας τοποθετείται ο αισθητήρας του λουξομέτρου μετρώντας το φωτισμό

και στη συνέχεια τα W/m^2 της πηγής. Το πηλίκο των δύο μετρήσεων είναι ο ζητούμενος λόγος. Στο πίνακα 7.5.1 αναγράφονται οι ευρεθείσες τιμές. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι απόλυτες τιμές δεν αποτελούν μέτρο σύγκρισης γιατί η εισερχόμενη ροή στη σφαίρα δεν είναι πάντα το ίδιο ποσοστό της ροής του λαμπτήρα.

Πίνακας 7.5.1 Λόγος Lux(φωτοπικά)/(Watt/cm²)

| Τύπος λαμπτήρα | Watt/m ² | Lux (φωτοπικά) | Lux(φωτοπικά)/(Watt/m ²) |
|--------------------------------|---------------------|----------------|--------------------------------------|
| Νατρίου υψηλής πίεσης 250W | 1.26 | 349 | 276.98 |
| Νατρίου υψηλής πίεσης 400W | 2.17 | 617 | 284.33 |
| Μεταλλικών αλογονιδίων 250W | 1.46 | 360E | 245.90 |
| Μεταλλικών αλογονιδίων 400W | 2.42 | 74.2 | 306.61 |
| Ατμών υδραργύρου 125W | 2.22 | 72.1 | 324.77 |
| Ατμών υδραργύρου 400W | 2.66 | 88.6 | 333.08 |

Στη συνέχεια οι τιμές που ελήφθησαν από τη πειραματική διαδικασία μετατρέπονται σε φωτοπικές μονάδες πολλαπλασιάζοντας με τους αντίστοιχους συντελεστές.

Επειδή η γεωμετρία υπό την οποία γίνονται αντιληπτοί οι στόχοι από τον παρατηρητή είναι ίδια και για τους δύο στόχους τότε οι λόγοι φωτισμού θα είναι ίσοι με τους λόγους λαμπροτήτων που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής, δηλαδή:

$$\frac{L(MH)}{L(HPS)} = \frac{E(MH)}{E(HPS)}$$

$$\frac{L(HG)}{L(HPS)} = \frac{E(HG)}{E(HPS)}$$

7.5.1

$$\frac{L(MH)}{L(HG)} = \frac{E(MH)}{E(HG)}$$

Με αυτό τον τρόπο υπολογίζονται οι λόγοι λαμπροτήτων που αντιλαμβάνεται ως ισοδύναμες ο παρατηρητής σε κάθε μέτρηση. Στους πίνακες 7.5.2 έως 7.5.37 παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις για κάθε υποκείμενο σε κάθε περίπτωση σε φωτοπικές μονάδες.

Πίνακας 7.5.2 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HG | MH | HG | L(MH)/L(HG) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|-------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 15.19 | 12.89 | 37.35 | 41.88 | 0.892 |
| 2 | 15.19 | 23.21 | 37.35 | 75.38 | 0.496 |
| 3 | 15.19 | 10.55 | 37.35 | 34.27 | 1.090 |
| 4 | 13.20 | 8.40 | 32.46 | 27.29 | 1.189 |
| 5 | 13.20 | 10.09 | 32.46 | 32.75 | 0.991 |
| 6 | 13.20 | 10.62 | 32.46 | 34.48 | 0.941 |
| 7 | 14.01 | 12.60 | 34.46 | 40.91 | 0.842 |
| 8 | 14.01 | 7.65 | 34.46 | 24.84 | 1.387 |
| 9 | 14.01 | 8.92 | 34.46 | 28.98 | 1.189 |
| 10 | 13.68 | 13.94 | 33.64 | 45.26 | 0.743 |
| 11 | 13.68 | 12.30 | 33.64 | 39.94 | 0.842 |
| 12 | 13.68 | 7.47 | 33.64 | 24.25 | 1.387 |
| 13 | 14.09 | 11.33 | 34.64 | 36.79 | 0.941 |
| 14 | 14.09 | 9.78 | 34.64 | 31.78 | 1.090 |
| 15 | 14.09 | 12.66 | 34.64 | 41.12 | 0.842 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.865 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.991 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.239 |

Πίνακας 7.5.3 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HPS | MH | HPS | L(MH)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 15.19 | 16.22 | 37.35 | 44.93 | 0.831 |
| 2 | 10.72 | 16.22 | 26.36 | 44.93 | 0.587 |
| 3 | 21.44 | 16.22 | 52.73 | 44.93 | 1.174 |
| 4 | 23.37 | 16.32 | 57.47 | 45.20 | 1.271 |
| 5 | 18.88 | 16.32 | 46.42 | 45.20 | 1.027 |
| 6 | 17.26 | 16.32 | 42.44 | 45.20 | 0.939 |
| 7 | 12.88 | 16.02 | 31.68 | 44.37 | 0.714 |
| 8 | 19.42 | 16.02 | 47.74 | 44.37 | 1.076 |
| 9 | 24.71 | 16.02 | 60.76 | 44.37 | 1.369 |
| 10 | 13.68 | 15.52 | 33.63 | 42.99 | 0.782 |
| 11 | 15.39 | 15.52 | 37.84 | 42.99 | 0.880 |
| 12 | 29.07 | 15.52 | 71.47 | 42.99 | 1.663 |
| 13 | 14.09 | 15.79 | 34.65 | 43.74 | 0.792 |
| 14 | 17.39 | 15.79 | 42.77 | 43.74 | 0.978 |
| 15 | 10.43 | 15.79 | 25.66 | 43.74 | 0.587 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.670 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.978 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.297 |

Πίνακας 7.5.4 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5 cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | HG | HPS | HG | HPS | L(HG)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 12.73 | 17.30 | 41.34 | 47.92 | 0.863 |
| 2 | 8.00 | 17.30 | 25.99 | 47.92 | 0.542 |
| 3 | 16.73 | 17.30 | 54.33 | 47.92 | 1.13 |
| 4 | 17.97 | 17.10 | 58.38 | 47.36 | 1.23 |
| 5 | 14.74 | 17.10 | 47.87 | 47.36 | 1.01 |
| 6 | 13.73 | 17.10 | 44.60 | 47.36 | 0.942 |
| 7 | 12.11 | 18.23 | 39.33 | 50.49 | 0.779 |
| 8 | 19.16 | 18.23 | 62.23 | 50.49 | 1.23 |
| 9 | 19.93 | 18.23 | 64.72 | 50.49 | 1.28 |
| 10 | 11.36 | 17.43 | 36.89 | 48.28 | 0.764 |
| 11 | 12.83 | 17.43 | 41.65 | 48.28 | 0.863 |
| 12 | 22.72 | 17.43 | 73.78 | 48.28 | 1.53 |
| 13 | 12.48 | 16.87 | 40.54 | 46.73 | 0.868 |
| 14 | 14.89 | 16.87 | 48.38 | 46.73 | 1.04 |
| 15 | 10.28 | 16.87 | 33.40 | 46.73 | 0.715 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.790 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.986 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.258 |

Πίνακας 7.5.5 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HG | MH | HG | L(MH)/L(HG) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|-------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 4.30 | 3.81 | 10.57 | 12.37 | 0.855 |
| 2 | 4.30 | 6.85 | 10.57 | 22.26 | 0.475 |
| 3 | 4.30 | 3.12 | 10.57 | 10.12 | 1.045 |
| 4 | 4.22 | 2.80 | 10.37 | 9.10 | 1.140 |
| 5 | 4.22 | 3.36 | 10.37 | 10.92 | 0.950 |
| 6 | 4.22 | 3.54 | 10.37 | 11.49 | 0.903 |
| 7 | 4.27 | 4.00 | 10.50 | 13.00 | 0.808 |
| 8 | 4.27 | 2.43 | 10.50 | 7.89 | 1.330 |
| 9 | 4.27 | 2.84 | 10.50 | 9.21 | 1.140 |
| 10 | 4.30 | 4.57 | 10.57 | 14.84 | 0.713 |
| 11 | 4.30 | 4.03 | 10.57 | 13.09 | 0.808 |
| 12 | 4.30 | 2.45 | 10.57 | 7.95 | 1.330 |
| 13 | 4.34 | 3.64 | 10.67 | 11.83 | 0.903 |
| 14 | 4.34 | 3.14 | 10.67 | 10.21 | 1.045 |
| 15 | 4.34 | 4.07 | 10.67 | 13.22 | 0.808 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.250 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.950 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.229 |

Πίνακας 7.5.6 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HPS | MH | HPS | L(MH)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 4.30 | 5.15 | 10.57 | 14.27 | 0.741 |
| 2 | 3.04 | 5.15 | 7.46 | 14.27 | 0.523 |
| 3 | 6.07 | 5.15 | 14.93 | 14.27 | 1.046 |
| 4 | 5.71 | 4.47 | 14.05 | 12.39 | 1.134 |
| 5 | 4.61 | 4.47 | 11.35 | 12.39 | 0.916 |
| 6 | 4.22 | 4.47 | 10.37 | 12.39 | 0.837 |
| 7 | 3.43 | 4.78 | 8.43 | 13.24 | 0.637 |
| 8 | 5.16 | 4.78 | 12.70 | 13.24 | 0.959 |
| 9 | 6.57 | 4.78 | 16.16 | 13.24 | 1.221 |
| 10 | 3.82 | 4.86 | 9.40 | 13.47 | 0.698 |
| 11 | 4.30 | 4.86 | 10.57 | 13.47 | 0.785 |
| 12 | 8.12 | 4.86 | 19.97 | 13.47 | 1.482 |
| 13 | 3.52 | 4.42 | 8.65 | 12.24 | 0.706 |
| 14 | 4.34 | 4.42 | 10.67 | 12.24 | 0.872 |
| 15 | 2.60 | 4.42 | 6.40 | 12.24 | 0.523 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 13.080 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.872 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.265 |

Πίνακας 7.5.7 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3 cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | HG | HPS | HG | HPS | L(HG)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 3.49 | 5.09 | 11.33 | 14.11 | 0.803 |
| 2 | 2.19 | 5.09 | 7.12 | 14.11 | 0.505 |
| 3 | 4.59 | 5.09 | 14.90 | 14.11 | 1.056 |
| 4 | 5.04 | 5.15 | 16.37 | 14.27 | 1.148 |
| 5 | 4.13 | 5.15 | 13.42 | 14.27 | 0.941 |
| 6 | 3.85 | 5.15 | 12.51 | 14.27 | 0.877 |
| 7 | 3.01 | 4.86 | 9.77 | 13.47 | 0.725 |
| 8 | 4.76 | 4.86 | 15.46 | 13.47 | 1.148 |
| 9 | 4.95 | 4.86 | 16.08 | 13.47 | 1.193 |
| 10 | 3.13 | 5.15 | 10.15 | 14.27 | 0.711 |
| 11 | 3.53 | 5.15 | 11.46 | 14.27 | 0.803 |
| 12 | 6.25 | 5.15 | 20.30 | 14.27 | 1.423 |
| 13 | 3.29 | 4.78 | 10.69 | 13.24 | 0.808 |
| 14 | 3.93 | 4.78 | 12.76 | 13.24 | 0.964 |
| 15 | 2.71 | 4.78 | 8.81 | 13.24 | 0.666 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 13.770 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.918 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.240 |

Πίνακας 7.5.8 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HG | MH | HG | L(MH)/L(HG) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|-------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 3.47 | 3.53 | 8.54 | 11.47 | 0.744 |
| 2 | 3.47 | 6.36 | 8.54 | 20.64 | 0.414 |
| 3 | 3.47 | 2.89 | 8.54 | 9.38 | 0.910 |
| 4 | 3.35 | 2.56 | 8.24 | 8.30 | 0.992 |
| 5 | 3.35 | 3.07 | 8.24 | 9.96 | 0.827 |
| 6 | 3.35 | 3.23 | 8.24 | 10.48 | 0.786 |
| 7 | 3.19 | 3.43 | 7.84 | 11.15 | 0.703 |
| 8 | 3.19 | 2.08 | 7.84 | 6.77 | 1.158 |
| 9 | 3.19 | 2.43 | 7.84 | 7.90 | 0.992 |
| 10 | 3.31 | 4.04 | 8.14 | 13.12 | 0.620 |
| 11 | 3.31 | 3.56 | 8.14 | 11.57 | 0.703 |
| 12 | 3.31 | 2.16 | 8.14 | 7.03 | 1.158 |
| 13 | 3.36 | 3.24 | 8.26 | 10.51 | 0.786 |
| 14 | 3.36 | 2.80 | 8.26 | 9.08 | 0.910 |
| 15 | 3.36 | 3.62 | 8.26 | 11.75 | 0.703 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 12.405 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.827 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.199 |

Πίνακας 7.5.9 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HPS | MH | HPS | L(MH)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 3.47 | 6.54 | 8.54 | 18.13 | 0.471 |
| 2 | 2.45 | 6.54 | 6.03 | 18.13 | 0.332 |
| 3 | 4.90 | 6.54 | 12.05 | 18.13 | 0.665 |
| 4 | 4.15 | 5.11 | 10.20 | 14.16 | 0.720 |
| 5 | 3.35 | 5.11 | 8.24 | 14.16 | 0.582 |
| 6 | 3.06 | 5.11 | 7.53 | 14.16 | 0.532 |
| 7 | 2.85 | 6.26 | 7.01 | 17.33 | 0.404 |
| 8 | 4.30 | 6.26 | 10.56 | 17.33 | 0.609 |
| 9 | 5.47 | 6.26 | 13.44 | 17.33 | 0.776 |
| 10 | 2.94 | 5.89 | 7.23 | 16.32 | 0.443 |
| 11 | 3.31 | 5.89 | 8.14 | 16.32 | 0.499 |
| 12 | 6.25 | 5.89 | 15.37 | 16.32 | 0.942 |
| 13 | 3.36 | 6.65 | 8.26 | 18.41 | 0.449 |
| 14 | 4.15 | 6.65 | 10.20 | 18.41 | 0.554 |
| 15 | 2.49 | 6.65 | 6.12 | 18.41 | 0.332 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 8.310 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.554 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.168 |

Πίνακας 7.5.10 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1 cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | HG | HPS | HG | HPS | L(HG)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 2.85 | 5.71 | 9.26 | 15.82 | 0.585 |
| 2 | 1.79 | 5.71 | 5.82 | 15.82 | 0.368 |
| 3 | 3.75 | 5.71 | 12.17 | 15.82 | 0.769 |
| 4 | 3.81 | 5.35 | 12.38 | 14.81 | 0.836 |
| 5 | 3.13 | 5.35 | 10.15 | 14.81 | 0.686 |
| 6 | 2.91 | 5.35 | 9.46 | 14.81 | 0.639 |
| 7 | 2.82 | 6.26 | 9.16 | 17.33 | 0.529 |
| 8 | 4.46 | 6.26 | 14.49 | 17.33 | 0.836 |
| 9 | 4.64 | 6.26 | 15.07 | 17.33 | 0.870 |
| 10 | 2.51 | 5.69 | 8.17 | 15.75 | 0.518 |
| 11 | 2.84 | 5.69 | 9.22 | 15.75 | 0.585 |
| 12 | 5.03 | 5.69 | 16.33 | 15.75 | 1.037 |
| 13 | 2.87 | 5.72 | 9.32 | 15.83 | 0.589 |
| 14 | 3.42 | 5.72 | 11.12 | 15.83 | 0.702 |
| 15 | 2.36 | 5.72 | 7.68 | 15.83 | 0.485 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 10.035 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.669 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.175 |

Πίνακας 7.5.11 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HG | MH | HG | L(MH)/L(HG) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|-------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 1.29 | 1.37 | 3.18 | 4.45 | 0.715 |
| 2 | 1.29 | 2.47 | 3.18 | 8.01 | 0.397 |
| 3 | 1.29 | 1.12 | 3.18 | 3.64 | 0.873 |
| 4 | 1.90 | 1.51 | 4.68 | 4.91 | 0.953 |
| 5 | 1.90 | 1.81 | 4.68 | 5.89 | 0.794 |
| 6 | 1.90 | 1.91 | 4.68 | 6.20 | 0.754 |
| 7 | 1.48 | 1.66 | 3.64 | 5.39 | 0.675 |
| 8 | 1.48 | 1.01 | 3.64 | 3.27 | 1.112 |
| 9 | 1.48 | 1.18 | 3.64 | 3.82 | 0.953 |
| 10 | 1.31 | 1.67 | 3.22 | 5.41 | 0.596 |
| 11 | 1.31 | 1.47 | 3.22 | 4.77 | 0.675 |
| 12 | 1.31 | 0.89 | 3.22 | 2.90 | 1.112 |
| 13 | 1.75 | 1.76 | 4.30 | 5.70 | 0.754 |
| 14 | 1.75 | 1.52 | 4.30 | 4.93 | 0.873 |
| 15 | 1.75 | 1.96 | 4.30 | 6.38 | 0.675 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 11.910 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.794 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.191 |

Πίνακας 7.5.12 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου 0.1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HPS | MH | HPS | L(MH)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 1.83 | 4.24 | 4.51 | 11.75 | 0.383 |
| 2 | 1.29 | 4.24 | 3.18 | 11.75 | 0.271 |
| 3 | 2.59 | 4.24 | 6.36 | 11.75 | 0.541 |
| 4 | 2.58 | 3.90 | 6.34 | 10.81 | 0.586 |
| 5 | 2.08 | 3.90 | 5.12 | 10.81 | 0.474 |
| 6 | 1.90 | 3.90 | 4.68 | 10.81 | 0.433 |
| 7 | 1.48 | 3.99 | 3.64 | 11.05 | 0.329 |
| 8 | 2.23 | 3.99 | 5.48 | 11.05 | 0.496 |
| 9 | 2.84 | 3.99 | 6.98 | 11.05 | 0.631 |
| 10 | 1.57 | 3.85 | 3.85 | 10.67 | 0.361 |
| 11 | 1.76 | 3.85 | 4.33 | 10.67 | 0.406 |
| 12 | 3.33 | 3.85 | 8.18 | 10.67 | 0.767 |
| 13 | 1.75 | 4.25 | 4.30 | 11.78 | 0.365 |
| 14 | 2.16 | 4.25 | 5.31 | 11.78 | 0.451 |
| 15 | 1.30 | 4.25 | 3.19 | 11.78 | 0.271 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 6.765 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.451 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.137 |

Πίνακας 7.5.13 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου 0.1 cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | HG | HPS | HG | HPS | L(HG)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 1.56 | 3.69 | 5.07 | 10.21 | 0.496 |
| 2 | 0.98 | 3.69 | 3.18 | 10.21 | 0.312 |
| 3 | 2.05 | 3.69 | 6.66 | 10.21 | 0.652 |
| 4 | 2.10 | 3.48 | 6.83 | 9.64 | 0.709 |
| 5 | 1.73 | 3.48 | 5.60 | 9.64 | 0.581 |
| 6 | 1.61 | 3.48 | 5.22 | 9.64 | 0.541 |
| 7 | 1.62 | 4.25 | 5.28 | 11.78 | 0.448 |
| 8 | 2.57 | 4.25 | 8.35 | 11.78 | 0.709 |
| 9 | 2.67 | 4.25 | 8.68 | 11.78 | 0.737 |
| 10 | 1.50 | 3.99 | 4.86 | 11.05 | 0.439 |
| 11 | 1.69 | 3.99 | 5.48 | 11.05 | 0.496 |
| 12 | 2.99 | 3.99 | 9.71 | 11.05 | 0.879 |
| 13 | 1.64 | 3.85 | 5.33 | 10.67 | 0.499 |
| 14 | 1.96 | 3.85 | 6.36 | 10.67 | 0.595 |
| 15 | 1.35 | 3.85 | 4.39 | 10.67 | 0.411 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 8.505 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.567 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.148 |

Πίνακας 7.5.14 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HG | MH | HG | L(MH)/L(HG) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|-------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 16.71 | 14.39 | 41.09 | 46.73 | 0.879 |
| 2 | 16.71 | 32.37 | 41.09 | 105.14 | 0.391 |
| 3 | 16.71 | 11.77 | 41.09 | 38.23 | 1.075 |
| 4 | 14.52 | 8.66 | 35.70 | 28.11 | 1.270 |
| 5 | 14.52 | 11.25 | 35.70 | 36.55 | 0.977 |
| 6 | 14.52 | 11.84 | 35.70 | 38.47 | 0.928 |
| 7 | 15.41 | 14.22 | 37.90 | 46.19 | 0.821 |
| 8 | 15.41 | 9.12 | 37.90 | 29.62 | 1.280 |
| 9 | 15.41 | 9.95 | 37.90 | 32.33 | 1.172 |
| 10 | 15.05 | 15.55 | 37.00 | 50.50 | 0.733 |
| 11 | 15.05 | 13.72 | 37.00 | 44.56 | 0.830 |
| 12 | 15.05 | 8.33 | 37.00 | 27.05 | 1.368 |
| 13 | 15.50 | 12.64 | 38.10 | 41.05 | 0.928 |
| 14 | 15.50 | 10.01 | 38.10 | 32.50 | 1.172 |
| 15 | 15.50 | 14.13 | 38.10 | 45.88 | 0.830 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.655 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.977 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.253 |

Πίνακας 7.5.15 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: μεταλλικών αλογονιδίων.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HPS | MH | HPS | L(MH)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 16.71 | 18.08 | 41.09 | 50.09 | 0.820 |
| 2 | 16.71 | 25.62 | 41.09 | 70.96 | 0.579 |
| 3 | 16.71 | 12.81 | 41.09 | 35.48 | 1.158 |
| 4 | 14.52 | 10.28 | 35.70 | 28.46 | 1.255 |
| 5 | 14.52 | 12.72 | 35.70 | 35.24 | 1.013 |
| 6 | 14.52 | 13.91 | 35.70 | 38.54 | 0.926 |
| 7 | 15.41 | 19.43 | 37.90 | 53.81 | 0.704 |
| 8 | 15.41 | 12.89 | 37.90 | 35.71 | 1.062 |
| 9 | 15.41 | 10.13 | 37.90 | 28.06 | 1.351 |
| 10 | 15.05 | 17.30 | 37.00 | 47.93 | 0.772 |
| 11 | 15.05 | 15.38 | 37.00 | 42.61 | 0.869 |
| 12 | 15.05 | 8.14 | 37.00 | 22.56 | 1.641 |
| 13 | 15.50 | 17.60 | 38.10 | 48.75 | 0.782 |
| 14 | 15.50 | 14.26 | 38.10 | 39.49 | 0.965 |
| 15 | 15.50 | 23.76 | 38.10 | 65.81 | 0.579 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.475 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.965 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.293 |

Πίνακας 7.5.16 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | HG | HPS | HG | HPS | L(HG)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 14.00 | 19.03 | 45.47 | 52.70 | 0.863 |
| 2 | 14.00 | 33.30 | 45.47 | 92.23 | 0.493 |
| 3 | 14.00 | 14.48 | 45.47 | 40.10 | 1.134 |
| 4 | 12.98 | 11.88 | 42.17 | 32.90 | 1.282 |
| 5 | 12.98 | 15.06 | 42.17 | 41.72 | 1.011 |
| 6 | 12.98 | 16.17 | 42.17 | 44.78 | 0.942 |
| 7 | 13.32 | 20.18 | 43.27 | 55.90 | 0.774 |
| 8 | 13.32 | 13.15 | 43.27 | 36.42 | 1.188 |
| 9 | 13.32 | 12.19 | 43.27 | 33.76 | 1.282 |
| 10 | 13.93 | 21.38 | 45.25 | 59.21 | 0.764 |
| 11 | 13.93 | 18.93 | 45.25 | 52.45 | 0.863 |
| 12 | 13.93 | 10.69 | 45.25 | 29.61 | 1.528 |
| 13 | 12.92 | 17.45 | 41.95 | 48.35 | 0.868 |
| 14 | 12.92 | 13.96 | 41.95 | 38.68 | 1.085 |
| 15 | 12.92 | 21.19 | 41.95 | 58.68 | 0.715 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.790 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.986 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.266 |

Πίνακας 7.5.17 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HG | MH | HG | L(MH)/L(HG) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|-------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 4.52 | 4.09 | 11.10 | 13.29 | 0.835 |
| 2 | 4.52 | 7.37 | 11.10 | 23.93 | 0.464 |
| 3 | 4.52 | 3.35 | 11.10 | 10.88 | 1.021 |
| 4 | 4.43 | 3.01 | 10.89 | 9.78 | 1.114 |
| 5 | 4.43 | 3.61 | 10.89 | 11.74 | 0.928 |
| 6 | 4.43 | 3.80 | 10.89 | 12.36 | 0.882 |
| 7 | 4.48 | 4.30 | 11.03 | 13.98 | 0.789 |
| 8 | 4.48 | 2.61 | 11.03 | 8.49 | 1.299 |
| 9 | 4.48 | 3.05 | 11.03 | 9.90 | 1.114 |
| 10 | 4.52 | 4.91 | 11.10 | 15.95 | 0.696 |
| 11 | 4.52 | 4.33 | 11.10 | 14.08 | 0.789 |
| 12 | 4.52 | 2.63 | 11.10 | 8.55 | 1.299 |
| 13 | 4.56 | 3.91 | 11.21 | 12.71 | 0.882 |
| 14 | 4.56 | 3.38 | 11.21 | 10.98 | 1.021 |
| 15 | 4.56 | 4.37 | 11.21 | 14.21 | 0.789 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 13.920 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.928 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.223 |

Πίνακας 7.5.18 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: μεταλλικών αλογονιδίων.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HPS | MH | HPS | L(MH)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 4.52 | 5.35 | 11.10 | 14.83 | 0.749 |
| 2 | 4.52 | 7.58 | 11.10 | 21.00 | 0.529 |
| 3 | 4.52 | 3.79 | 11.10 | 10.50 | 1.057 |
| 4 | 4.43 | 3.43 | 10.89 | 9.51 | 1.145 |
| 5 | 4.43 | 4.25 | 10.89 | 11.77 | 0.925 |
| 6 | 4.43 | 4.65 | 10.89 | 12.88 | 0.846 |
| 7 | 4.48 | 6.19 | 11.03 | 17.14 | 0.643 |
| 8 | 4.48 | 4.11 | 11.03 | 11.38 | 0.969 |
| 9 | 4.48 | 3.23 | 11.03 | 8.94 | 1.233 |
| 10 | 4.52 | 5.69 | 11.10 | 15.75 | 0.705 |
| 11 | 4.52 | 5.06 | 11.10 | 14.00 | 0.793 |
| 12 | 4.52 | 2.68 | 11.10 | 7.41 | 1.498 |
| 13 | 4.56 | 5.67 | 11.21 | 15.71 | 0.714 |
| 14 | 4.56 | 4.59 | 11.21 | 12.72 | 0.881 |
| 15 | 4.56 | 7.65 | 11.21 | 21.20 | 0.529 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 13.215 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.881 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.268 |

Πίνακας 7.5.19 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3 cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | HG | HPS | HG | HPS | L(HG)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 3.66 | 5.17 | 11.90 | 14.33 | 0.830 |
| 2 | 3.66 | 8.23 | 11.90 | 22.80 | 0.522 |
| 3 | 3.66 | 3.94 | 11.90 | 10.91 | 1.091 |
| 4 | 3.74 | 3.69 | 12.14 | 10.23 | 1.186 |
| 5 | 3.74 | 4.51 | 12.14 | 12.48 | 0.973 |
| 6 | 3.74 | 4.84 | 12.14 | 13.40 | 0.906 |
| 7 | 3.77 | 5.90 | 12.24 | 16.33 | 0.750 |
| 8 | 3.77 | 3.73 | 12.24 | 10.32 | 1.186 |
| 9 | 3.77 | 3.58 | 12.24 | 9.92 | 1.234 |
| 10 | 3.70 | 5.91 | 12.03 | 16.36 | 0.735 |
| 11 | 3.70 | 5.23 | 12.03 | 14.49 | 0.830 |
| 12 | 3.70 | 2.95 | 12.03 | 8.18 | 1.471 |
| 13 | 3.46 | 4.85 | 11.23 | 13.45 | 0.835 |
| 14 | 3.46 | 4.07 | 11.23 | 11.27 | 0.996 |
| 15 | 3.46 | 5.89 | 11.23 | 16.32 | 0.688 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.235 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.949 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.248 |

Πίνακας 7.5.20 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HG | MH | HG | L(MH)/L(HG) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|-------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 3.30 | 4.17 | 8.11 | 13.55 | 0.599 |
| 2 | 3.30 | 7.51 | 8.11 | 24.39 | 0.333 |
| 3 | 3.30 | 3.41 | 8.11 | 11.09 | 0.732 |
| 4 | 3.18 | 3.02 | 7.82 | 9.80 | 0.798 |
| 5 | 3.18 | 3.62 | 7.82 | 11.77 | 0.665 |
| 6 | 3.18 | 3.81 | 7.82 | 12.39 | 0.632 |
| 7 | 3.03 | 4.06 | 7.44 | 13.17 | 0.565 |
| 8 | 3.03 | 2.46 | 7.44 | 8.00 | 0.931 |
| 9 | 3.03 | 2.87 | 7.44 | 9.33 | 0.798 |
| 10 | 3.14 | 4.77 | 7.73 | 15.50 | 0.499 |
| 11 | 3.14 | 4.21 | 7.73 | 13.67 | 0.565 |
| 12 | 3.14 | 2.56 | 7.73 | 8.30 | 0.931 |
| 13 | 3.19 | 3.82 | 7.85 | 12.42 | 0.632 |
| 14 | 3.19 | 3.30 | 7.85 | 10.73 | 0.732 |
| 15 | 3.19 | 4.27 | 7.85 | 13.88 | 0.565 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 9.975 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.665 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.160 |

Πίνακας 7.5.21 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: μεταλλικών αλογονιδίων.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HPS | MH | HPS | L(MH)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 3.30 | 7.60 | 8.11 | 21.06 | 0.385 |
| 2 | 3.30 | 10.77 | 8.11 | 29.84 | 0.272 |
| 3 | 3.30 | 5.39 | 8.11 | 14.92 | 0.544 |
| 4 | 3.18 | 4.80 | 7.82 | 13.29 | 0.589 |
| 5 | 3.18 | 5.94 | 7.82 | 16.45 | 0.476 |
| 6 | 3.18 | 6.50 | 7.82 | 17.99 | 0.435 |
| 7 | 3.03 | 8.13 | 7.44 | 22.51 | 0.331 |
| 8 | 3.03 | 5.39 | 7.44 | 14.94 | 0.498 |
| 9 | 3.03 | 4.24 | 7.44 | 11.74 | 0.634 |
| 10 | 3.14 | 7.70 | 7.73 | 21.33 | 0.362 |
| 11 | 3.14 | 6.84 | 7.73 | 18.96 | 0.408 |
| 12 | 3.14 | 3.62 | 7.73 | 10.04 | 0.770 |
| 13 | 3.19 | 7.72 | 7.85 | 21.39 | 0.367 |
| 14 | 3.19 | 6.25 | 7.85 | 17.32 | 0.453 |
| 15 | 3.19 | 10.42 | 7.85 | 28.87 | 0.272 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 6.795 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.453 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.137 |

Πίνακας 7.5.22 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1 cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | HG | HPS | HG | HPS | L(HG)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 2.71 | 5.32 | 8.80 | 14.74 | 0.597 |
| 2 | 2.71 | 8.47 | 8.80 | 23.45 | 0.375 |
| 3 | 2.71 | 4.05 | 8.80 | 11.22 | 0.784 |
| 4 | 2.77 | 3.81 | 8.99 | 10.54 | 0.853 |
| 5 | 2.77 | 4.64 | 8.99 | 12.86 | 0.699 |
| 6 | 2.77 | 4.98 | 8.99 | 13.80 | 0.651 |
| 7 | 2.68 | 5.83 | 8.70 | 16.15 | 0.539 |
| 8 | 2.68 | 3.69 | 8.70 | 10.21 | 0.853 |
| 9 | 2.68 | 3.54 | 8.70 | 9.82 | 0.887 |
| 10 | 2.70 | 5.98 | 8.76 | 16.57 | 0.529 |
| 11 | 2.70 | 5.30 | 8.76 | 14.68 | 0.597 |
| 12 | 2.70 | 2.99 | 8.76 | 8.29 | 1.057 |
| 13 | 2.73 | 5.33 | 8.85 | 14.75 | 0.600 |
| 14 | 2.73 | 4.46 | 8.85 | 12.37 | 0.716 |
| 15 | 2.73 | 6.47 | 8.85 | 17.91 | 0.494 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 10.230 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.682 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.178 |

Πίνακας 7.5.23 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HG | MH | HG | L (MH)/L(HG) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 1.03 | 1.55 | 2.54 | 5.02 | 0.507 |
| 2 | 1.03 | 2.78 | 2.54 | 9.04 | 0.282 |
| 3 | 1.03 | 1.26 | 2.54 | 4.11 | 0.619 |
| 4 | 1.52 | 1.71 | 3.74 | 5.54 | 0.676 |
| 5 | 1.52 | 2.05 | 3.74 | 6.65 | 0.563 |
| 6 | 1.52 | 2.16 | 3.74 | 7.00 | 0.535 |
| 7 | 1.18 | 1.87 | 2.91 | 6.08 | 0.479 |
| 8 | 1.18 | 1.14 | 2.91 | 3.69 | 0.788 |
| 9 | 1.18 | 1.33 | 2.91 | 4.31 | 0.676 |
| 10 | 1.05 | 1.88 | 2.58 | 6.10 | 0.422 |
| 11 | 1.05 | 1.66 | 2.58 | 5.39 | 0.479 |
| 12 | 1.05 | 1.01 | 2.58 | 3.27 | 0.788 |
| 13 | 1.40 | 1.98 | 3.44 | 6.44 | 0.535 |
| 14 | 1.40 | 1.71 | 3.44 | 5.56 | 0.619 |
| 15 | 1.40 | 2.22 | 3.44 | 7.19 | 0.479 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 8.445 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.563 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.135 |

Πίνακας 7.5.24 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: μεταλλικών αλογονιδίων.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HPS | MH | HPS | L(MH)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 1.03 | 3.73 | 2.54 | 10.32 | 0.247 |
| 2 | 1.03 | 5.28 | 2.54 | 14.62 | 0.174 |
| 3 | 1.03 | 2.64 | 2.54 | 7.31 | 0.348 |
| 4 | 1.52 | 3.59 | 3.74 | 9.93 | 0.377 |
| 5 | 1.52 | 4.44 | 3.74 | 12.30 | 0.305 |
| 6 | 1.52 | 4.86 | 3.74 | 13.45 | 0.278 |
| 7 | 1.18 | 4.97 | 2.91 | 13.75 | 0.212 |
| 8 | 1.18 | 3.30 | 2.91 | 9.13 | 0.319 |
| 9 | 1.18 | 2.59 | 2.91 | 7.17 | 0.406 |
| 10 | 1.05 | 4.01 | 2.58 | 11.11 | 0.232 |
| 11 | 1.05 | 3.56 | 2.58 | 9.87 | 0.261 |
| 12 | 1.05 | 1.89 | 2.58 | 5.23 | 0.493 |
| 13 | 1.40 | 5.29 | 3.44 | 14.66 | 0.235 |
| 14 | 1.40 | 4.29 | 3.44 | 11.87 | 0.290 |
| 15 | 1.40 | 7.14 | 3.44 | 19.79 | 0.174 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 4.35 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.29 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.082 |

Πίνακας 7.5.25 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | HG | HPS | HG | HPS | L(HG)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 1.25 | 3.25 | 4.05 | 8.99 | 0.451 |
| 2 | 1.25 | 5.17 | 4.05 | 14.31 | 0.283 |
| 3 | 1.25 | 2.47 | 4.05 | 6.84 | 0.592 |
| 4 | 1.68 | 3.07 | 5.47 | 8.49 | 0.644 |
| 5 | 1.68 | 3.74 | 5.47 | 10.36 | 0.528 |
| 6 | 1.68 | 4.01 | 5.47 | 11.12 | 0.492 |
| 7 | 1.44 | 4.16 | 4.69 | 11.52 | 0.407 |
| 8 | 1.44 | 2.63 | 4.69 | 7.28 | 0.644 |
| 9 | 1.44 | 2.53 | 4.69 | 7.00 | 0.670 |
| 10 | 1.49 | 4.38 | 4.85 | 12.15 | 0.399 |
| 11 | 1.49 | 3.88 | 4.85 | 10.76 | 0.451 |
| 12 | 1.49 | 2.19 | 4.85 | 6.07 | 0.798 |
| 13 | 1.31 | 3.39 | 4.26 | 9.40 | 0.453 |
| 14 | 1.31 | 2.84 | 4.26 | 7.88 | 0.541 |
| 15 | 1.31 | 4.12 | 4.26 | 11.41 | 0.373 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 7.725 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.515 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.135 |

Πίνακας 7.5.26 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HG | MH | HG | L(MH)/L(HG) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|-------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 15.95 | 13.47 | 39.22 | 43.75 | 0.896 |
| 2 | 8.86 | 13.47 | 21.79 | 43.75 | 0.498 |
| 3 | 19.49 | 13.47 | 47.94 | 43.75 | 1.096 |
| 4 | 20.50 | 12.98 | 50.40 | 42.17 | 1.195 |
| 5 | 17.08 | 12.98 | 42.00 | 42.17 | 0.996 |
| 6 | 16.23 | 12.98 | 39.90 | 42.17 | 0.946 |
| 7 | 14.71 | 13.16 | 36.18 | 42.74 | 0.847 |
| 8 | 24.23 | 13.16 | 59.59 | 42.74 | 1.394 |
| 9 | 20.77 | 13.16 | 51.08 | 42.74 | 1.195 |
| 10 | 15.05 | 15.25 | 37.00 | 49.54 | 0.747 |
| 11 | 17.05 | 15.25 | 41.94 | 49.54 | 0.847 |
| 12 | 28.09 | 15.25 | 69.07 | 49.54 | 1.394 |
| 13 | 16.53 | 13.23 | 40.65 | 42.96 | 0.946 |
| 14 | 19.14 | 13.23 | 47.07 | 42.96 | 1.096 |
| 15 | 14.79 | 13.23 | 36.37 | 42.96 | 0.847 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.940 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.996 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.240 |

Πίνακας 7.5.27 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: ατμών υδραργύρου.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HPS | MH | HPS | L(MH)/L(HPS) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|--|--|--------------|
| | (nW/cm ²) | (nW/cm ²) | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 15.95 | 16.86 | 39.22 | 46.70 | 0.840 |
| 2 | 15.95 | 23.89 | 39.22 | 66.16 | 0.593 |
| 3 | 15.95 | 11.94 | 39.22 | 33.08 | 1.186 |
| 4 | 14.52 | 10.04 | 35.70 | 27.80 | 1.284 |
| 5 | 14.52 | 12.43 | 35.70 | 34.42 | 1.037 |
| 6 | 14.52 | 13.59 | 35.70 | 37.64 | 0.948 |
| 7 | 14.71 | 18.11 | 36.18 | 50.17 | 0.721 |
| 8 | 14.71 | 12.02 | 36.18 | 33.29 | 1.087 |
| 9 | 14.71 | 9.44 | 36.18 | 26.16 | 1.383 |
| 10 | 15.05 | 16.90 | 37.00 | 46.82 | 0.790 |
| 11 | 15.05 | 15.02 | 37.00 | 41.61 | 0.889 |
| 12 | 15.05 | 7.95 | 37.00 | 22.03 | 1.680 |
| 13 | 14.79 | 16.41 | 36.37 | 45.45 | 0.800 |
| 14 | 14.79 | 13.29 | 36.37 | 36.81 | 0.988 |
| 15 | 14.79 | 22.15 | 36.37 | 61.36 | 0.593 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.820 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.988 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.300 |

Πίνακας 7.5.28 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5 cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | HG | HPS | HG | HPS | L(HG)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 13.36 | 18.03 | 43.40 | 49.95 | 0.869 |
| 2 | 13.36 | 28.69 | 43.40 | 79.47 | 0.546 |
| 3 | 13.36 | 13.72 | 43.40 | 38.01 | 1.142 |
| 4 | 12.98 | 12.27 | 42.17 | 33.97 | 1.241 |
| 5 | 12.98 | 14.96 | 42.17 | 41.43 | 1.018 |
| 6 | 12.98 | 16.05 | 42.17 | 44.47 | 0.948 |
| 7 | 12.72 | 19.01 | 41.30 | 52.65 | 0.784 |
| 8 | 12.72 | 12.01 | 41.30 | 33.27 | 1.241 |
| 9 | 12.72 | 11.55 | 41.30 | 31.99 | 1.291 |
| 10 | 13.93 | 21.23 | 45.25 | 58.80 | 0.770 |
| 11 | 13.93 | 18.80 | 45.25 | 52.08 | 0.869 |
| 12 | 13.93 | 10.61 | 45.25 | 29.40 | 1.539 |
| 13 | 12.33 | 16.54 | 40.04 | 45.82 | 0.874 |
| 14 | 12.33 | 13.86 | 40.04 | 38.40 | 1.043 |
| 15 | 12.33 | 20.08 | 40.04 | 55.62 | 0.720 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.895 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.993 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.260 |

Πίνακας 7.5.29 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HG | MH | HG | L(MH)/L(HG) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|-------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 4.28 | 3.66 | 10.53 | 11.90 | 0.885 |
| 2 | 2.38 | 3.66 | 5.85 | 11.90 | 0.492 |
| 3 | 5.23 | 3.66 | 12.87 | 11.90 | 1.081 |
| 4 | 6.10 | 3.92 | 15.00 | 12.72 | 1.180 |
| 5 | 5.08 | 3.92 | 12.50 | 12.72 | 0.983 |
| 6 | 4.83 | 3.92 | 11.88 | 12.72 | 0.934 |
| 7 | 4.16 | 3.77 | 10.23 | 12.24 | 0.836 |
| 8 | 6.85 | 3.77 | 16.85 | 12.24 | 1.376 |
| 9 | 5.87 | 3.77 | 14.44 | 12.24 | 1.180 |
| 10 | 3.78 | 3.88 | 9.29 | 12.61 | 0.737 |
| 11 | 4.28 | 3.88 | 10.53 | 12.61 | 0.836 |
| 12 | 7.05 | 3.88 | 17.35 | 12.61 | 1.376 |
| 13 | 4.26 | 3.46 | 10.49 | 11.23 | 0.934 |
| 14 | 4.94 | 3.46 | 12.14 | 11.23 | 1.081 |
| 15 | 3.82 | 3.46 | 9.38 | 11.23 | 0.836 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.745 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.983 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.237 |

Πίνακας 7.5.30 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: ατμών υδραργύρου.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HPS | MH | HPS | L (MH)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|---------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 4.52 | 4.96 | 11.10 | 13.75 | 0.808 |
| 2 | 4.52 | 7.03 | 11.10 | 19.48 | 0.570 |
| 3 | 4.52 | 3.52 | 11.10 | 9.74 | 1.140 |
| 4 | 4.64 | 3.34 | 11.41 | 9.24 | 1.235 |
| 5 | 4.64 | 4.13 | 11.41 | 11.44 | 0.998 |
| 6 | 4.64 | 4.52 | 11.41 | 12.51 | 0.912 |
| 7 | 4.70 | 6.01 | 11.55 | 16.65 | 0.694 |
| 8 | 4.70 | 3.99 | 11.55 | 11.05 | 1.045 |
| 9 | 4.70 | 3.14 | 11.55 | 8.68 | 1.330 |
| 10 | 4.52 | 5.27 | 11.10 | 14.61 | 0.760 |
| 11 | 4.52 | 4.69 | 11.10 | 12.99 | 0.855 |
| 12 | 4.52 | 2.48 | 11.10 | 6.87 | 1.615 |
| 13 | 4.77 | 5.51 | 11.74 | 15.26 | 0.770 |
| 14 | 4.77 | 4.46 | 11.74 | 12.36 | 0.950 |
| 15 | 4.77 | 7.44 | 11.74 | 20.60 | 0.570 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.250 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.95 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.288 |

Πίνακας 7.5.31 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3 cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | HG | HPS | HG | HPS | L(HG)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 3.66 | 5.08 | 11.90 | 14.07 | 0.846 |
| 2 | 3.66 | 8.08 | 11.90 | 22.38 | 0.532 |
| 3 | 3.66 | 3.86 | 11.90 | 10.70 | 1.112 |
| 4 | 3.92 | 3.80 | 12.72 | 10.52 | 1.209 |
| 5 | 3.92 | 4.63 | 12.72 | 12.83 | 0.991 |
| 6 | 3.92 | 4.97 | 12.72 | 13.77 | 0.923 |
| 7 | 3.77 | 5.79 | 12.24 | 16.03 | 0.764 |
| 8 | 3.77 | 3.66 | 12.24 | 10.13 | 1.209 |
| 9 | 3.77 | 3.52 | 12.24 | 9.74 | 1.257 |
| 10 | 3.88 | 6.07 | 12.61 | 16.82 | 0.749 |
| 11 | 3.88 | 5.38 | 12.61 | 14.90 | 0.846 |
| 12 | 3.88 | 3.04 | 12.61 | 8.41 | 1.499 |
| 13 | 3.46 | 4.76 | 11.23 | 13.20 | 0.851 |
| 14 | 3.46 | 3.99 | 11.23 | 11.06 | 1.015 |
| 15 | 3.46 | 5.78 | 11.23 | 16.02 | 0.701 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 14.505 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.967 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.253 |

Πίνακας 7.5.32 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HG | MH | HG | L(MH)/L(HG) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|-------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 2.90 | 2.74 | 7.14 | 8.89 | 0.803 |
| 2 | 1.61 | 2.74 | 3.97 | 8.89 | 0.446 |
| 3 | 3.55 | 2.74 | 8.72 | 8.89 | 0.981 |
| 4 | 3.95 | 2.80 | 9.72 | 9.08 | 1.070 |
| 5 | 3.29 | 2.80 | 8.10 | 9.08 | 0.892 |
| 6 | 3.13 | 2.80 | 7.70 | 9.08 | 0.847 |
| 7 | 2.71 | 2.71 | 6.67 | 8.79 | 0.758 |
| 8 | 4.47 | 2.71 | 10.98 | 8.79 | 1.249 |
| 9 | 3.83 | 2.71 | 9.41 | 8.79 | 1.070 |
| 10 | 2.41 | 2.73 | 5.92 | 8.85 | 0.669 |
| 11 | 2.73 | 2.73 | 6.71 | 8.85 | 0.758 |
| 12 | 4.50 | 2.73 | 11.05 | 8.85 | 1.249 |
| 13 | 3.08 | 2.76 | 7.58 | 8.95 | 0.847 |
| 14 | 3.57 | 2.76 | 8.78 | 8.95 | 0.981 |
| 15 | 2.76 | 2.76 | 6.78 | 8.95 | 0.758 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 13.380 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.892 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.215 |

Πίνακας 7.5.33 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: ατμών υδραργύρου.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HPS | MH | HPS | L (MH)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|---------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 3.33 | 5.03 | 8.19 | 13.93 | 0.588 |
| 2 | 3.33 | 7.13 | 8.19 | 19.74 | 0.415 |
| 3 | 3.33 | 3.56 | 8.19 | 9.87 | 0.830 |
| 4 | 3.22 | 3.17 | 7.91 | 8.79 | 0.900 |
| 5 | 3.22 | 3.93 | 7.91 | 10.88 | 0.727 |
| 6 | 3.22 | 4.30 | 7.91 | 11.90 | 0.664 |
| 7 | 3.06 | 5.38 | 7.52 | 14.89 | 0.505 |
| 8 | 3.06 | 3.57 | 7.52 | 9.88 | 0.761 |
| 9 | 3.06 | 2.80 | 7.52 | 7.76 | 0.969 |
| 10 | 3.18 | 5.09 | 7.81 | 14.11 | 0.554 |
| 11 | 3.18 | 4.53 | 7.81 | 12.54 | 0.623 |
| 12 | 3.18 | 2.40 | 7.81 | 6.64 | 1.176 |
| 13 | 3.22 | 5.11 | 7.93 | 14.15 | 0.561 |
| 14 | 3.22 | 4.14 | 7.93 | 11.46 | 0.692 |
| 15 | 3.22 | 6.90 | 7.93 | 19.10 | 0.415 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 10.380 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.692 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.210 |

Πίνακας 7.5.34 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1 cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | HG | HPS | HG | HPS | L (MH)/L (HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|----------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 2.74 | 4.74 | 8.89 | 13.13 | 0.677 |
| 2 | 2.74 | 7.54 | 8.89 | 20.88 | 0.426 |
| 3 | 2.74 | 3.61 | 8.89 | 9.99 | 0.890 |
| 4 | 2.80 | 3.39 | 9.08 | 9.39 | 0.968 |
| 5 | 2.80 | 4.13 | 9.08 | 11.45 | 0.793 |
| 6 | 2.80 | 4.44 | 9.08 | 12.29 | 0.739 |
| 7 | 2.71 | 5.19 | 8.79 | 14.38 | 0.611 |
| 8 | 2.71 | 3.28 | 8.79 | 9.09 | 0.968 |
| 9 | 2.71 | 3.16 | 8.79 | 8.74 | 1.006 |
| 10 | 2.73 | 5.33 | 8.85 | 14.76 | 0.600 |
| 11 | 2.73 | 4.72 | 8.85 | 13.07 | 0.677 |
| 12 | 2.73 | 2.66 | 8.85 | 7.38 | 1.200 |
| 13 | 2.76 | 4.74 | 8.95 | 13.14 | 0.681 |
| 14 | 2.76 | 3.97 | 8.95 | 11.01 | 0.813 |
| 15 | 2.76 | 5.76 | 8.95 | 15.95 | 0.561 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 11.610 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.774 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.203 |

Πίνακας 7.5.35 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HG | MH | HG | L(MH)/L(HG) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|-------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 1.03 | 1.09 | 2.54 | 3.55 | 0.716 |
| 2 | 0.57 | 1.09 | 1.41 | 3.55 | 0.398 |
| 3 | 1.26 | 1.09 | 3.11 | 3.55 | 0.876 |
| 4 | 1.71 | 1.36 | 4.21 | 4.41 | 0.955 |
| 5 | 1.43 | 1.36 | 3.51 | 4.41 | 0.796 |
| 6 | 1.36 | 1.36 | 3.33 | 4.41 | 0.756 |
| 7 | 1.33 | 1.49 | 3.28 | 4.84 | 0.677 |
| 8 | 2.19 | 1.49 | 5.39 | 4.84 | 1.114 |
| 9 | 1.88 | 1.49 | 4.62 | 4.84 | 0.955 |
| 10 | 1.09 | 1.38 | 2.67 | 4.48 | 0.597 |
| 11 | 1.23 | 1.38 | 3.03 | 4.48 | 0.677 |
| 12 | 2.03 | 1.38 | 4.99 | 4.48 | 1.114 |
| 13 | 1.45 | 1.45 | 3.57 | 4.72 | 0.756 |
| 14 | 1.68 | 1.45 | 4.14 | 4.72 | 0.876 |
| 15 | 1.30 | 1.45 | 3.20 | 4.72 | 0.677 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 11.9 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.796 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.192 |

Πίνακας 7.5.36 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: ατμών υδραργύρου.

| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | MH | HPS | MH | HPS | L(MH)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 245.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 1.03 | 2.64 | 2.54 | 7.32 | 0.348 |
| 2 | 1.03 | 3.74 | 2.54 | 10.37 | 0.245 |
| 3 | 1.03 | 1.87 | 2.54 | 5.18 | 0.491 |
| 4 | 1.71 | 2.86 | 4.21 | 7.92 | 0.532 |
| 5 | 1.71 | 3.54 | 4.21 | 9.81 | 0.429 |
| 6 | 1.71 | 3.87 | 4.21 | 10.73 | 0.393 |
| 7 | 1.33 | 3.96 | 3.28 | 10.97 | 0.299 |
| 8 | 1.33 | 2.63 | 3.28 | 7.28 | 0.450 |
| 9 | 1.33 | 2.07 | 3.28 | 5.72 | 0.573 |
| 10 | 1.09 | 2.95 | 2.67 | 8.17 | 0.327 |
| 11 | 1.09 | 2.62 | 2.67 | 7.26 | 0.368 |
| 12 | 1.09 | 1.39 | 2.67 | 3.85 | 0.695 |
| 13 | 1.45 | 3.89 | 3.57 | 10.78 | 0.331 |
| 14 | 1.45 | 3.15 | 3.57 | 8.73 | 0.409 |
| 15 | 1.45 | 5.25 | 3.57 | 14.55 | 0.245 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 6.135 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.409 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.124 |

Πίνακας 7.5.37 Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1cd/m². Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου.

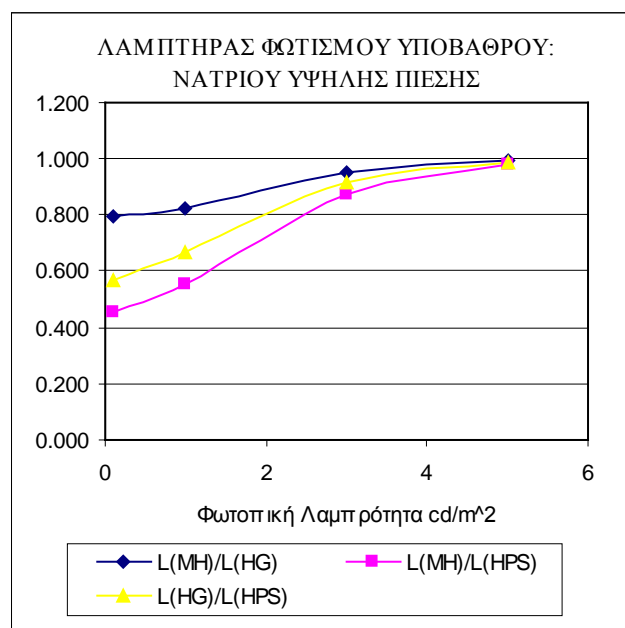
| ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗΣ | HG | HPS | HG | HPS | L(HG)/L(HPS) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------|
| | nW/cm ² | nW/cm ² | $\frac{mW}{m^2} \cdot 324.7 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | $\frac{mW}{m^2} \cdot 276.9 \cdot \frac{lux}{W/m^2}$ | |
| 1 | 1.29 | 3.38 | 4.21 | 9.35 | 0.450 |
| 2 | 1.29 | 5.37 | 4.21 | 14.88 | 0.283 |
| 3 | 1.29 | 2.57 | 4.21 | 7.11 | 0.591 |
| 4 | 1.68 | 3.07 | 5.47 | 8.51 | 0.643 |
| 5 | 1.68 | 3.75 | 5.47 | 10.38 | 0.527 |
| 6 | 1.68 | 4.02 | 5.47 | 11.14 | 0.491 |
| 7 | 1.50 | 4.32 | 4.86 | 11.98 | 0.406 |
| 8 | 1.50 | 2.73 | 4.86 | 7.57 | 0.643 |
| 9 | 1.44 | 2.53 | 4.69 | 7.02 | 0.668 |
| 10 | 1.49 | 4.39 | 4.85 | 12.17 | 0.398 |
| 11 | 1.49 | 3.89 | 4.85 | 10.78 | 0.450 |
| 12 | 1.55 | 2.28 | 5.03 | 6.31 | 0.797 |
| 13 | 1.48 | 3.83 | 4.79 | 10.60 | 0.452 |
| 14 | 1.48 | 3.21 | 4.79 | 8.88 | 0.540 |
| 15 | 1.48 | 4.64 | 4.79 | 12.86 | 0.373 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | | | | | 7.710 |
| ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ | | | | | 0.514 |
| ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ | | | | | 0.134 |

Από τους πίνακες αυτούς κατασκευάζεται ο πίνακας 8.38 στον οποίο παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων για κάθε περίπτωση.

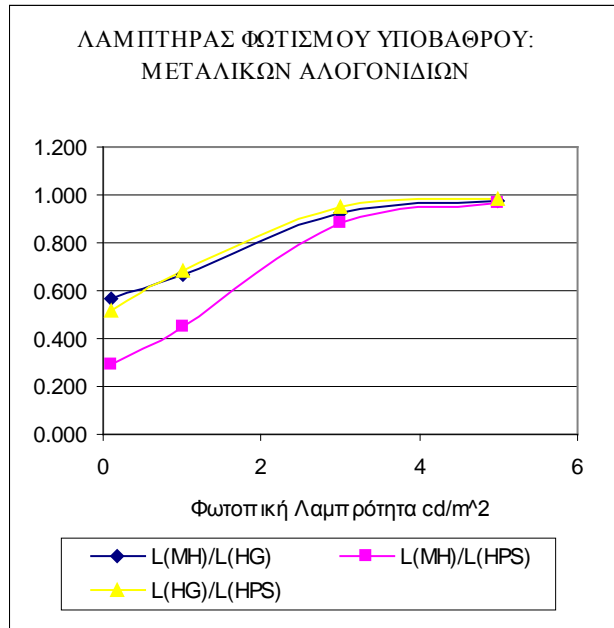
Πίνακας 7.5.3 8 Μέσοι όροι των λόγων ισοδύναμων λαμπροτήτων για τους τρεις φωτισμούς υποβάθρου και τα αντίστοιχα επίπεδα λαμπρότητας.

| ΦΩΤΙΣΜΟΣ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ | ΛΑΜΠΡΟΤΗΤΑ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ (φωτοπικές cd/m ²) | L(MH)/L(HG) | L(MH)/L(HPS) | L(HG)/L(HPS) |
|--------------------|---|-------------|--------------|--------------|
| HG | 0.1 | 0.796 | 0.409 | 0.514 |
| | 1 | 0.892 | 0.692 | 0.774 |
| | 3 | 0.983 | 0.95 | 0.967 |
| | 5 | 0.996 | 0.988 | 0.993 |
| MH | 0.1 | 0.563 | 0.29 | 0.515 |
| | 1 | 0.665 | 0.453 | 0.682 |
| | 3 | 0.928 | 0.881 | 0.949 |
| | 5 | 0.977 | 0.965 | 0.986 |
| HPS | 0.1 | 0.794 | 0.451 | 0.567 |
| | 1 | 0.827 | 0.554 | 0.669 |
| | 3 | 0.95 | 0.872 | 0.918 |
| | 5 | 0.991 | 0.978 | 0.986 |

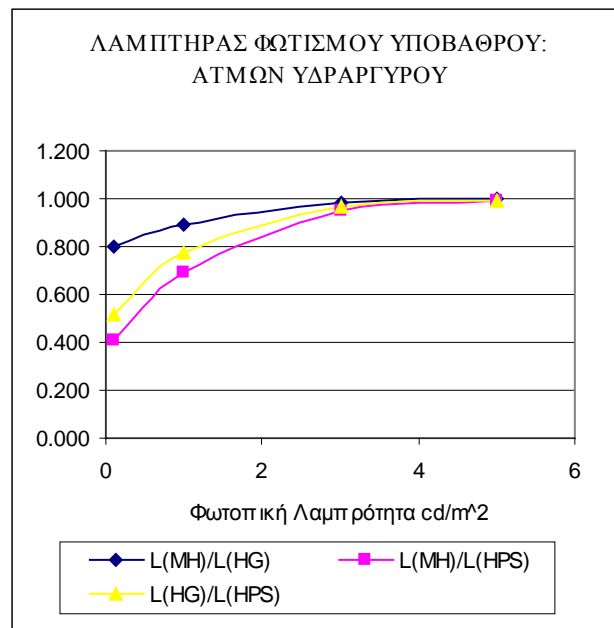
Στα σχήματα 7.5.1 έως 7.5.3 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των λόγων των ισοδύναμων λαμπροτήτων των λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων - νατρίου υψηλής πίεσης (L(MH)/L(HPS)), ατμών υδραργύρου - νατρίου υψηλής πίεσης (L(HG)/L(HPS)) και μεταλλικών αλογονιδίων - ατμών υδραργύρου (L(MH)/L(HG)) συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας του υποβάθρου.



Σχήμα 7.5.1 Λόγοι ισοδύναμων λαμπροτήτων (L(MH)/L(HPS)), (L(HG)/L(HPS)) και (L(MH)/L(HG)) συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας το υ υποβάθρου πο υ δημιουργείται με φωτισμό από λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης.



Σχήμα 7.5.2 Λόγοι ισοδυνάμων λαμπροτήτων (L(MH)/L(HPS)), (L(HG)/L(HPS)) και (L(MH)/L(HG)) συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας του υποβάθρου που δημιουργείται με φωτισμό από λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων.



Σχήμα 7.5.3 Λόγοι ισοδυνάμων λαμπροτήτων (L(MH)/L(HPS)), (L(HG)/L(HPS)) και (L(MH)/L(HG)) συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας του υποβάθρου που δημιουργείται με φωτισμό από λαμπτήρα ατμών υδραργύρου.

Παρατηρούμε από τα διαγράμματα ότι οι γραφικές παραστάσεις δε τέμνονται και μεταβάλλονται ομαλά. Ο λόγος L(HG)/L(HPS) έχει τιμές πάντα ανάμεσα στις τιμές των λόγων L(MH)/L(HPS) και L(MH)/L(HG). Επίσης φαίνεται ότι σε τιμές

κοντά στις 5cd/m^2 , οι λόγοι έχουν τιμές κοντά στη μονάδα, πράγμα που σημαίνει ότι μετά από αυτή τη τιμή η όραση είναι σχεδόν φωτοπική. Είναι φανερός επίσης ο ρόλος της φασματικής κατανομής της ακτινοβολίας που δημιουργεί το υπόβαθρο, οι τιμές των λόγων, στις αντίστοιχες τιμές λαμπρότητας, είναι διαφορετικές για κάθε υπόβαθρο. Με άλλα λόγια, ο οφθαλμός του παρατηρητή προσαρμόζεται σε διαφορετική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας. Δηλαδή, ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται διαφορετική μεσοπική λαμπρότητα παρά το γεγονός ότι οι φωτοπικές τιμές λαμπρότητας είναι ίδιες. Αυτό οφείλεται στο ότι οι φωτίζουσες ακτινοβολίες έχουν διαφορετικές φασματικές κατανομές, με αποτέλεσμα να δημιουργούν διαφορετική μεσοπική λαμπρότητα παρά το γεγονός ότι έχουν την ίδια φωτοπική.

Τα πειραματικά αποτελέσματα έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τη θέση της διδακτορικής διατριβής. Δηλαδή ότι κατά τη μελέτη της μεσοπικής όρασης η φασματική κατανομή της πηγής αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα. Όπως επίσης επιβεβαιώνεται και η θέση ότι τα αποτελέσματα μιας πειραματικής διαδικασίας στη μεσοπική περιοχή ισχύουν για τις συγκεκριμένες και μόνο συνθήκες στις οποίες πραγματοποιήθηκε το πείραμα.

7.6 Πρόταση μοντέλου για τη μεσοπική όραση

Οι λόγοι που βρέθηκαν πειραματικά ($L(MH)/L(HPS)$), ($L(HG)/L(HPS)$) και ($L(MH)/L(HG)$) επειδή η γεωμετρία είναι ίδια σε κάθε περίπτωση οι λόγοι φωτοπικών λαμπροτήτων των στόχων είναι ίσοι με τους λόγους των φωτεινών ροών που εκπέμπουν οι στόχοι και με τους λόγους φωτισμού που προκαλούν οι στόχοι στο στη μετρητική συσκευή. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} \frac{L(MH)}{L(HPS)} &= \frac{\Phi(MH)}{\Phi(HPS)} = \frac{E(MH)}{E(HPS)} \\ \frac{L(HG)}{L(HPS)} &= \frac{\Phi(HG)}{\Phi(HPS)} = \frac{E(HG)}{E(HPS)} \\ \frac{L(MH)}{L(HG)} &= \frac{\Phi(MH)}{\Phi(HG)} = \frac{E(MH)}{E(HG)} \end{aligned} \quad 7.6.1$$

Επίσης εκφράζουν τους λόγους φωτοπικών λαμπροτήτων ώστε στη δεδομένη φωτοπική λαμπρότητα υποβάθρου οι μεσοπικές λαμπρότητες των στόχων να είναι ίδιες. Αυτό σημαίνει ότι αν η μεσοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας εφαρμοσθεί στις φασματικές κατανομές των πηγών θα πρέπει αριθμητικά το αποτέλεσμα να είναι το ίδιο.

$$\begin{aligned} L'' &= \int_{380}^{830} K''(\lambda) \cdot L_{e,(HPS)}(\lambda) d\lambda = \\ &= \int_{380}^{830} K''(\lambda) \cdot L_{e,(MH)}(\lambda) d\lambda = \\ &= \int_{380}^{830} K''(\lambda) \cdot L_{e,(HG)}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad 7.6.2$$

Το ζητούμενο καταρχήν είναι να υπολογισθούν οι ποσότητες ενέργειας τις οποίες εκπέμπουν οι στόχοι. Επειδή είναι γνωστές οι κανονικοποιημένες φασματικές κατανομές διαιρώντας την ποσότητα ενέργειας που αποδίδει η πηγή με την ποσότητα ενέργειας που προκύπτει από τη κανονικοποιημένη φασματική κατανομή βρίσκεται ένας συντελεστής, ο οποίος ορίζεται από τη σχέση:

$$P_e(\lambda) = f \cdot P_e^{norm}(\lambda) \quad 7.6.3$$

Πολλαπλασιάζοντας την 7.6.3 με $K(\lambda)$ και ολοκληρώνοντας στο ορατό φάσμα προκύπτει ότι:

$$\Phi = f \cdot \Phi^{norm} \quad 7.6.4$$

Για να βρούμε τις ποσότητες ενέργειας που εκπέμπει κάθε στόχος ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

Καταρχήν με τη βοήθεια των λόγων φωτοπικών λαμπροτήτων είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε τη λαμπρότητα κάθε στόχου. Αυτό γίνεται θεωρώντας τη λαμπρότητα του στόχου που φωτίζεται με τον ίδιο λαμπτήρα που φωτίζεται και το υπόβαθρο ίση με τη λαμπρότητα υποβάθρου σε κάθε επίπεδο λαμπρότητας. Οι πίνακες 7.6.1 έως 7.6.3 δίνουν τις λαμπρότητες των στόχων για τους τρεις φωτισμούς υποβάθρου και στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας.

Πίνακας 7.6.1 Λαμπρότητες στόχων για φωτισμό υποβάθρου με λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας.

| HPS | MH | HG |
|-----|-------|-------|
| 0.1 | 0.045 | 0.056 |
| 1 | 0.554 | 0.669 |
| 3 | 2.616 | 2.754 |
| 5 | 4.890 | 4.930 |

Πίνακας 7.6.2 Λαμπρότητες στόχων για φωτισμό υποβάθρου με λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας.

| HPS | MH | HG |
|-------|-----|-------|
| 0.344 | 0.1 | 0.177 |
| 2.207 | 1 | 1.503 |
| 3.405 | 3 | 3.232 |
| 5.181 | 5 | 5.117 |

Πίνακας 7.6.3 Λαμπρότητες στόχων για φωτισμό υποβάθρου με λαμπτήρα ατμών υδραργύρου στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας.

| HPS | MH | HG |
|-------|-------|-----|
| 0.194 | 0.079 | 0.1 |
| 1.291 | 0.892 | 1 |
| 3.102 | 2.949 | 3 |
| 5.035 | 4.980 | 5 |

Με δεδομένο ότι οι επιφάνειες των στόχων είναι Lambertian τότε η λαμπρότητα θα είναι ανάλογη της φωτεινής ροής που εκπέμπει αυτοί, με συντελεστή αναλογίας τον Γεωμετρικό παράγοντα F [90, 91]. Επίσης είναι δεδομένο ότι οι στόχοι γίνονται ορατοί από το παρατηρητή με την ίδια ακριβώς γεωμετρία, άρα ο F είναι σταθερός για κάθε στόχο και κάθε επίπεδο λαμπρότητας. Οπότε θα έχουμε:

$$L = F \cdot \Phi = F \cdot f \cdot \Phi^{norm} \quad 7.6.5$$

Άρα:

$$f \cdot F = \frac{L}{\Phi^{norm}} \quad 7.6.6$$

Άρα ο λόγος L/Φ μας δίνει το γινόμενο $f \cdot F$. Στους πίνακες 7.6.4 έως 7.6.6 δίνεται το γινόμενο αυτό για κάθε επίπεδο φωτισμού και κάθε φωτεινό υπόβαθρο.

Πίνακας 7.6.4 Το γινόμενο $f \cdot F$ για φωτισμό υποβάθρου με λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας.

| L cd/m ² | HPS | MH | HG |
|---------------------|----------|----------|----------|
| 0.1 | 6.45E-06 | 2.34E-06 | 6.60E-06 |
| 1 | 6.45E-05 | 2.87E-05 | 7.79E-05 |
| 3 | 1.93E-04 | 1.35E-04 | 3.21E-04 |
| 5 | 3.22E-04 | 2.53E-04 | 5.74E-04 |

Πίνακας 7.6.5 Το γινόμενο $f \cdot F$ για φωτισμό υποβάθρου με λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας.

| L cd/m ² | HPS | MH | HG |
|---------------------|----------|----------|----------|
| 0.1 | 2.37E-05 | 5.74E-06 | 2.07E-05 |
| 1 | 1.52E-04 | 5.74E-05 | 1.75E-04 |
| 3 | 2.34E-04 | 1.72E-04 | 3.76E-04 |
| 5 | 3.57E-04 | 2.87E-04 | 5.96E-04 |

Πίνακας 7.6.6 Το γινόμενο $f \cdot F$ για φωτισμό υποβάθρου με λαμπτήρα ατμών υδραργύρου στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας.

| L cd/m ² | HPS | MH | HG |
|---------------------|----------|----------|----------|
| 0.1 | 1.34E-05 | 4.12E-06 | 1.19E-05 |
| 1 | 8.89E-05 | 4.62E-05 | 1.19E-04 |
| 3 | 2.13E-04 | 1.53E-04 | 3.58E-04 |
| 5 | 3.46E-04 | 2.58E-04 | 5.97E-04 |

Επομένως η μεσοπική λαμπρότητα θα είναι

$$L'' = F \cdot \Phi'' \quad 7.6.7$$

Δηλαδή

$$L'' = F \cdot f \cdot \Phi''^{norm} \quad 7.6.8$$

Αντικαθιστώντας την 7.6.6 λαμβάνουμε:

$$L'' = \frac{L}{\Phi^{norm}} \cdot \Phi''^{norm} \quad 7.6.9$$

Η μεσοπική ροή θα δίνεται από τη σχέση

$$\Phi'' = \int_{380}^{830} K''(\lambda) \cdot P_e(\lambda) d\lambda \quad 7.6.10$$

Οπότε:

$$L'' = \frac{L}{\Phi^{norm}} \cdot \int_{380}^{830} K''(\lambda) \cdot P_e(\lambda) d\lambda \quad 7.6.11$$

Η $K''(\lambda)$ δίνεται από τη σχέση:

$$K''(\lambda) = x \cdot K(\lambda) + (1-x) \cdot K^y(\lambda) \cdot K'^{(1-y)}(\lambda) \quad 7.6.12$$

Άρα για να υπολογισθεί η μεσοπική λαμπρότητα θα πρέπει να υπολογισθούν τα x και y . Αυτό είναι δυνατό γιατί οι ξέρουμε ότι στις συνθήκες οπτικής ταύτισης οι μεσοπικές λαμπρότητες έχουν ίδια τιμή. Σε συνδυασμό με την 7.6.9 προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} L'' &= \frac{L(MH)}{\Phi^{norm}(MH)} \cdot \Phi_s^{norm}(MH) = \\ &= \frac{L(HG)}{\Phi^{norm}(HG)} \cdot \Phi^{norm}(HG) = \\ &= \frac{L(HPS)}{\Phi^{norm}(HPS)} \cdot \Phi^{norm}(HPS) \end{aligned} \quad 7.6.13$$

Με χρήση της 7.6.10 προκύπτει:

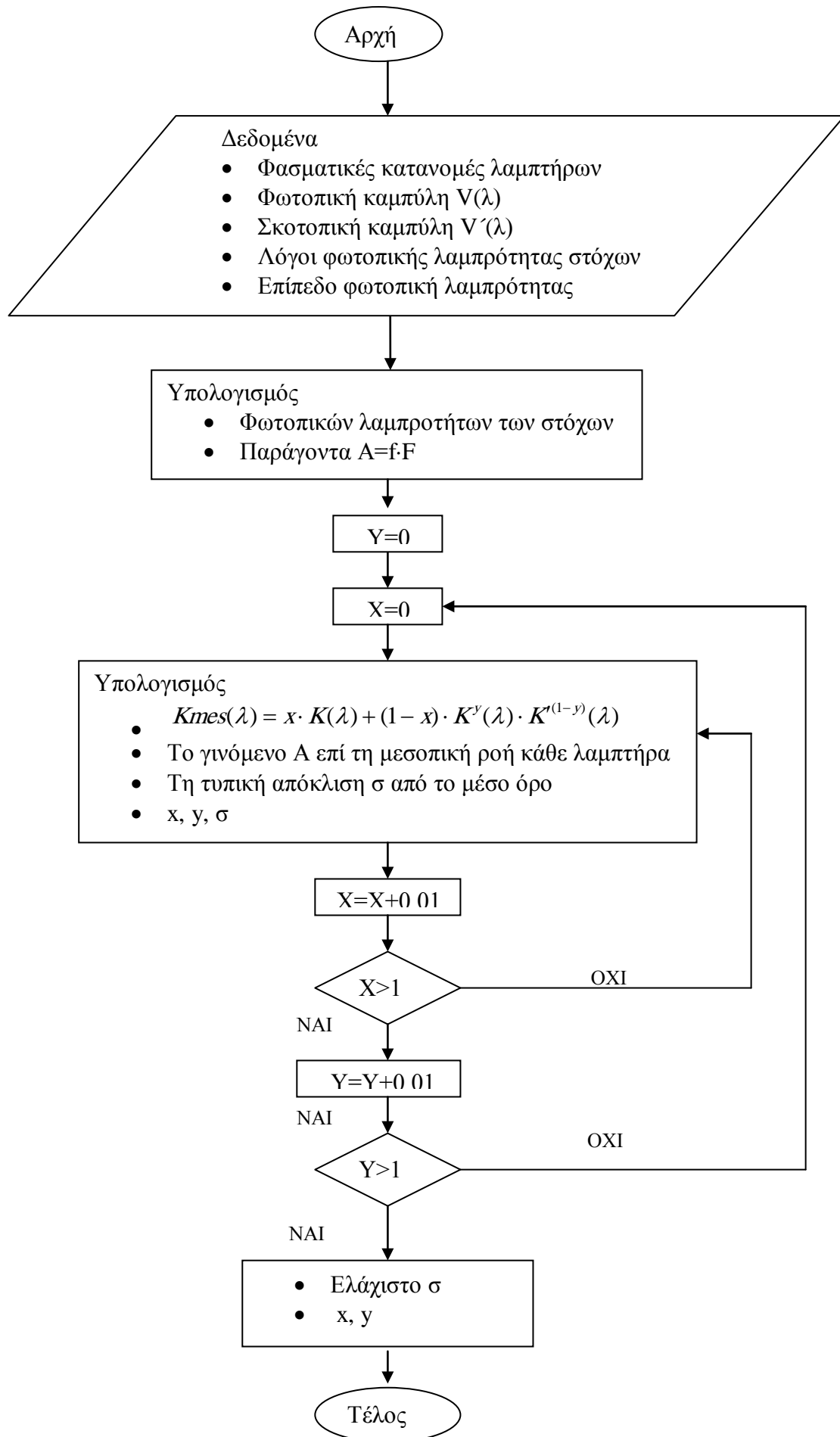
$$\begin{aligned} L'' &= \frac{L(MH)}{\Phi^{norm}(MH)} \cdot \int_{380}^{830} K''(\lambda) \cdot P_{e,(MH)}^{norm}(\lambda) d\lambda = \\ &= \frac{L(HG)}{\Phi^{norm}(HG)} \cdot \int_{380}^{830} K''(\lambda) \cdot P_{e,(HG)}^{norm}(\lambda) d\lambda = \\ &= \frac{L(HPS)}{\Phi^{norm}(HPS)} \cdot \int_{380}^{830} K''(\lambda) \cdot P_{e,(HPS)}^{norm}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad 7.6.14$$

Επομένως το πρόβλημα μετατίθεται στο να βρεθούν x και y από τα οποία θα κατασκευασθεί η K'' που να ικανοποιεί τις εξισώσεις 7.6.14.

Με δεδομένο ότι ο όρος L έχει προσδιορισθεί πειραματικά και ως εκ τούτου υπόκειται σε σφάλματα η 7.6.14 δεν είναι δυνατόν να ικανοποιηθεί ακριβώς. Έτσι λοιπόν το πρόβλημα μετατίθεται στην εύρεση x και y τέτοιων ώστε οι μεσοπικές λαμπρότητες των τριών λαμπτήρων να είναι περίπου ίσες.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στη παρούσα διατριβή είναι η εξής:

Με τη βοήθεια φύλλων εργασίας του Microsoft excel και λογισμικού σε visual basic είναι δυνατόν να βρεθεί η $K''(\lambda)$ για συγκεκριμένες τιμές των x και y . Ακολούθως υπολογίζεται η μεσοπική λαμπρότητα για κάθε λαμπτήρα. Υπολογίζεται ο μέσος όρος των λαμπροτήτων και στη συνέχεια η τυπική απόκλιση. Αυτό γίνεται για όλα τα ζεύγη x και y από το ζεύγος (0,0) έως το (1,1) με βήμα 0,01 για κάθε μεταβλητή. Επιλέγεται το ζευγάρι που δίνει τη μικρότερη δυνατή απόκλιση. Αυτό επαναλαμβάνεται για κάθε επίπεδο λαμπρότητας. Στο σχήμα 7.6.1 δίνεται το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στη περίπτωση αυτή. Ανάλογα φύλλα και λογισμικό χρησιμοποιήθηκαν και στις άλλες περιπτώσεις.



Σχήμα 7.6.1 Λογικό διάγραμμα εύρεσης των μεταβλητών x, y

Με αυτό τον τρόπο υπολογίζονται τα x και y για κάθε λαμπτήρα υποβάθρου και κάθε επίπεδο λαμπρότητας. Στο πίνακα 7.6.7 δίνονται τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου για κάθε λαμπτήρα φωτισμού υποβάθρου και κάθε επίπεδο λαμπρότητας.

Πίνακας 7.6.7 Τιμές των x και y για κάθε λαμπτήρα φωτισμού υποβάθρου και κάθε επίπεδο λαμπρότητας.

| L cd/m ² | ΛΑΜΠΤΗΡΑΣ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ HPS | | ΛΑΜΠΤΗΡΑΣ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ MH | | ΛΑΜΠΤΗΡΑΣ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ HG | |
|---------------------|-------------------------------|------|------------------------------|------|------------------------------|------|
| | y | x | y | x | y | x |
| 0.1 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 |
| 1 | 0.08 | 0.19 | 0.07 | 0.27 | 0.06 | 0.48 |
| 3 | 0.12 | 0.76 | 0.16 | 0.85 | 0.13 | 0.91 |
| 5 | 0.10 | 0.96 | 0.12 | 0.96 | 0.13 | 0.98 |

Στη συνέχεια θα πρέπει να βρεθεί μια συνάρτηση που να εκφράζει τον τρόπο μεταβολής των x και y σε σχέση με τη φωτοπική λαμπρότητα. Δηλαδή να βρεθούν οι συναρτήσεις $x=f(L)$ και $y=g(L)$. Αυτό μπορεί να γίνει με ένα από τα πολλά λογισμικά πακέτα που διατίθενται στο διαδίκτυο, στη προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το DATA FIT ver. 9.0.59 της Oakdale Engineering. Τα πειραματικά αποτελέσματα πρέπει επίσης να συμπληρωθούν κατά τρόπο να ικανοποιούν την απαίτηση που υπάρχει η όραση να είναι φωτοπική για λαμπρότητες μεγαλύτερες από 10cd/m² και σκοτοπική για λαμπρότητα μικρότερη από 0,001cd/m². Για να γίνει αυτό θα πρέπει η τιμή του y και του x να είναι μηδέν όταν $L=0,001cd/m^2$, οπότε η 7.6.12 ως φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού την σκοτοπική φασματική ευαισθησία. Επίσης το x πρέπει να είναι ίσο με τη μονάδα όταν $L=10cd/m^2$ ώστε η 7.6.12 ως φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού την φωτοπική φασματική ευαισθησία.

Τα αποτελέσματα του λογισμικού έδωσαν για τη μεταβλητή y συνάρτηση της μορφής:

$$y = a \cdot b^L \cdot L^c \quad 7.6.15$$

Ενώ για τη μεταβλητή x συνάρτηση της μορφής:

$$x = 1 - \exp(-d \cdot L^f) \quad 7.6.16$$

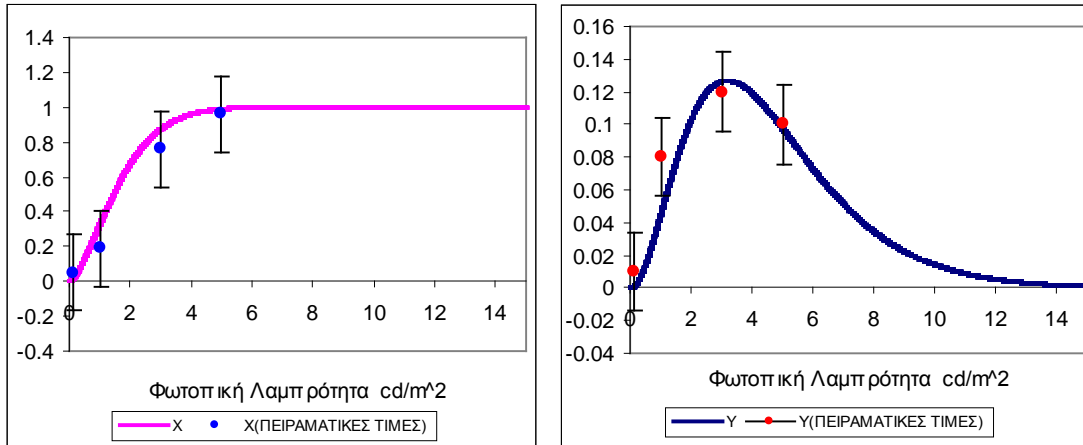
Οι τιμές των σταθερών a, b, c, d και f για κάθε λαμπτήρα υποβάθρου δίνονται στο πίνακα 7.6.8 Παρατηρούμε από το πίνακα 7.6.8 ότι οι τιμές των σταθερών διαφέρουν για κάθε τύπο υποβάθρου. Αυτό σημαίνει ότι οι μεταβλητές x και y σε κάθε τύπο υποβάθρου εκφράζονται από διαφορετικές συναρτήσεις που όμως είναι της

ίδιας μορφής. Αυτό ήταν όμως αναμενόμενο και θα συζητηθεί στη συνέχεια της διατριβής.

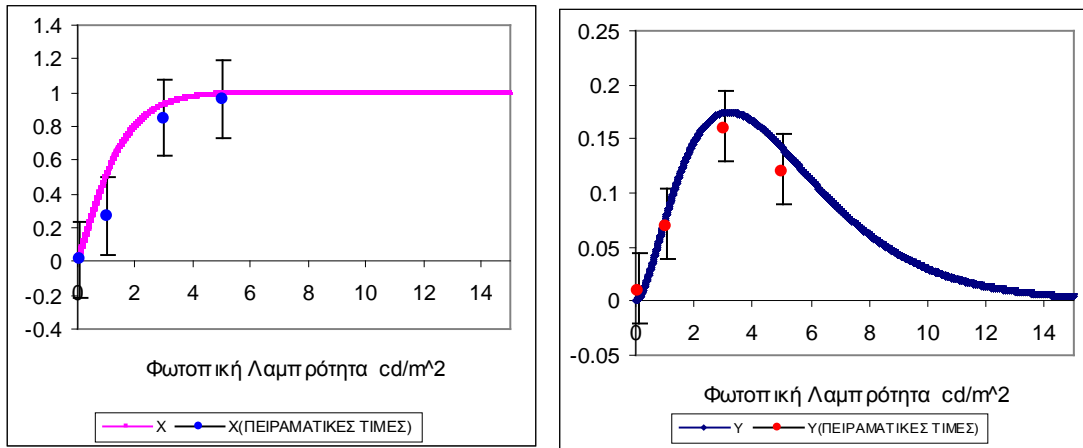
Πίνακας 7.6.8 Οι τιμές των σταθερών a, b, c, d και f των εξισώσεων x,y για κάθε λαμπτήρα υποβάθρου.

| ΤΥΠΟΣ ΛΑΜΠΤΗΡΑ | $y = a \cdot b^L \cdot L^c$ | | | $x = 1 - \exp(-d \cdot L^f)$ | |
|-------------------|-----------------------------|------|------|------------------------------|-----|
| | a | b | c | d | f |
| HPS | 0.09 | 0.5 | 2.2 | 0.4 | 1.5 |
| MH | 0.13 | 0.57 | 0.18 | 0.7 | 1.2 |
| HG | 0.1 | 0.65 | 1.5 | 0.5 | 1.3 |

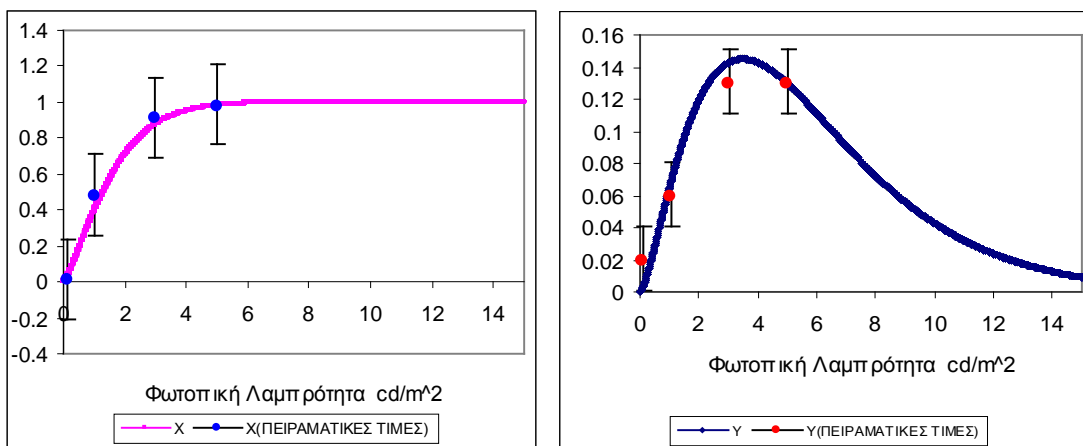
Στα σχήματα 7.6.2 έως 7.6.4 δίνονται οι γραφικές παραστάσεις των x και y για κάθε περίπτωση υποβάθρου, ενώ παράλληλα παρίστανται και οι πειραματικά προσδιορισμένες τιμές. Από αυτά μπορεί να φανεί ότι η προσέγγιση είναι πολύ ικανοποιητική. Στο σχήμα 7.6.5 παριστάνονται οι γραφικές παραστάσεις όλων των συναρτήσεων y και στο 7.6.6 παριστάνονται οι γραφικές παραστάσεις όλων των συναρτήσεων x. Από τα διαγράμματα αυτά φαίνεται ότι κάθε καμπύλη ενώ είναι της ίδιας μορφής με τις άλλες παροικιάζει διαφορές. Παρατηρούμε από τη κοινή παράσταση των παραμέτρων x (σχήμα 7.6.6) ότι η παράμετρος x για το λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων συγκλίνει ταχύτερα στη μονάδα από ότι οι παράμετροι για τις άλλες φασματικές κατανομές. Επειδή το x αποτελεί το συντελεστή της φωτοπικής καμπύλης αυτό σημαίνει ότι ο λαμπτήρας των μεταλλικών αλογονιδίων προκαλεί προσαρμογή στη φωτοπική καμπύλη για χαμηλότερες τιμές φωτοπικής λαμπρότητας από ότι οι άλλες λαμπτήρες. Αυτό έρχεται σε συμφωνία και με άλλες έρευνες σχετικές με την συγκριτική απόδοση αυτών των λαμπτήρων. Επίσης παρατηρείται ότι οι καμπύλες x, y του λαμπτήρα ατμών υδραργύρου βρίσκεται ανάμεσα στις καμπύλες των άλλων δύο λαμπτήρων. Αυτό συμφωνεί και με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών (Andrian, Lewis), οι οποίοι βρίσκουν την απόδοση του λαμπτήρα ατμών υδραργύρου στη μεσοπική περιοχή, ανάμεσα στην απόδοση του λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης.



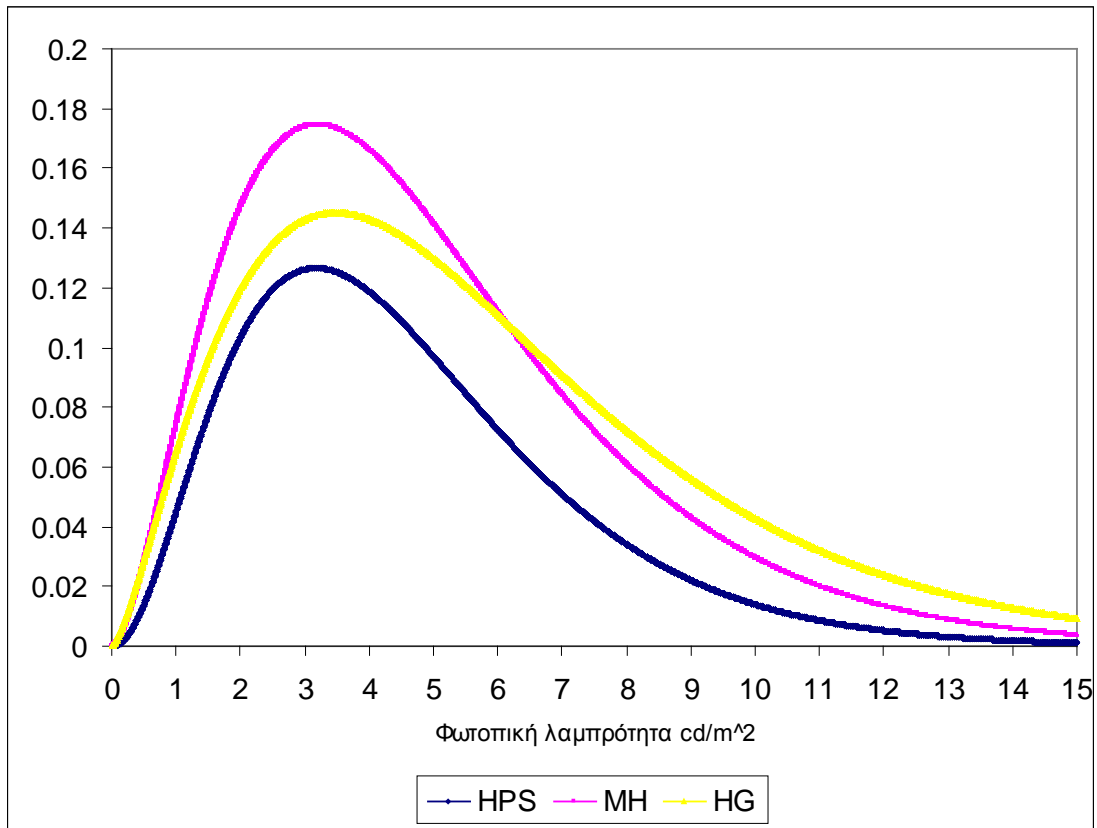
Σχήμα 7.6.2 Γραφική παράσταση των συναρτήσεων x και y στη περίπτωση φασματικής κατανομής που παράγεται από λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης



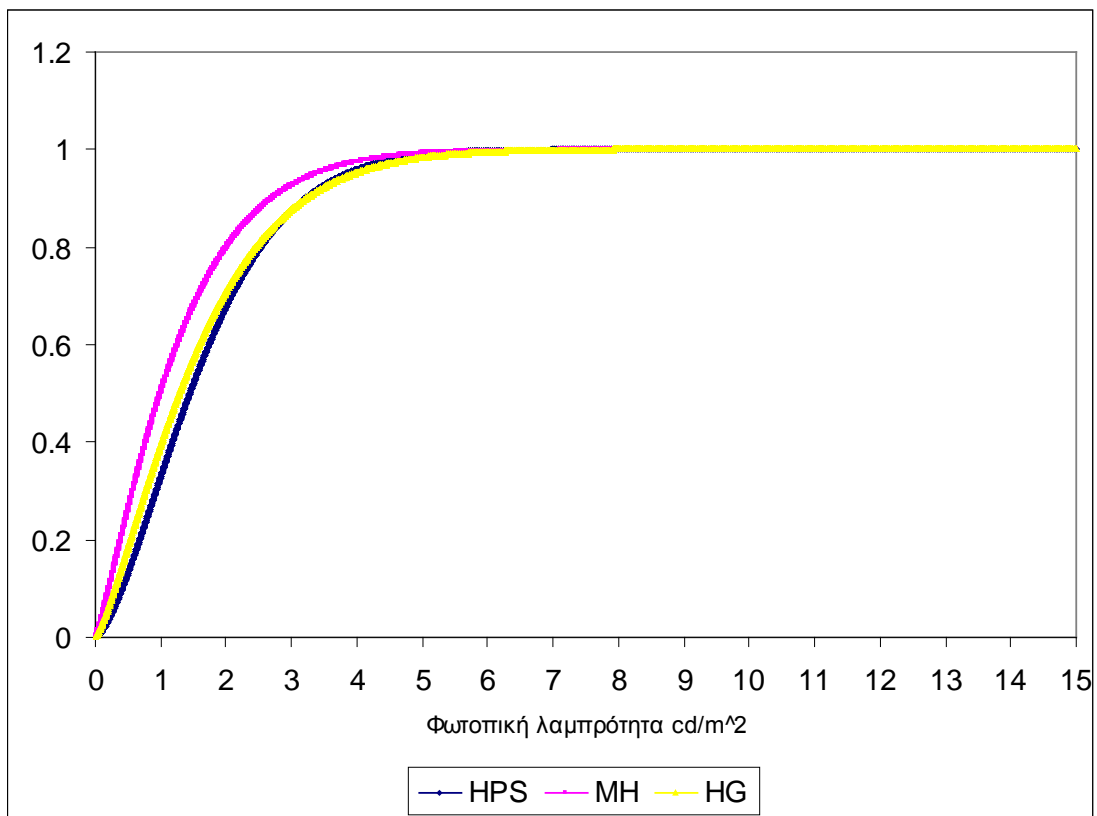
Σχήμα 7.6.3 Γραφική παράσταση των συναρτήσεων x και y στη περίπτωση φασματικής κατανομής που παράγεται από λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων



Σχήμα 7.6.4 Γραφική παράσταση των συναρτήσεων x και y στη περίπτωση φασματικής κατανομής που παράγεται από λαμπτήρα ατμών υδραργύρου



Σχήμα 7.6.5 Γραφική παράσταση των συναρτήσεων γ για τις φασματικές κατανομές των τριών τύπων λαμπτήρων



Σχήμα 7.6.6 Γραφική παράσταση των συναρτήσεων x για τις φασματικές κατανομές των τριών τύπων λαμπτήρων

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, οι εξισώσεις που δίνουν τις μεταβλητές x , y για τους τρεις λαμπτήρες που εξετάστηκαν βρίσκονται αντικαθιστώντας τις τιμές του πίνακα 7.6.8 στις εξισώσεις 7.6.15 και 7.6.16. Οπότε για τους τρεις λαμπτήρες έχουμε:

Νατρίου υψηλής:

$$y = 0.09 \cdot 0.5^L \cdot L^{2.2} \quad x = 1 - \exp(-0.4 \cdot L^{1.5}) \quad 7.6.17$$

Μεταλλικών αλογονιδίων:

$$y = 0.13 \cdot 0.57^L \cdot L^{0.18} \quad x = 1 - \exp(-0.7 \cdot L^{1.2}) \quad 7.6.18$$

Ατμών υδραργύρου:

$$y = 0.1 \cdot 0.65^L \cdot L^{1.5} \quad x = 1 - \exp(-0.5 \cdot L^{1.3}) \quad 7.6.19$$

Αν λοιπόν είναι γνωστή η φωτοπική λαμπρότητα που προκαλεί ένας λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης αντικαθιστούμε τη τιμή αυτή στις εξισώσεις 7.6.17 και υπολογίζονται τα x , y . Οι τιμές αυτές αντικαθιστώνται στην

$$K''(\lambda) = x \cdot K(\lambda) + (1 - x) \cdot K^y(\lambda) \cdot K'^{(1-y)}(\lambda)$$

και υπολογίζεται η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας για το συγκεκριμένο επίπεδο λαμπρότητας. Από αυτή και τη φασματική κατανομή του λαμπτήρα υπολογίζεται η μεσοπική λαμπρότητα. Αντίστοιχα εργαζόμαστε και στη περίπτωση των άλλων λαμπτήρων.

Στα επόμενα κεφάλαια αναλύεται και εξηγείται ο τρόπος εφαρμογής του μοντέλου. Όπως θα δείχτει αν χρησιμοποιηθεί ένας από τους τρεις λαμπτήρες ως αναφορά, όλα τα ζητούμενα φωτομετρικά μεγέθη για οποιονδήποτε λαμπτήρα είναι δυνατόν να υπολογισθούν.

7.7 Έλεγχος συμφωνίας πειραματικών δεδομένων και θεωρητικά υπολογισμένων τιμών

Στον πίνακα 7.7.1 δίνονται οι τιμές των x και y οι οποίες προκύπτουν από τις εξισώσεις που επελέγησαν για τη κατασκευή του μοντέλου, για τα επίπεδα λαμπρότητας 0.1, 1, 3 και 5 cd/m^2 καθώς και οι τιμές που υπολογίσθηκαν από τα πειραματικά δεδομένα. Επίσης δίνεται και η ποσοστιαία απόκλιση από τις πειραματικές τιμές. Παρατηρούμε ότι σύγκλιση είναι ικανοποιητική.

Πίνακας 7.7.1 Πειραματικά και θεωρητικά προσδιορισμένες τιμές των x και y

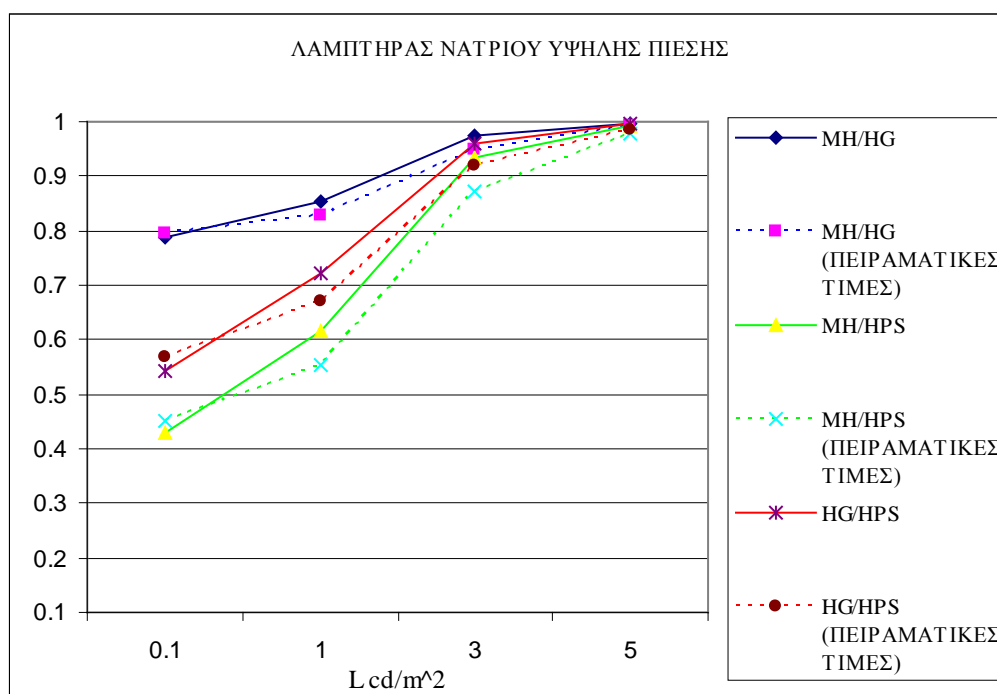
| ΤΥΠΟΣ ΛΑΜΠΤΗΡΑ | L cd/m^2 | Y (Υπολογισμένο θεωρητικά) | Y (Προσδιορισμένο πειραματικά) | X (Υπολογισμένο θεωρητικά) | X (Προσδιορισμένο πειραματικά) |
|-------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| HPS | 0.1 | 0.001 | 0.01 | 0.013 | 0.05 |
| | 1 | 0.045 | 0.08 | 0.330 | 0.19 |
| | 3 | 0.126 | 0.12 | 0.875 | 0.76 |
| | 5 | 0.097 | 0.10 | 0.989 | 0.96 |
| MH | 0.1 | 0.002 | 0.01 | 0.043 | 0.01 |
| | 1 | 0.074 | 0.07 | 0.503 | 0.27 |
| | 3 | 0.174 | 0.16 | 0.927 | 0.85 |
| | 5 | 0.142 | 0.12 | 0.992 | 0.96 |
| HG | 0.1 | 0.003 | 0.02 | 0.025 | 0.01 |
| | 1 | 0.065 | 0.06 | 0.393 | 0.48 |
| | 3 | 0.143 | 0.13 | 0.876 | 0.91 |
| | 5 | 0.130 | 0.13 | 0.983 | 0.98 |

Θα πρέπει επίσης να υπολογισθούν οι λόγοι ισοδυνάμων λαμπροτήτων των λαμπτήρων που προκύπτουν από το μοντέλο για κάθε τύπο υποβάθρου. Με τη βοήθεια φύλλων εργασίας του Microsoft excel και λογισμικού σε visual basic είναι δυνατόν να βρεθούν οι θεωρητικά υπολογισμένοι λόγοι φωτοπικών λαμπροτήτων ($L_{(MH)}/L_{(HPS)}$), ($L_{(HG)}/L_{(HPS)}$) και ($L_{(MH)}/L_{(HG)}$) για κάθε επίπεδο λαμπρότητας και κάθε λαμπτήρα υποβάθρου.

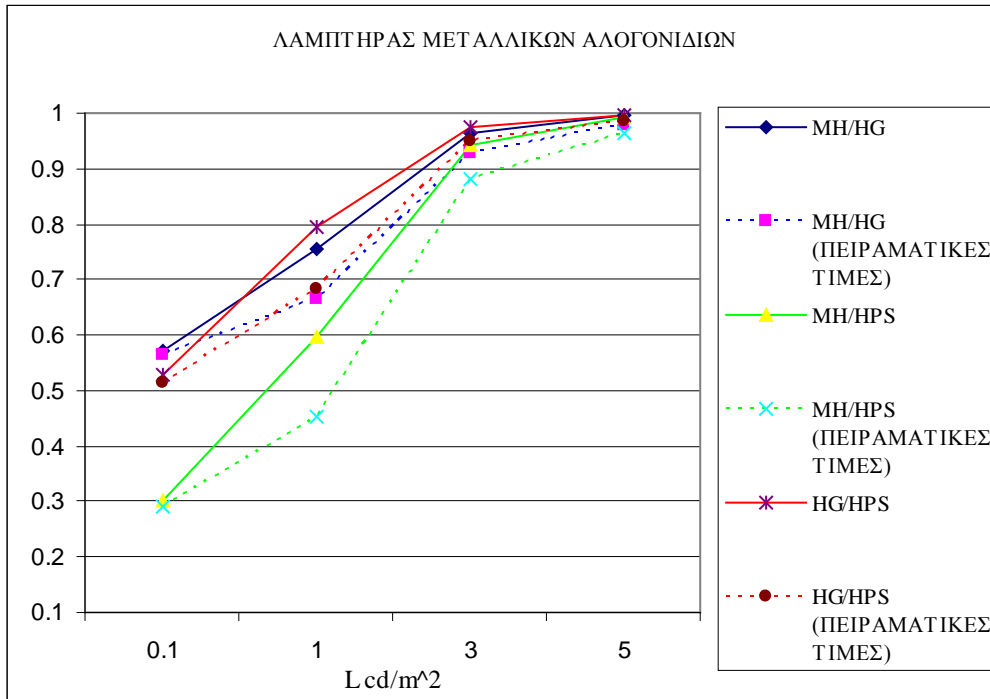
Στο πίνακα 7.7.2 αναγράφονται οι τιμές των θεωρητικά υπολογισμένων λόγων και οι πειραματικά ευρεθείσες για κάθε τύπο υποβάθρου. Ενώ στα διαγράμματα 7.7.2 έως 7.7.4 οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.

Πίνακας 7.7.2 Πειραματικά και θεωρητικά υπολογισμένοι λόγοι ΜΗ/HG, ΜΗ/HPS και ΗG/HPS

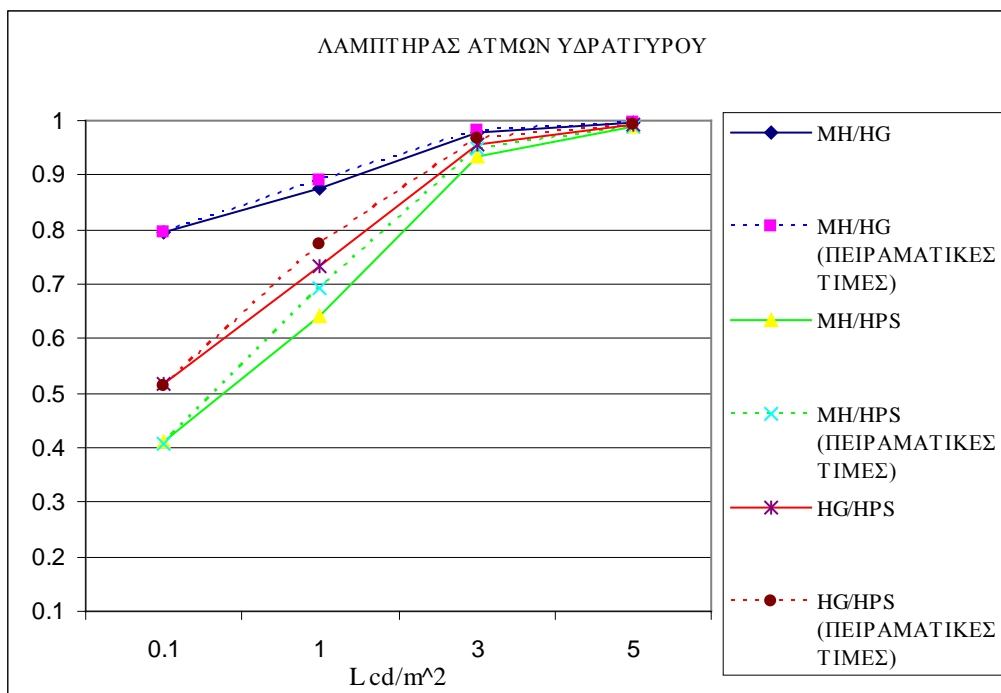
| ΤΥΠΟΣ ΛΑΜΠΙΤΗΡΑ | L cd/m ² | ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ | | | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ | | |
|--------------------|------------------------|------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|
| | | ΜΗ/HG | ΜΗ/HPS | HG/HPS | ΜΗ/HG | ΜΗ/HPS | HG/HPS |
| HPS | 0.1 | 0.786 | 0.428 | 0.543 | 0.794 | 0.451 | 0.567 |
| | 1 | 0.853 | 0.615 | 0.720 | 0.827 | 0.554 | 0.669 |
| | 3 | 0.974 | 0.934 | 0.958 | 0.950 | 0.872 | 0.918 |
| | 5 | 0.997 | 0.993 | 0.996 | 0.991 | 0.978 | 0.986 |
| MH | 0.1 | 0.570 | 0.302 | 0.530 | 0.563 | 0.290 | 0.515 |
| | 1 | 0.753 | 0.598 | 0.793 | 0.665 | 0.453 | 0.682 |
| | 3 | 0.965 | 0.942 | 0.976 | 0.928 | 0.881 | 0.949 |
| | 5 | 0.995 | 0.993 | 0.997 | 0.977 | 0.965 | 0.986 |
| HG | 0.1 | 0.796 | 0.410 | 0.515 | 0.796 | 0.409 | 0.514 |
| | 1 | 0.876 | 0.642 | 0.732 | 0.892 | 0.692 | 0.774 |
| | 3 | 0.977 | 0.933 | 0.955 | 0.983 | 0.950 | 0.967 |
| | 5 | 0.996 | 0.990 | 0.993 | 0.996 | 0.988 | 0.993 |



Σχήμα 7.7.2 Πειραματικά και θεωρητικά υπολογισμένοι λόγοι ΜΗ/HG, ΜΗ/HPS και ΗG/HPS στη περίπτωση υποβάθρου νατρίου υψηλής πίεσης.



Σχήμα 7.7.3 Πειραματικά και θεωρητικά υπολογισμένοι λόγοι ΜΗ/ΗΓ, ΜΗ/ΗΡS και ΗΓ/ΗΡS στη περίπτωση υποβάθρου μεταλλικών αλογονιδίων.



Σχήμα 7.7.4 Πειραματικά και θεωρητικά υπολογισμένοι λόγοι ΜΗ/ΗΓ, ΜΗ/ΗΡS και ΗΓ/ΗΡS στη περίπτωση υποβάθρου ατμών υδραργύρου.

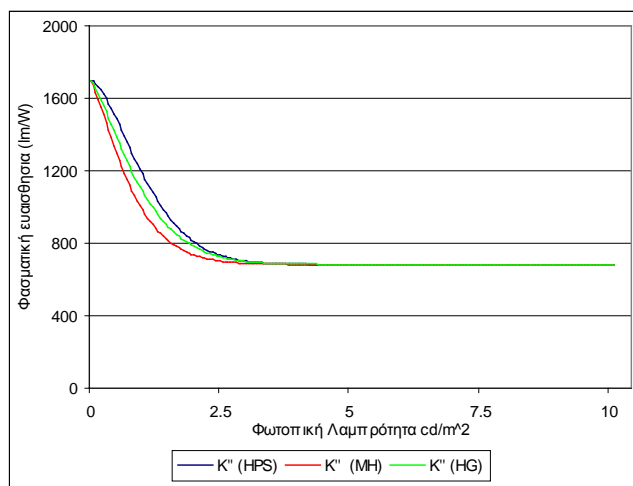
Παρατηρείται ότι οι πειραματικά ευρεθείσες τιμές είναι πολύ κοντά στις θεωρητικά υπολογισμένες. Μάλιστα στη περίπτωση που το υπόβαθρο δημιουργείται από λαμπτήρα ατμών υδραργύρου τα πειραματικά δεδομένα και οι θεωρητικά

προσδιοριζόμενες τιμές σχεδόν συμπίπτουν. Μικρές αποκλίσεις παρουσιάζονται στη περίπτωση που το υποβάθρο δημιουργείται από λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης.

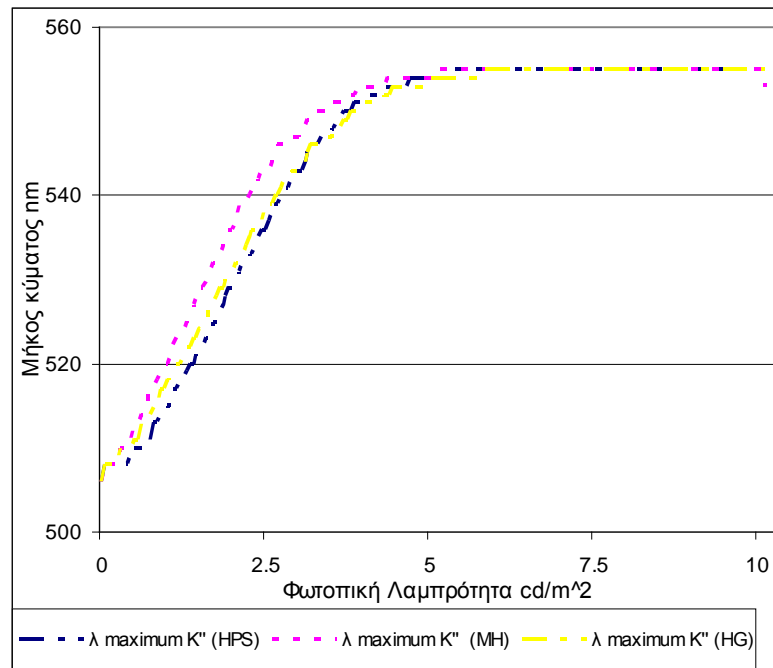
7.8 Έλεγχος συμπεριφοράς του μοντέλου στη μεσοπική περιοχή

Ενώ το μοντέλο παρουσιάζεται ελκυστικό, ωστόσο θα πρέπει να ελεγχθεί ως προς ορισμένες ιδιότητες που πρέπει να ικανοποιεί ένα μοντέλο για τη μεσοπική περιοχή.

Βασική επιταγή είναι το πέρασμα από τη φωτοπική περιοχή στη σκοτοπική περιοχή να γίνεται κατά τρόπο ομαλό. Δηλαδή θα πρέπει το μέγιστο της καμπύλης φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού να μεταβάλλεται από τα 683lm/W στα 1700 lm/W κατά τρόπο συνεχή και μονότονο. Έτσι υπολογίσαμε τα μέγιστα αυτά για διάφορες τιμές φωτοπικής λαμπρότητας και για κάθε τύπο λαμπτήρα υποβάθρου που χρησιμοποιήθηκε. Στο σχήμα 7.8.1 παριστάνεται ο τρόπος μεταβολής της μέγιστης τιμής της φασματικής ευαισθησίας συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας για τα τρία είδη φασματικών κατανομών, στο σχήμα 7.8.2 παριστάνεται ο τρόπος μεταβολής του μήκους κύματος λ στο οποίο παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή της φασματικής ευαισθησίας συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας για τα τρία είδη φασματικών κατανομών.



Σχήμα 7.8.1 Μεταβολή της μέγιστης K'' συναρτήσει της μεσοπικής λαμπρότητας για τους τρεις τύπους λαμπτήρων



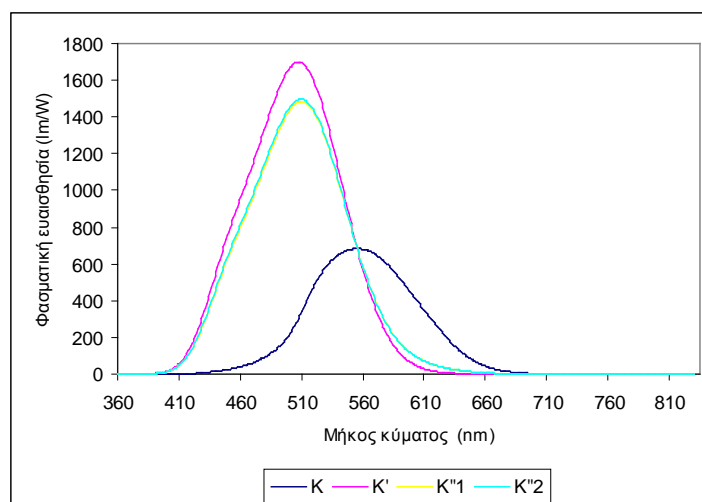
Σχήμα 7.8.2 Μεταβολή του λ στο οποίο παρουσιάζεται η μέγιστη K'' συναρτήσει της μεσοπικής λαμπρότητας για τους τρεις τύπους λαμπτήρων

Παρατηρούμε ότι οι τιμές των μέγιστων μεταβάλλονται κατά ομαλό και μονότονο τρόπο. Άρα το μοντέλο εκπληρώνει τη προϋπόθεση αυτή.

Ένα ακόμα κριτήριο προκύπτει για το συγκεκριμένο μοντέλο. Όπως είδαμε για μια συγκεκριμένη φωτοπική λαμπρότητα και συγκεκριμένο λαμπτήρα η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας προκύπτει από τις τιμές των x και y . Είναι προφανές ότι η ίδια καμπύλη φασματικής ευαισθησίας πρέπει να προκύπτει και για τους άλλους δύο λαμπτήρες φυσικά για διαφορετικές τιμές των x και y και της φωτοπικής λαμπρότητας. Ο έλεγχος για αυτό το κριτήριο γίνεται ως εξής. Υπολογίζουμε για τη λαμπρότητα 0.1 cd/m^2 τις τιμές των x και y για το λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης, και από αυτές την αντίστοιχη καμπύλη μεσοπικής λαμπρότητας. Εφαρμόζουμε αυτή τη καμπύλη στην φασματική κατανομή των λαμπτήρων, δηλαδή των μεταλλικών αλογονιδίων, του νατρίου υψηλής πίεσης και των ατμών υδραργύρου. Υπολογίζουμε τη μεσοπική φωτεινή ροή για κάθε ένα από αυτούς, δηλαδή τις $\Phi''(\text{HPS})$, $\Phi''(\text{MH})$ και $\Phi''(\text{HG})$. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας επαναληπτική μέθοδο αναζητούνται οι τιμές των x και y για το λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων που δίνουν μεσοπική καμπύλη που αν εφαρμοστεί στις φασματικές κατανομές των τριών λαμπτήρων δίνει, ίδιες τιμές με αυτές που υπολογίσθηκαν στο προηγούμενο στάδιο, δηλαδή τις $\Phi''(\text{HPS})$, $\Phi''(\text{MH})$ και $\Phi''(\text{HG})$. Στη συνέχεια υπολογίζεται η απόκλιση από τη μέση τιμή. Αυτό επαναλαμβάνεται και για το λαμπτήρα ατμών υδραργύρου. Η ίδια

διαδικασία επαναλαμβάνεται για λαμπρότητα 0.5cd/m^2 και στη συνέχεια με βήμα 0.5cd/m^2 μέχρι $5\text{-}6\text{cd/m}^2$, όπου η όραση πλέον είναι σχεδόν φωτοπική.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τους λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Στο σχήμα 7.8.3 παρουσιάζονται οι μεσοπικές καμπύλες φασματικής ευαισθησίας που προκύπτουν από τις τιμές των x , y που αντιστοιχούν σε λαμπρότητα 0.1cd/m^2 με φωτισμό λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης. Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες είναι ακριβώς ίδιες. Αυτό αποτελεί και ένα χαρακτηριστικό του προτεινόμενου μοντέλου. Δηλαδή να παράγεται η ίδια καμπύλη φασματικής ευαισθησίας με διαφορετικές τιμές x , y που αντιστοιχούν όμως σε διαφορετικές λαμπρότητες. Στους πίνακες 7.8.1 έως 7.8.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας. Αναγράφονται οι τιμές των x , y για κάθε τύπο λαμπτήρα καθώς και οι αντίστοιχες τιμές φωτοπικών λαμπροτήτων. Από τους πίνακες αυτούς παρατηρούμε ότι η μέγιστη απόκλιση είναι της τάξης 2 % Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι το μοντέλο ικανοποιεί και αυτό το κριτήριο. Με άλλα λόγια η συμπεριφορά του μοντέλου στη μεσοπική περιοχή είναι καλή.



Σχήμα 7.8.2 Μεσοπικές καμπύλες φασματικής ευαισθησίας λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων ($x= 0.13202$ $y=0.008333$) και λαμπτήρα νατρίου υψηλής ($x= 0.131877$ $y=0.01385$).

Πίνακας 7.8.1 Ισοδυναμία x και y λαμπτήρων HPS-MH και HPS-HG

| M H | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| L(HPS) cd/m ² | L(MH) cd/m ² | Y (HPS) | x(HPS) | Y(MH) | X(MH) | Saverage |
| 0.1 | 0.036 | 0.00053 | 0.01256 | 0.00027 | 0.01287 | 0.02573 |
| 0.5 | 0.264 | 0.01385 | 0.13187 | 0.00833 | 0.13202 | 0.39184 |
| 1.0 | 0.628 | 0.04500 | 0.32968 | 0.03080 | 0.33004 | 0.75178 |
| 1.5 | 1.044 | 0.07764 | 0.52042 | 0.05764 | 0.52151 | 0.72858 |
| 2.0 | 1.496 | 0.10338 | 0.67740 | 0.08052 | 0.67859 | 0.53939 |
| 3.0 | 2.481 | 0.12613 | 0.87487 | 0.10112 | 0.87542 | 0.22160 |
| 4.0 | 3.553 | 0.11875 | 0.95923 | 0.09181 | 0.95943 | 0.08129 |
| 5.0 | 4.693 | 0.09701 | 0.98857 | 0.06875 | 0.98861 | 0.02583 |
| 6.0 | 5.893 | 0.07244 | 0.99720 | 0.04508 | 0.99721 | 0.00666 |
| H G | | | | | | |
| L(HPS) cd/m ² | L(HG) cd/m ² | Y (HPS) | x(HPS) | Y(HG) | X(HG) | Saverage |
| 0.1 | 0.060 | 0.00053 | 0.01256 | 0.00143 | 0.01281 | 0.07088 |
| 0.5 | 0.380 | 0.01385 | 0.13187 | 0.01988 | 0.13249 | 0.40736 |
| 1.0 | 0.843 | 0.04500 | 0.32968 | 0.05383 | 0.32998 | 0.44286 |
| 1.5 | 1.344 | 0.07764 | 0.52042 | 0.08732 | 0.52017 | 0.33588 |
| 2.0 | 1.873 | 0.10338 | 0.67740 | 0.11439 | 0.67712 | 0.24490 |
| 3.0 | 2.990 | 0.12613 | 0.87487 | 0.14259 | 0.87463 | 0.13682 |
| 4.0 | 4.167 | 0.11875 | 0.95923 | 0.14130 | 0.95911 | 0.06298 |
| 5.0 | 5.392 | 0.09701 | 0.98857 | 0.12270 | 0.98854 | 0.02164 |
| 6.0 | 6.657 | 0.07244 | 0.99720 | 0.09760 | 0.9972 | 0.00563 |

Πίνακας 7.8.2 Ισοδυναμία x και y λαμπτήρων MH-HPS και MH-HG

| HPS | | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| L(MH) cd/m ² | L(HPS) cd/m ² | Y (MH) | x(MH) | Y(HPS) | X(HPS) | Saverage |
| 0.1 | 0.231 | 0.00162 | 0.04320 | 0.00305 | 0.04343 | 0.11075 |
| 0.5 | 0.835 | 0.02233 | 0.26265 | 0.03393 | 0.26302 | 0.66978 |
| 1.0 | 1.452 | 0.055 | 0.50341 | 0.07472 | 0.50334 | 0.73117 |
| 1.5 | 2.007 | 0.08068 | 0.67976 | 0.10367 | 0.67932 | 0.52994 |
| 2.0 | 2.526 | 0.09576 | 0.79974 | 0.12000 | 0.79928 | 0.34355 |
| 3.0 | 3.495 | 0.09933 | 0.92690 | 0.12523 | 0.92672 | 0.13605 |
| 4.0 | 4.401 | 0.08336 | 0.97514 | 0.11097 | 0.97510 | 0.05246 |
| 5.0 | 5.262 | 0.06228 | 0.99200 | 0.09052 | 0.99199 | 0.01854 |
| 6.0 | 6.089 | 0.04324 | 0.99754 | 0.07035 | 0.99754 | 0.00584 |
| H G | | | | | | |
| L(MH) cd/m ² | L(HG) cd/m ² | Y (MH) | x(MH) | Y(HG) | X(HG) | Saverage |
| 0.1 | 0.156 | 0.00162 | 0.04320 | 0.00576 | 0.04368 | 0.31457 |
| 0.5 | 0.684 | 0.02233 | 0.26265 | 0.04213 | 0.26300 | 1.12861 |
| 1.0 | 1.294 | 0.05500 | 0.50341 | 0.08429 | 0.50292 | 1.07061 |
| 1.5 | 1.880 | 0.08068 | 0.67976 | 0.11468 | 0.67889 | 0.77216 |
| 2.0 | 2.451 | 0.09576 | 0.79974 | 0.13349 | 0.79884 | 0.52329 |
| 3.0 | 3.565 | 0.09933 | 0.92690 | 0.14491 | 0.92646 | 0.23230 |
| 4.0 | 4.652 | 0.08336 | 0.97514 | 0.13524 | 0.97500 | 0.09479 |
| 5.0 | 5.719 | 0.06228 | 0.99200 | 0.11642 | 0.99197 | 0.03410 |
| 6.0 | 6.770 | 0.04324 | 0.99754 | 0.09534 | 0.99754 | 0.01077 |

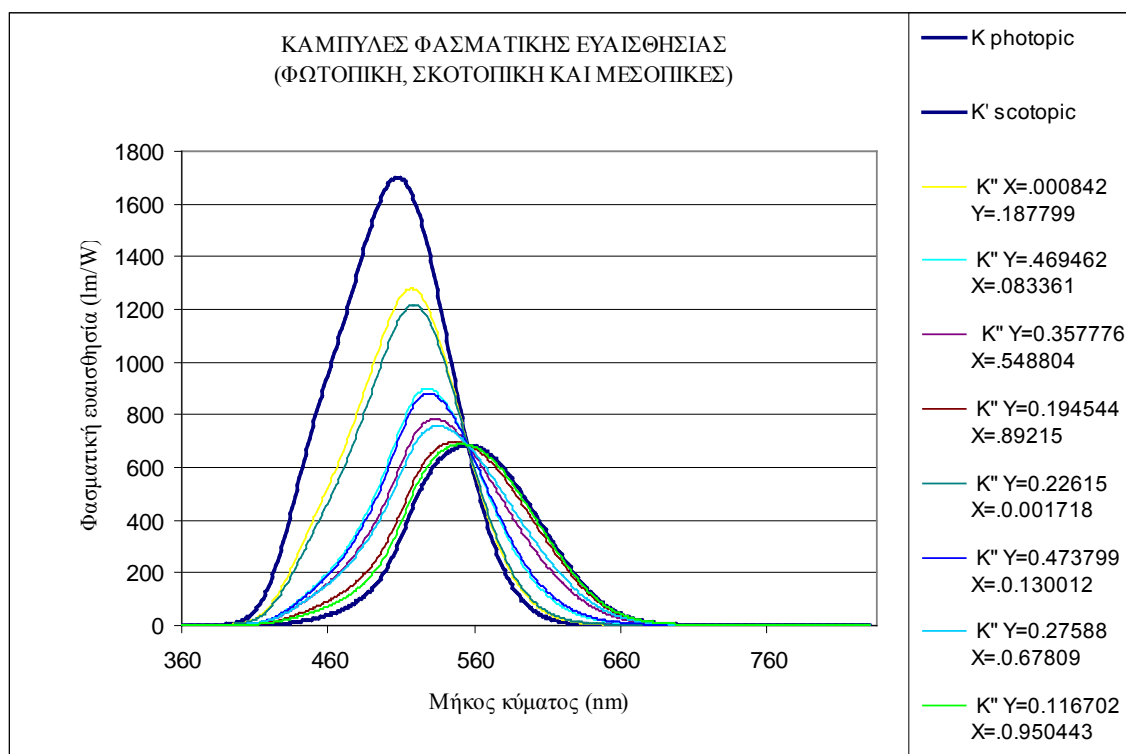
Πίνακας 7.8.3 Ισοδυναμία x και y λαμπτήρων HG-MH και HG-HPS

| MH | | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| L(HG) cd/m ² | L(MH) cd/m ² | Y(HG) | X(HG) | Y(MH) | X(MH) | S average |
| 0.1 | 0.063 | 0.00302 | 0.02474 | 0.00072 | 0.02505 | 0.18091 |
| 0.5 | 0.357 | 0.02850 | 0.18377 | 0.01345 | 0.18402 | 0.98314 |
| 1.0 | 0.757 | 0.06500 | 0.39346 | 0.03943 | 0.39419 | 1.19727 |
| 1.5 | 1.176 | 0.09627 | 0.57130 | 0.06518 | 0.57272 | 0.98451 |
| 2.0 | 1.606 | 0.11950 | 0.70804 | 0.08477 | 0.70943 | 0.72271 |
| 3.0 | 2.491 | 0.14269 | 0.87576 | 0.10115 | 0.87667 | 0.35608 |
| 4.0 | 3.400 | 0.14280 | 0.95175 | 0.09430 | 0.95216 | 0.16537 |
| 5.0 | 4.326 | 0.12972 | 0.98260 | 0.07657 | 0.98273 | 0.06914 |
| 6.0 | 5.268 | 0.11084 | 0.99411 | 0.05682 | 0.99415 | 0.02539 |
| HPS | | | | | | |
| L(HG) cd/m ² | L(HPS) cd/m ² | Y(HG) | X(HG) | Y(HPS) | X(HPS) | S average |
| 0.1 | 0.158 | 0.00302 | 0.02474 | 0.00139 | 0.02480 | 0.13076 |
| 0.5 | 0.637 | 0.02850 | 0.18377 | 0.02145 | 0.18401 | 0.45482 |
| 1.0 | 1.162 | 0.06500 | 0.39346 | 0.05596 | 0.39409 | 0.41330 |
| 1.5 | 1.651 | 0.09627 | 0.57130 | 0.08635 | 0.57196 | 0.30655 |
| 2.0 | 2.119 | 0.11950 | 0.70804 | 0.10810 | 0.70882 | 0.22960 |
| 3.0 | 3.011 | 0.14269 | 0.87576 | 0.12618 | 0.87630 | 0.13661 |
| 4.0 | 3.863 | 0.14280 | 0.95175 | 0.12094 | 0.95202 | 0.07173 |
| 5.0 | 4.685 | 0.12972 | 0.98260 | 0.10458 | 0.98268 | 0.03133 |
| 6.0 | 5.486 | 0.11084 | 0.99411 | 0.08494 | 0.99414 | 0.01162 |

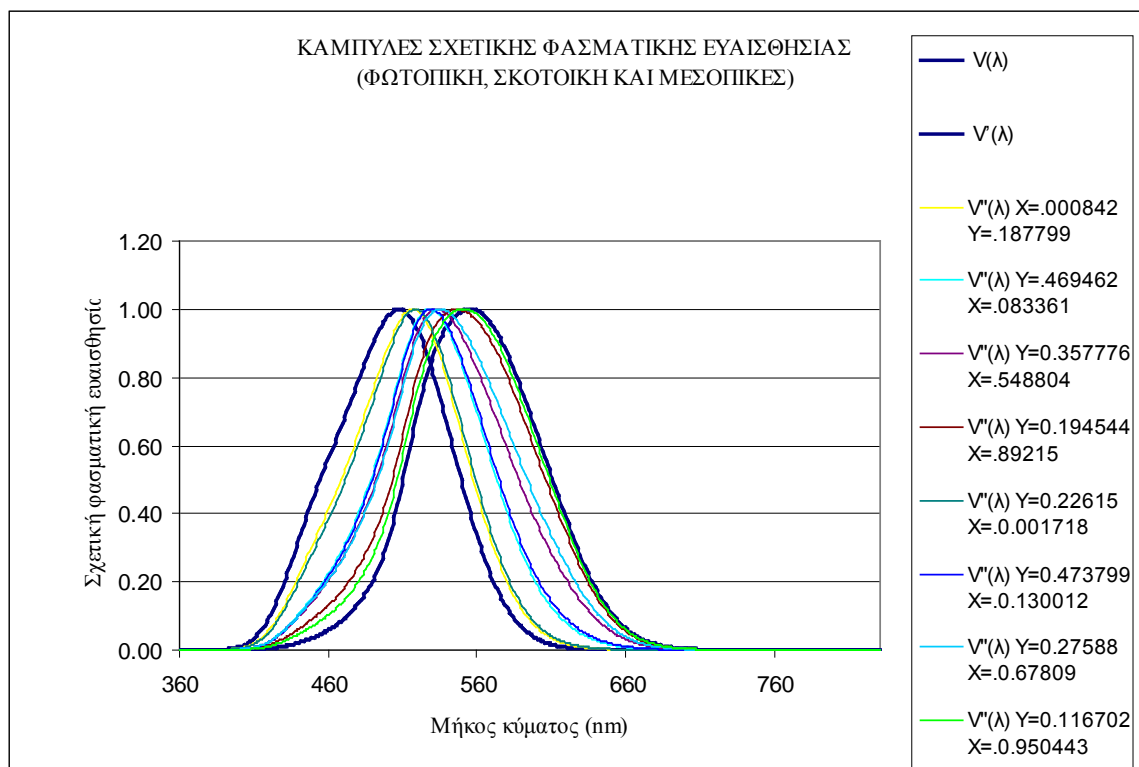
7.9 Ανάλυση του μοντέλου

Όπως είδαμε οι μεταβλητές x και y εκφράζονται συναρτήσει της λαμπρότητας από διαφορετικές συναρτήσεις, που ανήκουν όμως στον ίδιο τύπο (εξ: 7.6.15, 7.6.16).

Αυτό όμως σύμφωνα με αυτά που αναφέρονται στο κεφάλαιο 5 ήταν και αναμενόμενο και επιθυμητό. Στη μεσοπική περιοχή όρασης το επίπεδο προσαρμογής του παρατηρητή επηρεάζεται όχι μόνο από τη τιμή της φωτοπικής λαμπρότητας αλλά και από τη φασματική κατανομή του λαμπτήρα που δημιουργεί το φωτισμό. Αυτό ακριβώς αποτυπώνεται στο μοντέλο που προτείνεται και μάλιστα κατά εμφανή τρόπο. Εάν η καμπύλες των x και y συναρτήσει της λαμπρότητας ήταν μοναδικές τότε η φασματική κατανομή της φωτεινής πηγής δεν θα έπαιζε κανένα απολύτως ρόλο στη προσαρμογή του οφθαλμού του παρατηρητή. Αντίθετα με το προτεινόμενο μοντέλο είναι δυνατόν μετρώντας τη φωτοπική λαμπρότητα να καθορισθεί η αντίστοιχη μεσοπική δηλαδή αυτή που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής.



Σχήμα 7.9.1 Καμπύλες φασματικής ευαισθησίας. Φωτοπική, σκοτοπική και μεσοπικές παραγόμενες από το αναπτυχθέν μοντέλο.



Σχήμα 7.9.2 Καμπύλες σχετικής φασματικής ευαισθησίας. Φωτοπική, σκοτοπική και μεσοπικές παραγόμενες από το αναπτυχθέν μοντέλο.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η κατάσταση προσαρμογής του ανθρώπινου οφθαλμού δεν καθορίζεται από τα συγκεκριμένα x και y αλλά από τη συγκεκριμένη μεσοπική καμπύλη στην οποία προσαρμόζεται ο οφθαλμός του παρατηρητή, δηλαδή

$$K''(\lambda) = x \cdot K(\lambda) + (1 - x) \cdot K^y(\lambda) \cdot K'^{(1-y)}(\lambda) \quad 7.9.1$$

αν σε αυτή αντικατασταθούν οι τιμές των x και y . Στο σχήμα 7.9.1 παριστάνονται οι μεσοπικές καμπύλες που προκύπτουν από το μοντέλο για διάφορες τιμές x και y , ενώ στο σχήμα 7.9.2 οι κανονικοποιημένες μορφές τους δηλαδή οι $V''(\lambda, L)$.

Οπότε, γνωρίζοντας τη φασματική κατανομή της φωτίζουσας ακτινοβολίας και τον τρόπο μεταβολής των x και y , είναι δυνατόν να καθορίσουμε για οποιαδήποτε τιμή φωτοπικής λαμπρότητας την μεσοπική λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής. Τα παραδείγματα που αναφέρονται στη συνέχεια διασαφηνίζουν τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζεται το μοντέλο.

7.9.1 Υπολογισμός μεσοπικής λαμπρότητας.

Έστω ότι ένας λαμπτήρας HPS χρησιμοποιείται σε μια εφαρμογή φωτισμού και η μετρούμενη φωτοπική λαμπρότητα που προκαλείται είναι 2cd/m^2 . Από τις εξισώσεις 7.6.15 και 7.6.16 αν αντικατασταθούν οι τιμές των a , b , c , d και f λαμβάνονται οι εξισώσεις που δίνουν τη μεταβολή των x , y στη περίπτωση του λαμπτήρα νατρίου υψηλής, δηλαδή οι:

$$y = 0.09 \cdot 0.5^L \cdot L^{2.2} \quad 7.9.1.1$$

$$x = 1 - \exp(-0.4 \cdot L^{1.5}) \quad 7.9.1.2$$

Αντικαθιστώντας τη τιμή της λαμπρότητας στις εξ. 7.9.1.1 και 7.9.1.2 λαμβάνονται οι τιμές $x=0.677$ και $y=0.103$.

Αυτές οι τιμές εναλλακτικά θα μπορούσε να βρεθούν από το διάγραμμα 7.6.1. Από τις τιμές αυτές μπορούμε να κατασκευάσουμε την καμπύλη φασματικής ευαισθησίας αντικαθιστώντας στην 7.2.7 τις τιμές των x , y , δηλαδή:

$$K''(\lambda) = 0.677 \cdot K(\lambda) + (1 - 0.677) \cdot K^{0.103}(\lambda) \cdot K'^{(1-0.103)}(\lambda) \quad 7.9.1.3$$

ή μετά τις πράξεις:

$$K''(\lambda) = 0.677 \cdot K(\lambda) + 0.323 \cdot K^{0.103}(\lambda) \cdot K'^{0.897}(\lambda) \quad 7.9.1.4$$

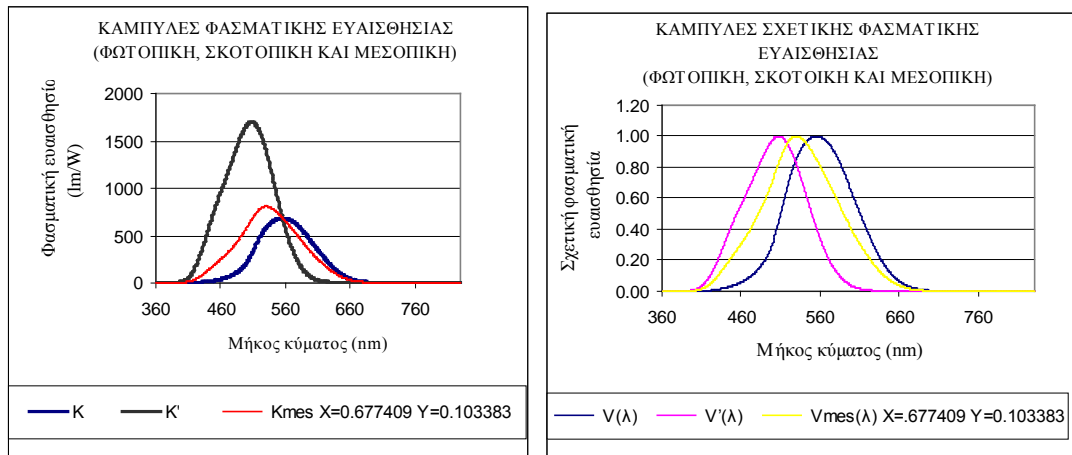
Από την εξίσωση 7.9.1.4 είναι δυνατός ο υπολογισμός της καμπύλης φασματικής ευαισθησίας για τη περίπτωση λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης και λαμπρότητα 2cd/m^2 . Στον πίνακα 7.9.1 φαίνονται οι τιμές της $K''(\lambda)$ συναρτήσεως του μήκους κύματος λ με βήμα 10nm , και στο σχήμα 7.9.3 η αντίστοιχη καμπύλη φασματικής ευαισθησίας όπως και η κανονικοποιημένη της μορφή.

Γνωρίζοντας τώρα τη καμπύλη φασματικής ευαισθησίας μπορούμε να υπολογίσουμε τη μεσοπική φωτεινή ροή του λαμπτήρα HPS και εξ αυτής την μεσοπική λαμπρότητα. Η μεσοπική ροή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Phi'' = \int_{380}^{830} K''(\lambda) \cdot P_e(\lambda) d\lambda \quad 7.9.1.5$$

Πίνακας 7.9.1 Τιμές της $K''(\lambda)$ με βήμα 10nm ($x=0.677, y=0.103$)

| λ (nm) | $K''(\lambda)$ X=0.677 Y=0.103 | λ (nm) | $K''(\lambda)$ X=0.677 Y=0.103 | λ (nm) | $K''(\lambda)$ X=0.677 Y=0.103 | λ (nm) | $K''(\lambda)$ X=0.677 Y=0.103 |
|----------------|--------------------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|--------------------------------------|
| 360 | 0.00181 | 480 | 394.88310 | 600 | 314.38005 | 720 | 0.48858 |
| 370 | 0.00573 | 490 | 483.82521 | 610 | 244.08336 | 730 | 0.24279 |
| 380 | 0.24006 | 500 | 586.30558 | 620 | 181.80802 | 740 | 0.11648 |
| 390 | 0.87130 | 510 | 696.31490 | 630 | 125.22405 | 750 | 0.05616 |
| 400 | 3.52907 | 520 | 782.03037 | 640 | 82.18958 | 760 | 0.02811 |
| 410 | 12.84470 | 530 | 806.12478 | 650 | 50.07600 | 770 | 0.01408 |
| 420 | 36.53758 | 540 | 778.90716 | 660 | 28.49224 | 780 | 0.00705 |
| 430 | 79.66177 | 550 | 719.11772 | 670 | 14.93422 | 790 | 0.00345 |
| 440 | 135.04473 | 560 | 644.35217 | 680 | 7.92822 | 800 | 0.00171 |
| 450 | 193.25221 | 570 | 561.73532 | 690 | 3.82949 | 810 | 0.00085 |
| 460 | 252.09594 | 580 | 476.68142 | 700 | 1.91346 | 820 | 0.00042 |
| 470 | 316.28807 | 590 | 392.34144 | 710 | 0.97544 | 830 | 0.00021 |



Σχήμα 7.9.3 Καμπύλη φασματικής ευαισθησίας και σχετικής φασματικής ευαισθησίας σε σύγκριση με τις αντίστοιχες φωτοπική και σκοτοπική ($x=0.677, y=0.103$).

Στη προκειμένη περίπτωση δηλαδή για λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης του οποίου η φασματική κατανομή δίνεται από το σχήμα 7.3.8 η μεσοπική φωτεινή ροή βρίσκεται $\Phi''=12879\text{lm}$. Πρέπει να σημειωθεί ότι η φωτοπική φωτεινή ροή είναι $\Phi=15500\text{lm}$, δηλαδή υπάρχει μια μείωση της τάξης του 16%.

Η μεσοπική λαμπρότητα θα υπολογισθεί από τη σχέση:

$$L'' = \int_{380}^{830} K''(\lambda) \cdot L_e(\lambda) \cdot d\lambda \quad 7.9.1.6$$

Στη προκειμένη περίπτωση βρίσκεται 1.6cd/m^2 . Δηλαδή και πάλι υπάρχει μείωση της τάξης του 50%. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ανάλογες τιμές έχουν βρεθεί και από άλλους ερευνητές (Andrian, Leweis).

Επειδή είναι γνωστή η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας που είναι προσαρμοσμένος ο ανθρώπινος οφθαλμός, στη συγκεκριμένη περίπτωση φωτισμού δηλαδή λαμπρότητα 2cd/m^2 από λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης, είναι δυνατόν να υπολογισθεί η μεσοπική ροή οποιουδήποτε λαμπτήρα στις συνθήκες αυτές. Για παράδειγμα ο λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων 400W με φασματική κατανομή του σχήματος 7.3.9, ενώ παρουσιάζει φωτοπική φωτεινή ροή 17434lm στη περίπτωση που η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας δίνεται από την εξίσωση 7.9.5 παρουσιάζει μεσοπική φωτεινή ροή 19534lm. Παρατηρούμε ότι ο λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων έχει καλύτερη απόδοση στη μεσοπική περιοχή.

7.9.2 Σχέσεις μεσοπικής και φωτοπικής λαμπρότητας για τους τρεις τύπους λαμπτήρων

Τα περισσότερα μοντέλα που έχουν προταθεί στη μεσοπική όραση έχουν στόχο τον υπολογισμό της μεσοπικής λαμπρότητας εάν είναι γνωστή η φωτοπική λαμπρότητα. Κάτι τέτοιο είναι χρήσιμο υπό την έννοια ότι βρίσκεται η πραγματική λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής. Το μοντέλο που υιοθετείται από αυτή τη διατριβή έχει τη δυνατότητα αυτή όπως φάνηκε στη παράγραφο 7.9.1.

Αυτό όμως που έχει περισσότερη χρησιμότητα είναι το αντίστροφο. Δηλαδή να μπορεί να βρεθεί η τιμή της φωτοπικής λαμπρότητας όταν ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται μια συγκεκριμένη τιμή μεσοπικής λαμπρότητας. Στις περισσότερες εφαρμογές ζητείται η τιμή της λαμπρότητας να βρίσκεται εντός κάποιων ορίων που καθορίζονται από πρότυπα. Αν η τιμή της λαμπρότητας βρίσκεται στη φωτοπική περιοχή τότε δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα. Αν όμως η τιμή της επιθυμητής λαμπρότητας βρίσκεται στη μεσοπική περιοχή τότε η λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής θα εξαρτάται και από τη φασματική κατανομή της φωτίζουσας ακτινοβολίας. Αν λοιπόν ζητείται ο παρατηρητής να αντιλαμβάνεται τη λαμπρότητα που καθορίζεται από το πρότυπο, η λαμπρότητα αυτή θα είναι μεσοπική. Θα πρέπει λοιπόν να καθορισθεί η τιμή της φωτοπικής λαμπρότητας, που προκαλεί ο συγκεκριμένος τύπος λαμπτήρα που έχει επιλεγεί, για την οποία ο παρατηρητής θα αντιλαμβάνεται τη λαμπρότητα του που καθορίζει το πρότυπο.

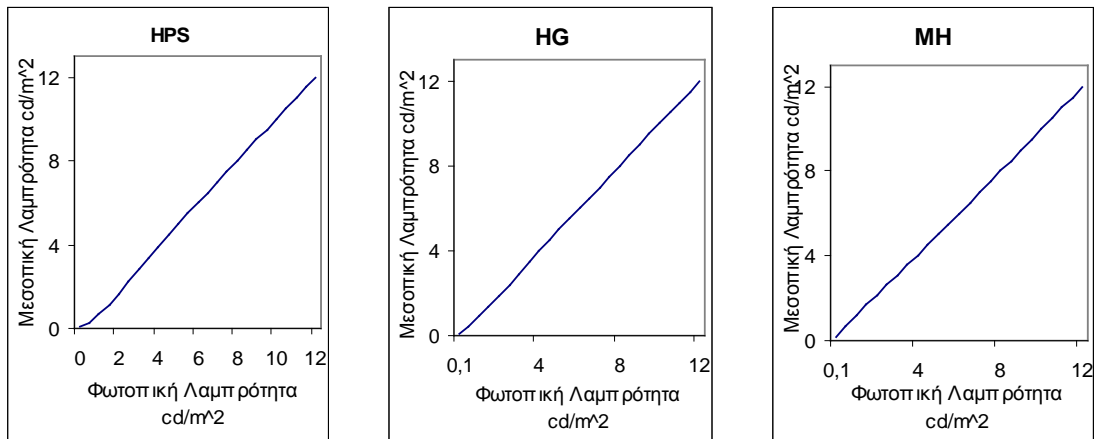
Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο αυτό είναι δυνατόν για τους λαμπτήρες που έχουν μελετηθεί. Η μεθοδολογία είναι η εξής:

Για κάθε τύπο λαμπτήρα , αντικαθιστούμε τις τιμές των σταθερών από το πίνακα 7.6.8 στις εξισώσεις 7.6.15 και 7.6.16. Ακολουθώς υπολογίζονται τα x , y για την επιθυμητή φωτοπική λαμπρότητα και εξ αυτών η $K''(\lambda)$. Από αυτήν υπολογίζεται μεσοπική λαμπρότητα. Με αυτό τον τρόπο κατασκευάζεται ο πίνακας 7.9.2.

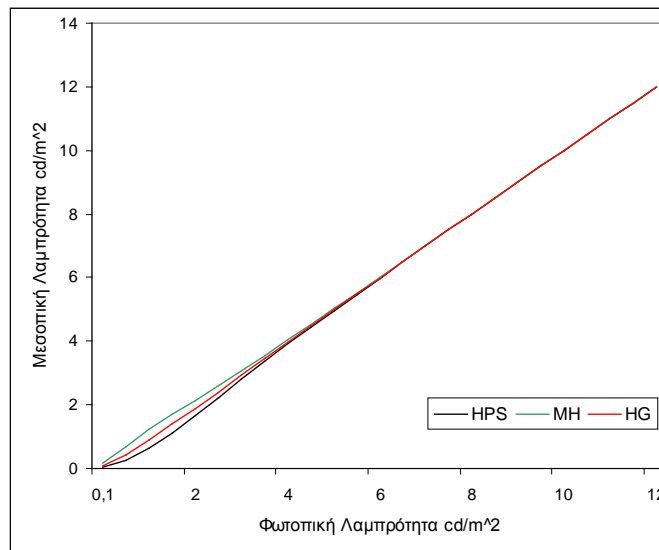
Πίνακας 7.9.2 Φωτοπικές λαμπρότητες και οι αντίστοιχες μεσοπικές για τους λαμπτήρες νατρίου υψηλής, μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου

| Φωτοπική Λαμπρότητα cd/m^2 | Μεσοπική λαμπρότητα cd/m^2 | | |
|------------------------------------|------------------------------|-------|-------|
| | HPS | MH | HG |
| 0.1 | 0.048 | 0.156 | 0.089 |
| 0.5 | 0.271 | 0.697 | 0.447 |
| 1 | 0.647 | 1.231 | 0.907 |
| 1.5 | 1.121 | 1.699 | 1.389 |
| 2 | 1.661 | 2.155 | 1.893 |
| 2.5 | 2.230 | 2.615 | 2.408 |
| 3 | 2.804 | 3.083 | 2.927 |
| 3.5 | 3.366 | 3.559 | 3.446 |
| 4 | 3.915 | 4.041 | 3.962 |
| 4.5 | 4.448 | 4.527 | 4.475 |
| 5 | 4.970 | 5.018 | 4.984 |
| 5.5 | 5.483 | 5.512 | 5.490 |
| 6 | 5.991 | 6.007 | 5.994 |
| 6.5 | 6.495 | 6.504 | 6.496 |
| 7 | 6.998 | 7.003 | 6.998 |
| 7.5 | 7.499 | 7.502 | 7.499 |
| 8 | 8.000 | 8.001 | 7.999 |
| 8.5 | 8.500 | 8.501 | 8.500 |
| 9 | 9.000 | 9.000 | 9.000 |
| 9.5 | 9.500 | 9.500 | 9.500 |
| 10 | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| 10.5 | 10.50 | 10.50 | 10.50 |
| 11 | 11.00 | 11.00 | 11.00 |
| 11.5 | 11.50 | 11.50 | 11.50 |
| 12 | 12.00 | 12.00 | 12.00 |

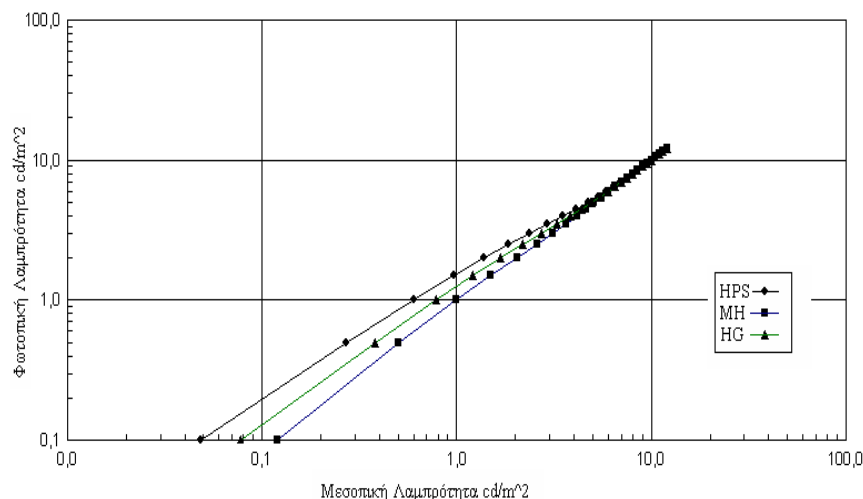
Παρατηρούμε ότι οι διαφορές στις τιμές φωτοπικής-μεσοπικής λαμπρότητας από $5.5-6cd/m^2$ είναι πολύ μικρή (<2%), οπότε σε πρακτικές εφαρμογές μπορεί να θεωρηθεί ότι η όραση είναι φωτοπική. Πλήρης ταύτιση επέρχεται από τις $8.5cd/m^2$. Από το πίνακα αυτό κατασκευάζονται τα διαγράμματα του σχήματος 7.9.4, στα οποία φαίνεται η συσχέτιση φωτοπικής- μεσοπικής λαμπρότητας για τα τρία είδη λαμπτήρων. Επίσης το διάγραμμα 7.9.5 όπου παρουσιάζεται η συσχέτιση αυτή και για τους τρεις λαμπτήρες και το διάγραμμα 7.9.6 όπου αυτή η συσχέτιση φαίνεται σε λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 7 9 4 Μεσοπική λαμπρότητα ως συνάρτηση της φωτοπικής για τους λαμπτήρες νατρίου υψηλής, μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου.



Σχήμα 7.9.5 Μεσοπική λαμπρότητα ως συνάρτηση της φωτοπικής και για τους τρεις λαμπτήρες νατρίου υψηλής, μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου.



Σχήμα 7.9.6 Μεσοπική λαμπρότητα ως συνάρτηση της φωτοπικής και για τους τρεις λαμπτήρες νατρίου υψηλής, μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου σε λογαριθμική κλίμακα.

Στα διαγράμματα αυτά παρατηρούνται οι διαφορές που παρουσιάζουν οι διάφοροι τύποι λαμπτήρων. Επίσης από το διάγραμμα 7.9.6 είναι φανερό ότι η διαφορά ανάμεσα στη μεσοπική και στη φωτοπική λαμπρότητα, για κάθε λαμπτήρα, μειώνεται όσο αυξάνεται η λαμπρότητας.

Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν και ένα τρόπο εύρεσης της μιας εκ των δύο λαμπροτήτων όταν είναι γνωστή η άλλη. Βέβαια αυτή η μέθοδος δεν είναι ιδιαίτερα ακριβής. Περισσότερο αξιόπιστη είναι η εξής μέθοδος:

Τα δεδομένα του πίνακα 7.9.2 μπορούν να περιγραφούν από μία συνάρτηση. Στη προκειμένη περίπτωση απαιτείται η περιγραφή της μεταβολής της φωτοπικής λαμπρότητας συναρτήσει της μεσοπικής να είναι σχεδόν απολύτως ακριβής, ιδιαίτερα στις πολύ μικρές λαμπρότητες, όπου παρουσιάζεται απόκλιση από τη γραμμική συμπεριφορά. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB, τα δεδομένα προσεγγίζονται κατά απόλυτο τρόπο (τυπική απόκλιση <0.02 και συντελεστής συσχέτισης 1) και στις τρεις περιπτώσεις απόσυνάρτηση της μορφής:

$$L'' = a \cdot e^{-bL} + c \cdot L^d + f$$

7.9.2.1

Οι τιμές των συντελεστών που έδωσε το λογισμικό για κάθε τύπο λαμπτήρα αναγράφονται στο πίνακα 7.9.3

Πίνακας 7.9.3 Συντελεστές των συναρτήσεων $L''=f(L)$ για κάθε τύπο λαμπτήρα

| Συντελεστές | HPS | MH | HG |
|------------------------|---------|--------|---------|
| a | 0.9029 | 3.485 | 0.2957 |
| b | 1.72 | 0.2759 | 1.307 |
| c | 1.354 | 2.155 | 1.107 |
| d | 0.905 | 0.7925 | 0.9682 |
| f | -0.8682 | -3.58 | -0.2841 |
| Τυπικό σφάλμα | 0.02 | 0.005 | 0.007 |
| Συντελεστής συσχέτισης | 1 | 1 | 1 |

Με βάση το πίνακα αυτό είναι εύκολο να υπολογισθεί με ακρίβεια η μεσοπική τιμή της λαμπρότητας, για κάθε λαμπτήρα, αν είναι γνωστή η τιμή της φωτοπικής λαμπρότητας που προκαλεί ο λαμπτήρας.

Αυτό όμως όπως αναφέρθηκε δεν είναι τόσο σημαντικό για τη περαίωση μιας εφαρμογής. Σημαντικότερο είναι ο υπολογισμός της φωτοπικής λαμπρότητας που πρέπει να δημιουργεί ο λαμπτήρας ώστε η λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής, δηλαδή η μεσοπική λαμπρότητα, να είναι η επιθυμητή. Επομένως χρειάζεται να κατασκευαστεί μια συνάρτηση της μορφής $L=f(L')$. Αυτό μπορεί να γίνει θεωρώντας ως ανεξάρτητη μεταβλητή την μεσοπική λαμπρότητα. Οπότε εισάγοντας τα δεδομένα του πίνακα 7.9.2 στο ίδιο λογισμικό, λαμβάνεται ως καλύτερη προσέγγιση πάλι συνάρτηση της ίδιας μορφής. Δηλαδή:

$$L = a \cdot e^{-bL'} + c \cdot L'^d + f$$

7.9.2.2

Οι τιμές των συντελεστών που έδωσε το λογισμικό για κάθε τύπο λαμπτήρα αναγράφονται στο πίνακα 7.9.4

Πίνακας 7.9.4 Συντελεστές των συναρτήσεων $L=f(L')$ για κάθε τύπο λαμπτήρα

| Συντελεστές | HPS | MH | HG |
|------------------------|---------|---------|--------|
| a | 0.2006 | 0.4797 | 2.33 |
| b | -0.1699 | 2.725 | 0.1867 |
| c | 1.02 | 1.162 | 1.55 |
| d | 0.9389 | 0.9525 | 0.8897 |
| f | 0.001 | -0.4099 | -2.382 |
| Τυπικό σφάλμα | 0.06 | 0.01 | 0.006 |
| Συντελεστής συσχέτισης | 0.999 | 1 | 1 |

Με βάση το πίνακα αυτό είναι εύκολο να υπολογισθεί με ακρίβεια η τιμή της φωτοπικής λαμπρότητας, για κάθε λαμπτήρα, αν είναι γνωστή η τιμή της μεσοπικής λαμπρότητας που προκαλεί αυτός. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να τεθούν οι τιμές της

απαιτούμενης λαμπρότητας στο σχεδιασμό της εφαρμογής ώστε η λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής να είναι η επιθυμητή.

Η προσέγγιση με τις συγκεκριμένες συναρτήσεις είναι εξαιρετικά ακριβής όπως αυτό φαίνεται από το τυπικό σφάλμα. Η χρήση αυτών δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αν ληφθούν υπόψη οι δυνατότητες των σύγχρονων λογισμικών. Παρ' όλα αυτά είναι δυνατόν να γίνει γραμμική προσέγγιση χωρίς ιδιαίτερα μεγάλο σφάλμα, ειδικά αν ενδιαφερόμαστε για τιμές λαμπρότητας πάνω από 1cd/m. Δηλαδή της μορφής

$$L'' = a_0 + a_1 \cdot L \quad 7.9.2.3$$

και

$$L = b_0 + b_1 \cdot L'' \quad 7.9.2.4$$

Στους πίνακες 7.9.5 και 7.9.6 αναγράφονται οι συντελεστές γραμμικής προσέγγισης για κάθε τύπο λαμπτήρα

Πίνακας 7.9.5 Συντελεστές των γραμμικών συναρτήσεων $L''=f(L)$ για κάθε τύπο λαμπτήρα

| Συντελεστές | HPS | MH | HG |
|------------------------|---------|---------|---------|
| a_0 | -0.244 | 0.141 | -0.075 |
| a_1 | 1.026 | 0.984 | 1.007 |
| Τυπικό σφάλμα | 0.085 | 0.046 | 0.025 |
| Συντελεστής συσχέτισης | 0.99978 | 0.99998 | 0.99998 |

Πίνακας 7.9.6 Συντελεστές των γραμμικών συναρτήσεων $L=f(L'')$ για κάθε τύπο λαμπτήρα

| Συντελεστές | HPS | MH | HG |
|------------------------|--------|--------|--------|
| b_0 | 0.241 | -0.142 | 0.074 |
| b_1 | 0.973 | 1.015 | 0.992 |
| Τυπικό σφάλμα | 0.083 | 0.046 | 0.025 |
| Συντελεστής συσχέτισης | 0.9997 | 0.9999 | 0.9999 |

7.9.3 Μέθοδος αντικατάστασης ενός εκ των τριών μελετηθέντων λαμπτήρων σε μια εφαρμογή με οποιοδήποτε άλλο λαμπτήρα ώστε να επιτυγχάνονται τα ίδια οπτικά αποτελέσματα

Εκ πρώτης όψεως αποτελεί σοβαρό ελάττωμα του μοντέλου το ότι φαίνεται να μπορεί «χειριστεί» στη περιοχή της μεσοπικής όρασης μόνο τους λαμπτήρες που μελετήθηκαν ή για όποιο λαμπτήρα μελετηθεί κατά ανάλογο τρόπο. Όμως δεν είναι έτσι. Το μοντέλο που προτείνεται είναι σε θέση να δώσει λύσεις ακόμα και για λαμπτήρα που δεν έχει μελετηθεί η συμπεριφορά του αρκεί να είναι γνωστή η φασματική του κατανομή στο ορατό φάσμα. Επίσης είναι απαραίτητο να θεωρήσουμε αναφορά ένα από τους τρεις λαμπτήρες, των οποίων είναι γνωστές οι καμπύλες μεταβολής των x , y .

Έστω ότι σε μια εφαρμογή ζητείται η λαμπρότητα να είναι 1 cd/m^2 . Θεωρούμε ότι αυτή η λαμπρότητα επιτυγχάνεται με χρήση λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης. Αντικαθιστούμε τις τιμές των σταθερών a , b , c , d και f για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής από το πίνακα 7.6.8 στις εξισώσεις 7.6.15 και 7.6.16. Υπολογίζονται τα x , y , βρίσκουμε ότι $x=0.045$ και $y=0.32968$ και εξ αυτών η $K''_{[\text{HPS}, 1\text{cd/m}^2]}(\lambda)$ για τη φωτοπική λαμπρότητα 1cd/m^2 προκαλούμενη από λαμπτήρα νατρίου υψηλής. Από αυτήν υπολογίζεται η μεσοπική λαμπρότητα. Εναλλακτικά η μεσοπική λαμπρότητα μπορεί να βρεθεί από το πίνακα 7.9.2. Βρίσκουμε ότι $L''=0.647\text{cd/m}^2$, η οποία είναι αυτή που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής. Πρέπει να τονισθεί ότι γνωρίζουμε τη καμπύλη φασματικής ευαισθησίας στην οποία είναι προσαρμοσμένος ο παρατηρητής στις συγκεκριμένες συνθήκες, αυτό έχει σαν συνέπεια να μπορεί να βρεθεί η μεσοπική ροή οποιοδήποτε λαμπτήρα στις ίδιες συνθήκες εφόσον είναι γνωστή η φασματική του κατανομή.

Αν λοιπόν θέλουμε να επιτύχουμε τα ίδια οπτικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας ένα άλλο λαμπτήρα υπολογίζουμε τη μεσοπική του φωτεινή ροή από τη σχέση

$$\Phi'' = \int_{360}^{780} P_e(\lambda) \cdot K''(\lambda, L) \cdot d\lambda \quad 7.9.3.1$$

Ακολουθώντας πραγματοποιούμε τη μελέτη φωτισμού χρησιμοποιώντας τον επιθυμητό λαμπτήρα, θεωρώντας όμως ως φωτεινή ροή τη μεσοπική ροή που δίνει η εξίσωση 7.9.3.1 και ως επιθυμητή λαμπρότητα τη μεσοπική, δηλαδή 0.647cd/m^2 , και όχι την

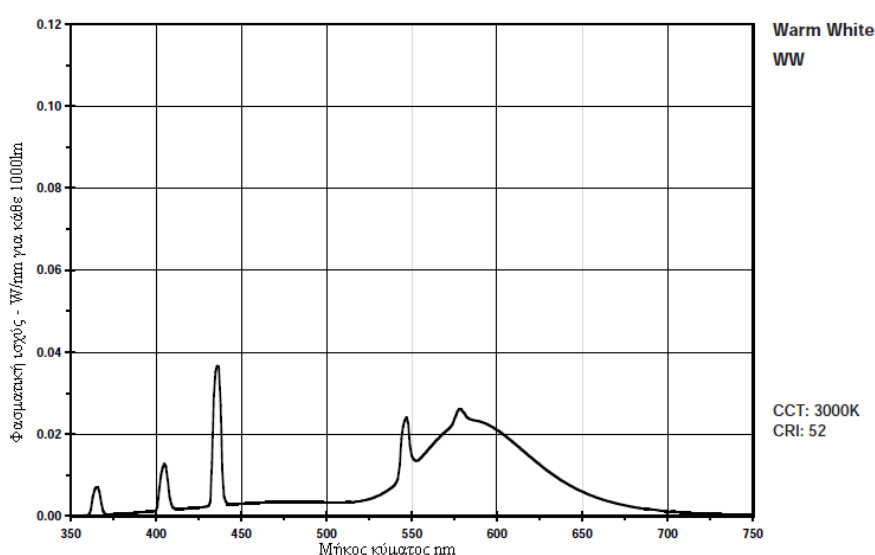
1cd/m² την οποία θέτουν οι προδιαγραφές. Με αυτό τον τρόπο θα έχουμε τα ίδια οπτικά αποτελέσματα για το παρατηρητή όποιος και από τους δύο λαμπτήρες χρησιμοποιηθεί.

Παρατηρούμε ότι με το προτεινόμενο μοντέλο είναι δυνατό να πετύχουμε τα ίδια οπτικά αποτελέσματα σε μια εφαρμογή φωτισμού, αρκεί να είναι γνωστές οι φασματικές κατανομές των λαμπτήρων.

7.9.4 Εύρεση της σχέσης μεσοπικής και φωτοπικής λαμπρότητας για οποιοδήποτε λαμπτήρα.

Χρησιμοποιώντας τη ίδια μεθοδολογία είναι δυνατό να κατασκευαστεί για κάθε λαμπτήρα, του οποίου είναι γνωστή η φασματική κατανομή, η σχέση που συνδέει τη μεσοπική με τη φωτοπική λαμπρότητα. Για παράδειγμα θεωρούμε το λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA Fluorescent lamp WW, της οποίας η φασματική κατανομή φαίνεται στο σχήμα 7.9.7

Από τα προηγούμενα έχει γίνει κατανοητό ότι ίδιες μεσοπικές καμπύλες φασματικής απόδοσης μπορούν να παραχθούν από διαφορετικά x, y. Αυτό δίνει στο μοντέλο, τη δυνατότητα να διαφοροποιεί τη συμπεριφορά των διαφόρων λαμπτήρων ανάλογα με τη φασματική τους κατανομή, όπως εξηγήθηκε στη 7.8.



Σχήμα 7.9.7 Φασματική ισχύς (W/nm για κάθε 1000lm) της SYLVANIA Fluorescent lamp WW.

Χρησιμοποιούμε ως αναφορά το λαμπτήρα νατρίου υψηλής. Αν υποθέσουμε ότι η επιθυμητή φωτοπική λαμπρότητα σε μια μελέτη φωτισμού, είναι 0.1cd/m^2 . Εργαζόμενοι όπως και στη 7.9.3, αντικαθιστούμε τις τιμές των σταθερών a, b, c, d και f για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής από το πίνακα 7.6.8 στις εξισώσεις 7.6.15 και 7.6.16. Υπολογίζονται τα x, y, βρίσκουμε ότι $x=0.00053$ και $y=0.012569$ και εξ αυτών η $K''_{[\text{HPS},0.1\text{cd/m}^2]}(\lambda)$ για τη φωτοπική λαμπρότητα 0.1cd/m^2 προκαλούμενη από λαμπτήρα νατρίου υψηλής. Από αυτήν υπολογίζεται η μεσοπική λαμπρότητα. Βρίσκουμε ότι $L''=0.048\text{cd/m}^2$, η οποία είναι αυτή που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής. Υπολογίζουμε τη μεσοπική φωτεινή ροή του SYLVANIA FL WW από τη σχέση

$$\Phi'' = \int_{360}^{780} P_e(\lambda) \cdot K''(\lambda, L) \cdot d\lambda \quad 7.9.4.1$$

Αυτή βρίσκεται $\Phi''=1137.7\text{lm}$. Ακολούθως πραγματοποιούμε τη μελέτη φωτισμού χρησιμοποιώντας τον επιθυμητό λαμπτήρα, θεωρώντας όμως ως φωτεινή ροή τη μεσοπική ροή που δίνει η εξίσωση 7.9.1 και ως επιθυμητή λαμπρότητα τη μεσοπική, δηλαδή 0.0484cd/m^2 , και όχι την 0.1cd/m^2 .

Ποια θα είναι η φωτοπική λαμπρότητα που θα μετράται τότε; Προφανώς επειδή η γεωμετρία της εφαρμογής παραμένει σταθερή τότε θα ισχύει η σχέση

$$\frac{L}{L''} = \frac{\Phi}{\Phi''} \quad 7.9.4.2$$

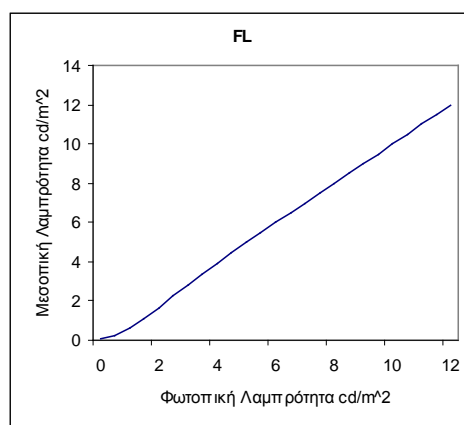
Δηλαδή

$$\frac{L}{0.048404} = \frac{1000}{1137.7} \Rightarrow L = 0.0425\text{cd/m}^2 \quad 7.9.4.3$$

Με αυτό το ν τρόπο έχο ψε ότι αν ο λαμπτήρας SYLVANIA FL WW προκαλεί φωτοπική λαμπρότητα 0.0425cd/m^2 ο παρατηρητής θα αντιλαμβάνεται 0.048404cd/m^2 . Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για διάφορες τιμές φωτοπικής λαμπρότητας και κατασκευάζεται ο πίνακας 7.9.7 Στο σχήμα 7.9.8 παριστάνεται η μεταβολή της μεσοπικής λαμπρότητας συναρτήσει της φωτοπικής.

Πίνακας 7.9.7 Αντιστοιχία φωτοπικής- μεσοπικής λαμπρότητας για το λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA FL WW

| Φωτοπική Λαμπρότητα cd/m ² | Μεσοπική Λαμπρότητα cd/m ² | Φωτοπική Λαμπρότητα cd/m ² | Μεσοπική Λαμπρότητα cd/m ² |
|--|--|--|--|
| 0.041 | 0.048 | 2.799 | 2.803 |
| 0.242 | 0.271 | 3.363 | 3.366 |
| 0.607 | 0.646 | 3.911 | 3.914 |
| 1.090 | 1.121 | 4.445 | 4.448 |
| 1.644 | 1.661 | 4.967 | 4.969 |
| 2.222 | 2.230 | 5.481 | 5.483 |



Σχήμα 7.9.8 Μεταβολή της μεσοπικής λαμπρότητας συναρτήσει της φωτοπικής για τον λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA FL WW

Τα δεδομένα του πίνακα 7.9.7 καταχωρούνται στο λογισμικό MATLAB.

Έτσι τα δεδομένα προσεγγίζονται και πάλι από συνάρτηση ίδιας μορφής. Δηλαδή

$$L'' = a \cdot e^{-bL} + c \cdot L^d + f$$

7.9.4.4

Οι τιμές των συντελεστών αναγράφονται στο πίνακα 7.9.8

Πίνακας 7.9.8 Συντελεστές της συνάρτησης $L''=f(L)$ για το λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA FL WW

| Συντελεστής | Τιμή |
|------------------------|---------|
| a | 0.02273 |
| b | 0.4052 |
| c | 1.007 |
| d | 0.9952 |
| f | 0.0001 |
| Τυπικό σφάλμα | 0.01 |
| Συντελεστής συσχέτισης | 1 |

Και πάλι είναι χρήσιμο να κατασκευαστεί η συνάρτηση της μορφής $L=f(L')$. Αυτό μπορεί να γίνει θεωρώντας ως ανεξάρτητη μεταβλητή την μεσοπική λαμπρότητα. Εισάγοντας τα δεδομένα του πίνακα 7.9.7 στο ίδιο λογισμικό, λαμβάνεται ως καλύτερη προσέγγιση συνάρτηση της ίδιας μορφής. Δηλαδή:

$$L'' = a \cdot e^{-bL} + c \cdot L^d + f \quad 7.9.4.5$$

Πίνακας 7.9.9 Συντελεστές της συνάρτησης $L=f(L')$ για το λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA FL WW

| Συντελεστής | Τιμή |
|------------------------|--------|
| a | -1.983 |
| b | 0.2935 |
| c | 0.4645 |
| d | 1.25 |
| f | 1.984 |
| Τυπικό σφάλμα | 0.002 |
| Συντελεστής συσχέτισης | 1 |

Με βάση τον πίνακα αυτό είναι εύκολο να υπολογισθεί με ακρίβεια η μεσοπική τιμή της μεσοπικής λαμπρότητας, για κάθε τιμή φωτοπικής λαμπρότητας που προκαλεί ο λαμπτήρας και αντίστροφα.

Για πρακτικούς λόγους είναι δυνατόν να γίνει γραμμική προσέγγιση χωρίς ιδιαίτερα μεγάλο σφάλμα. Δηλαδή της μορφής

$$L'' = c_0 + c_1 \cdot L \quad 7.9.4.6$$

και

$$L = d_0 + d_1 \cdot L'' \quad 7.9.4.7$$

Στους πίνακες 7.9.10 και 7.9.11 αναγράφονται οι συντελεστές γραμμικής προσέγγισης για κάθε τύπο λαμπτήρα

Πίνακας 7.9.10 Συντελεστές της γραμμικής συνάρτησης $L''=f(L)$ για το λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA FL WW

| Συντελεστές | HPS |
|------------------------|---------|
| c_0 | -0.244 |
| c_1 | 1.026 |
| Τυπικό σφάλμα | 0.08517 |
| Συντελεστής συσχέτισης | 0.99978 |

Πίνακας 7.9.11 Συντελεστές της γραμμικής συνάρτησης $L=f(L')$ για το λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA FL WW

| Συντελεστές | HPS |
|------------------------|--------|
| d_0 | 0.025 |
| d_1 | 0.994 |
| Τυπικό σφάλμα | 0.0097 |
| Συντελεστής συσχέτισης | 0.999 |

Παρατηρούμε τελικά ότι είναι αρκετά εύκολο να κατασκευαστούν οι συναρτήσεις που δίνουν τη μεσοπική λαμπρότητα συναρτήσει της μεσοπικής και αντίστροφα για κάθε τύπο λαμπτήρα αρκεί να είναι γνωστή η φασματική του κατανομή. Από τη στιγμή που αυτές καθοριστούν είναι πολύ εύκολο να βρίσκει κανείς τη μεσοπική λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής υπό δοσμένη φωτοπική λαμπρότητα. Επίσης μπορεί να υπολογισθεί ποια τιμή φωτοπικής λαμπρότητας πρέπει να επικρατεί ώστε ο παρατηρητής να αντιλαμβάνεται δοσμένη τιμή λαμπρότητας.

7.9.5 Παραδείγματα εφαρμογής του μοντέλου σε περιπτώσεις φωτισμού δρόμων

7.9.5.1 Παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου σε μελέτη φωτισμού δρόμου που δείχνει την ανάγκη αναμόρφωσης των προδιαγραφών

Σε μία πρώτη προσέγγιση θα εξετασθεί η περίπτωση φωτισμού ενός δρόμου, κάνοντας αρκετές απλοποιήσεις ώστε να είναι περισσότερο εμφανής ο τρόπος που λειτουργεί το μοντέλο.

Εξετάζεται ο φωτισμός ενός δρόμου πλάτους 6m κλάσης M5, ζητώντας απλώς η φωτοπική λαμπρότητα να είναι 1cd/m^2 . Υποθέτουμε ότι υπάρχουν δύο λαμπτήρες με το ίδιο πολικό διάγραμμα που αποδίδουν 6600 φωτοπικά lm έκαστος, ο ένας μεταλλικών αλογονιδίων και ο άλλος νατρίου υψηλής πίεσης. Θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης για κάθε ένα λαμπτήρα. Η μελέτη γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος Calculux Road της Philips ver 7.0.1.1. Στις μελέτες χρησιμοποιείται το ίδιο φωτιστικό σώμα. Τα αποτελέσματα αναγράφονται στο πίνακα 7.9.12.

Πίνακας 7.9.12 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης φωτισμού για τους δύο υποθετικούς λαμπτήρες σε φωτοπικές συνθήκες

| | | |
|--|-----------------------|---------------------|
| Πλάτος δρόμου | 6m | |
| Εγκατάσταση | Αμφίπλευρη | |
| Αριθμός λωρίδων | 2 | |
| Τύπος φωτιστικού | Philips SGS 203 PC P3 | |
| Λαμπτήρας | HPS | MH |
| Ύψος | 7.0m | 7.0m |
| Απόσταση | 31.50m | 31.50m |
| Προεξοχή | 0.30m | 0.30m |
| L_{ave} (>1.0 cd/m^2) | 1.0 cd/m^2 | 1.0 cd/m^2 |

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι ταυτόσημα. Αυτό ήταν αναμενόμενο γιατί παρά το γεγονός ότι η τιμή 1cd/m^2 ανήκει στη μεσοπική περιοχή αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη στη μελέτη. Οπότε αυτό που καθορίζει τα αποτελέσματα είναι η τιμή της φωτοπικής λαμπρότητας και τα πολικά διαγράμματα του φωτιστικού με τον λαμπτήρα, τα οποία στη προκειμένη περίπτωση είναι ταυτόσημα.

Αν η μελέτη γίνει, λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή της λαμπρότητας ανήκει στη μεσοπική περιοχή, τότε τα αποτελέσματα αλλάζουν δραστικά. Στο πίνακα 7.9.13 αναγράφονται οι μεσοπικές λαμπρότητες των δύο λαμπτήρων που αντιστοιχούν σε φωτοπική 1cd/m^2 , με βάση το αναπτυχθέν μοντέλο και με τη μεθοδολογία της παραγράφου 7.9.3

Πίνακας 7.9.13 Ισοδύναμες μεσοπικές λαμπρότητες των λαμπτήρων MH, HPS

| Φωτοπική Λαμπρότητα cd/m^2 | Μεσοπική Λαμπρότητα HPS cd/m^2 | Μεσοπική Λαμπρότητα MH cd/m^2 |
|--|--|---|
| 1 | 0.647 | 1.231 |

Παρατηρούμε ότι ενώ οι φωτοπικές λαμπρότητες είναι ίδιες, οι λαμπρότητες που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής σε κάθε περίπτωση είναι τελείως διαφορετική. Δηλαδή όταν οι προδιαγραφές καθορίζουν επίπεδα φωτισμού εντός της μεσοπικής περιοχής, η οπτική αντίληψη του παρατηρητή εξαρτάται και από τη φασματική κατανομή της πηγής και πιθανώς να βρίσκεται εκτός των ορίων των προδιαγραφών.

Για να γίνει η σύγκριση των λαμπτήρων στη μεσοπική περιοχή θα πρέπει να ξαναγίνει η μελέτη θεωρώντας ως επιθυμητή λαμπρότητα την επιθυμητή. Τίθεται το ερώτημα ποια από τις δύο; Τη μεσοπική λαμπρότητα του νατρίου υψηλής ή των μεταλλικών αλογονιδίων; Αυτή η συλλογιστική δείχνει το έλλειμμα των προδιαγραφών φωτισμού όταν τα επίπεδα φωτισμού που καθορίζουν, βρίσκονται εντός της μεσοπικής περιοχής.

Θα εξεταστούν και οι δύο περιπτώσεις.

Α περίπτωση: λαμπτήρας αναφοράς ο λαμπτήρας νατρίου υψηλής.

Αντικαθιστώντας τις τιμές των σταθερών από το πίνακα 7.6.8 στις εξισώσεις 7.6.15 και 7.6.16 για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης βρίσκονται τα x , y για τη λαμπρότητα 1cd/m^2 . Στη προκειμένη περίπτωση $x=0.045$ και $y=0.32968$. Από τις τιμές αυτές υπολογίζεται η K_{mes} και από αυτή η μεσοπική φωτεινή ροή. Βρίσκεται ότι $\Phi''_{[HPS]}=4202\text{lm}$ και $\Phi''_{[MH]}=8745\text{lm}$. Επανασχεδιάζουμε τη μελέτη με αυτά τα δεδομένα θεωρώντας ως επιθυμητή λαμπρότητα την 0.647cd/m^2 . Τα αποτελέσματα αναγράφονται στο πίνακα 7.9.14.

Από την ανάγνωση αυτών των πινάκων είναι φανερό ότι η κατάσταση αντιστρέφεται. Η απόσταση ιστών στη περίπτωση φωτισμού με λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων είναι σχεδόν διπλάσια από τη περίπτωση φωτισμού με λαμπτήρες νατρίου υψηλής. Τα οικονομικά οφέλη και η εξοικονόμηση ενέργειας είναι προφανώς σημαντική.

Πίνακας 7.9.14 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης φωτισμού για τους δύο υποθετικούς λαμπτήρες σε μεσοπικές συνθήκες (λαμπρότητα 1cd/m^2 με λαμπτήρα αναφοράς τον HPS)

| | | |
|------------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Πλάτος δρόμου | 6m | |
| Εγκατάσταση | Αμφίπλευρη | |
| Αριθμός λωρίδων | 2 | |
| Τύπος φωτιστικού | Philips SGS 203 PC P3 | |
| Λαμπτήρας | HPS | MH |
| Ύψος | 7.0m | 7.0m |
| Απόσταση | 31.50m | 50m |
| Προεξοχή | 0.30m | 0.30m |
| L_{ave} ($>0.64\text{cd/m}^2$) | 0.71cd/m^2 | $0,64\text{cd/m}^2$ |

B περίπτωση: λαμπτήρας αναφοράς ο λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων.

Αντικαθιστώντας τις τιμές των σταθερών από το πίνακα 7.6.8 στις εξισώσεις 7.6.15 και 7.6.16 για τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων βρίσκονται τα x , y για τη λαμπρότητα 1cd/m^2 . Στη προκειμένη περίπτωση $x=0.503415$ και $y=0.55$. Από τις τιμές αυτές υπολογίζεται η K'' και από αυτή η μεσοπική φωτεινή ροή. Βρίσκεται ότι $\Phi''_{[HPS]}=4873\text{lm}$ και $\Phi''_{[MH]}=8122\text{lm}$. Επανασχεδιάζουμε τη μελέτη με αυτά τα δεδομένα θεωρώντας ως επιθυμητή λαμπρότητα την 1.231cd/m^2 . Τα αποτελέσματα αναγράφονται στο πίνακα 7.9.15.

Και πάλι η κατάσταση είναι ανεστραμμένη. Η εγκατάσταση με τους λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων είναι σημαντικά οικονομικότερη από την εγκατάσταση με λαμπτήρες νατρίου, όπως και η εξοικονόμηση ενέργειας είναι σημαντική.

Η διαφορά στις δύο περιπτώσεις έγκειται στη διαφορετική επιθυμητή λαμπρότητα που επελέγη. Στη δεύτερη περίπτωση είναι σχεδόν τριπλάσια της πρώτης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αποστάσεις των ιστών στη δεύτερη περίπτωση

να είναι σημαντικά μειωμένη. Παρατηρούμε ότι στη περίπτωση φωτισμού με νατρίου υψηλής από 26.50m μεταβάλλεται σε 19m ενώ στο φωτισμό με μεταλλικά αλογονίδια από 50m μεταβάλλεται σε 31.50m.

Πίνακας 7.9.15 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης φωτισμού για τους δύο υποθετικούς λαμπτήρες σε μεσοπικές συνθήκες (λαμπρότητα 1cd/m^2 με λαμπτήρα αναφοράς τον MH)

| | | |
|------------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Πλάτος δρόμου | 6m | |
| Εγκατάσταση | Αμφίπλευρη | |
| Αριθμός λωρίδων | 2 | |
| Τύπος φωτιστικού | Philips SGS 203 PC P3 | |
| Λαμπτήρας | HPS | MH |
| Ύψος | 7.0m | 7.0m |
| Απόσταση | 19.00m | 31.50m |
| Προεξοχή | 0.55m | 0.30m |
| L_{ave} ($>1.23\text{cd/m}^2$) | 1.23cd/m^2 | 1.23cd/m^2 |

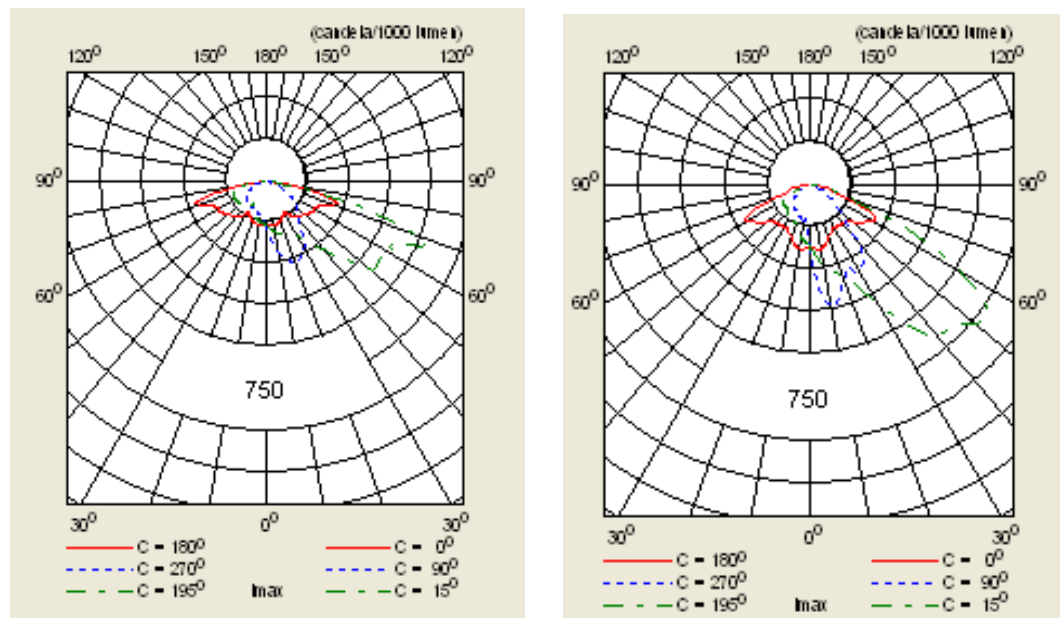
Πρέπει να παρατηρηθεί ότι η εγκατάσταση με τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων υπό φωτοπικές συνθήκες και σε μεσοπικές συνθήκες στη περίπτωση B είναι ταυτόσημες. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί ως επιθυμητή λαμπρότητα στη περίπτωση B ετέθη η μεσοπική λαμπρότητα που παρουσίαζε στη φωτοπική μελέτη. Το ίδιο συμβαίνει και στη περίπτωση μεσοπικής μελέτης A για το λαμπτήρα νατρίου υψηλής, δηλαδή να είναι ταυτόσημη με την φωτοπική μελέτη.

Αυτό που στοχεύει να δείξει το παράδειγμα είναι το εξής: όταν έχουμε φωτοπική λαμπρότητα 1cd/m^2 με φωτισμό προκαλούμενο από λαμπτήρα νατρίου υψηλής η λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής είναι 0.647cd/m^2 , ενώ αν ο φωτισμός προκαλείται από λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων η αντιλαμβανόμενη λαμπρότητα είναι 1.213cd/m^2 . Το ζητούμενο είναι ποια λαμπρότητα πρέπει να αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής; Αυτό πρέπει να καθορίζεται από τις προδιαγραφές. Δηλαδή να ορίζεται η επιθυμητή λαμπρότητα σε φωτοπικές μονάδες καθώς και ο τύπος λαμπτήρα που τη προκαλεί. Αυτό θα έχει ως συνέπεια να γνωρίζο με τη λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής και να μπορούμε να πραγματοποιήσουμε τη μελέτη φωτισμού χρησιμοποιώντας οποιονδήποτε λαμπτήρα. Αυτό γιατί με βάση το προτεινόμενο μοντέλο αν είναι γνωστή η φασματική κατανομή του λαμπτήρα είναι δυνατός ο υπολογισμός της μεσοπικής του φωτεινής ροής στα

επίπεδα φωτισμού που καθορίζει η προδιαγραφή. Σε διαφορετική περίπτωση δεν είναι δυνατή η χρήση οποιουδήποτε μεσοπικού ή μοντέλου. Αυτό γιατί δεν είναι γνωστή η επιθυμητή λαμπρότητα, και όπως είδαμε οι μελέτες διαφέρουν σημαντικά (περιπτώσεις Α και Β).

7.9.5.2 Παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου σε μελέτη φωτισμού δρόμου, με χρήση των διεθνών προδιαγραφών.

Θα εξεταστεί η περίπτωση φωτισμού δρόμου κλάσης C.I.E. M3 πλάτους 6m, με ασφαλτό τύπου C.I.E. R3. Σε αντίθεση με το προηγούμενο παράδειγμα, τα πολικά διαγράμματα δεν θεωρούνται όμοια. Τα πολικά διαγράμματα δίνονται στο σχήμα 7.9.9



Σχήμα 7.9.9 Πολικά διαγράμματα για το φωτιστικό Philips SGS 203 PC P3 με λαμπτήρες SON TP 70W (αριστερά) και CDM 70W/830 (δεξιά)

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές θα πρέπει $L_{average} > 1.0 \text{ cd/m}^2$, $L_{minimum}/L_{average} > 0.40$ και $TI < 20\%$. Τα φωτιστικά που επιλέχθηκαν είναι τα Philips SGS 203 PC P3, τα οποία δέχονται λαμπτήρες SON TP 70W και CDM 70W/830 οι οποίοι έχουν την ίδια φωτοπική ροή 6600lm. Με τη χρήση του Calculux road πραγματοποιείται η μελέτη, θεωρώντας φωτοπικές συνθήκες. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτό το παράδειγμα γίνεται βελτιστοποίηση ως προς όλα τα μεγέθη της εγκατάστασης και όχι μόνο ως προς την απόσταση των ιστών. Τα αποτελέσματα αυτής αναγράφονται στο πίνακα 7.9.16

Παρατηρούμε ότι η εγκατάσταση με λαμπτήρες νατρίου είναι οικονομικότερη από αυτήν με λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων. Η απόσταση είναι μικρότερη κατά 3.5m ενώ το ύψος του ιστού είναι μικρότερο κατά 1m.

Πίνακας 7.9.16 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης φωτισμού για τους δύο λαμπτήρες σε φωτοπικές συνθήκες.

| | | |
|--------------------------------|-----------------------|---------------|
| CIE class | M3 | |
| Πλάτος δρόμου | 6m | |
| Τύπος ανάκλασης | R3 | |
| Εγκατάσταση | Αμφίπλευρη | |
| Αριθμός λωρίδων | 2 | |
| Τύπος φωτιστικού | Philips SGS 203 PC P3 | |
| Λαμπτήρας | SON TP 70W | CDM 70W/830 |
| Ύψος | 7.0m | 8.0m |
| Απόσταση | 31.50m | 28.00m |
| Προεξοχή | 0.30m | 0.30m |
| Tilt90 | 0 | 3 |
| L_{ave} ($>1cd/m^2$) | 1.00 cd/m^2 | 1.00 cd/m^2 |
| L_{min}/L_{aver} (>0.40) | 0.42 | 0.41 |
| TI(%) (<20) | 0.66 | 0.55 |
| UI (>0.50) | 14.80 | 3.8 |

Όπως έχει αναφερθεί όμως η λαμπρότητα $1cd/m^2$, βρίσκεται εντός των ορίων της μεσοπικής όρασης. Η πραγματική λαμπρότητα που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής, σύμφωνα με το αναπτυχθέν μοντέλο, στη περίπτωση της εγκατάστασης με τον λαμπτήρα νατρίου θα είναι $L''=0.467cd/m^2$, ενώ στη περίπτωση της εγκατάστασης με λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων θα είναι $L''=1.231cd/m^2$. Αν θεωρήσουμε ότι οι προδιαγραφές αναφέρονται σε φωτισμό με λαμπτήρα νατρίου υψηλής τότε για να γίνει η σύγκριση θα πρέπει να επανασχεδιασθεί η μελέτη με επιθυμητή λαμπρότητα $0.467cd/m^2$, και τις μεσοπικές φωτεινές ροές των λαμπτήρων. Υπολογίζοντας τα x, y με τη γνωστή μεθοδολογία υπολογίζονται οι μεσοπικές ροές των λαμπτήρων. Βρίσκεται ότι $\Phi''_{[HPS]}=3536lm$ και $\Phi''_{[MH]}=7127lm$. Τα αποτελέσματα της νέας μελέτης αναγράφονται στο πίνακα 7.9.17

Πίνακας 7.9.17 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης φωτισμού για τους δύο λαμπτήρες σε μεσοπικές συνθήκες.

| | | |
|--|-----------------------|----------------------|
| CIE class | M3 | |
| Πλάτος δρόμου | 6m | |
| Τύπος ανάκλασης | R3 | |
| Εγκατάσταση | Αμφίπλευρη | |
| Αριθμός λωρίδων | 2 | |
| Τύπος φωτιστικού | Philips SGS 203 PC P3 | |
| Λαμπτήρας | SON TP 70W | CDM 70W/830 |
| Ύψος | 7.0m | 12.0m |
| Απόσταση | 35.50m | 43.50m |
| Προεξοχή | 0.40m | 0m |
| Tilt90 | 1 | 2 |
| L_{ave} ($>0.467\text{cd/m}^2$) | 0.47 cd/m^2 | 0.56 cd/m^2 |
| L_{min}/L_{aver} (>0.40) | 0.41 | 0.41 |
| TI(%) (<20) | 0.52 | 0.51 |
| UI (>0.50) | 13.70 | 2.7 |

Κεφάλαιο 8: Σχολιασμός του μοντέλου

8.1 Σύγκριση με τα μοντέλα άλλων ερευνητών

8.1.1 Σύγκριση ισοδυνάμων λαμπροτήτων HPS/MH

Καταρχήν θα πρέπει να σημειώσουμε μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στο μοντέλο που προτείνεται από την διατριβή αυτή και τα υπάρχοντα άλλων ερευνητών. Οι μέχρι τώρα αναπτυχθέντες προτάσεις για τη μελέτη της μεσοπικής όρασης αποσκοπούν στην εύρεση καμπύλων μεσοπικής φασματικής ευαισθησίας οι οποίες θα είναι εφαρμόσιμες σε κάθε φασματική κατανομή. Η επιλογή της κατάλληλης καμπύλης γίνεται ανάλογα τη μετρούμενη φωτοπική λαμπρότητα. Αυτό στο κεφάλαιο 5 αναλύθηκε και δείχθηκε ότι δεν αποτελεί ορθή λύση. Εξαίρεση αποτελούν τα γραμμικά μοντέλα τα οποία παράγουν μεσοπικές καμπύλες φασματικής ευαισθησίας οι οποίες δεν εφαρμόζονται σε όλες τις φασματικές κατανομές. Γίνεται μια ταξινόμηση των φασματικών κατανομών ανάλογα με το λόγο S/P. Σε κάθε τιμή του λόγου S/P αντιστοιχεί μια διαφορετική οικογένεια καμπύλων φασματικής ευαισθησίας. Και αυτή η προσέγγιση αν και προσπαθεί μια «εξατομίκευση» των οικογενειών μεσοπικών καμπύλων δεν είναι αρκετή γιατί το κριτήριο ταξινόμησης S/P είναι ένα «φτωχό» κριτήριο χαρακτηρισμού φασματικών κατανομών (κεφ.5, 6)

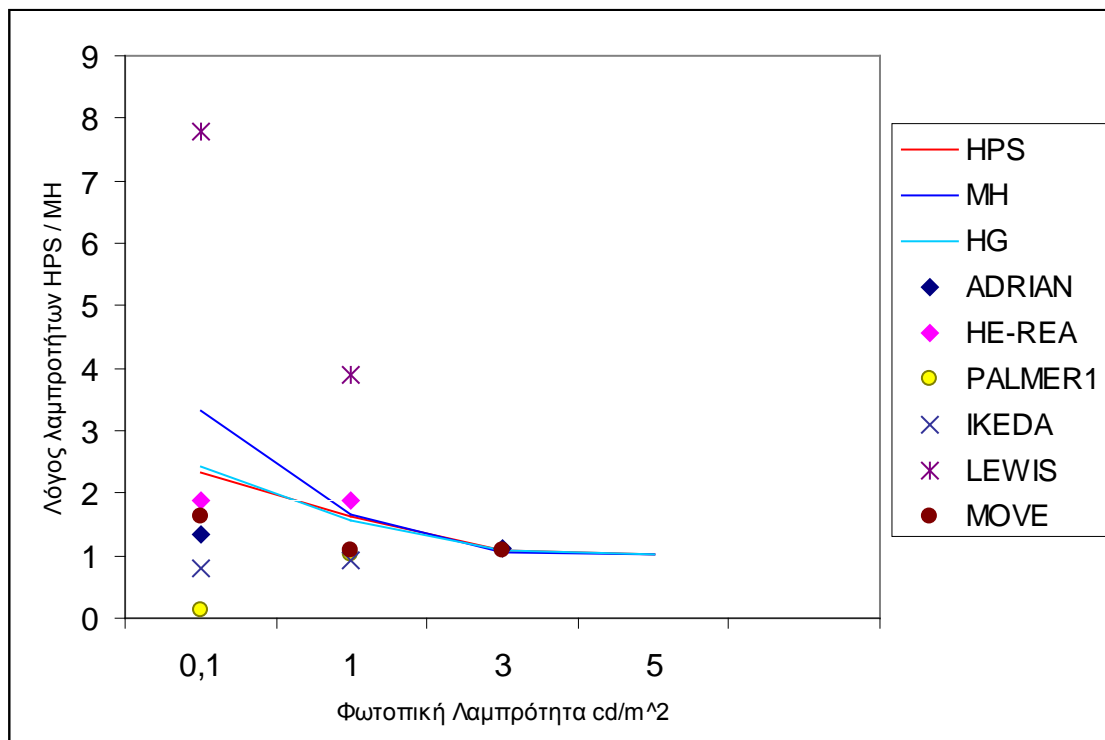
Αντίθετα το προτεινόμενο μοντέλο αντιστοιχεί σε κάθε φασματική κατανομή μια διαφορετική οικογένεια μεσοπικών καμπύλων φασματικής ευαισθησίας, πράγμα που αποτελεί και τη πρωτοτυπία του. Αυτό βέβαια δημιουργεί την εντύπωση ότι ένα τέτοιο μοντέλο είναι τόσο δύσχρηστο ώστε να είναι πρακτικά ανεφάρμοστο. Γιατί εύλογα θεωρεί κανείς ότι για την εφαρμογή του μοντέλου θα πρέπει να είναι γνωστές οι μεσοπικές καμπύλες για κάθε φασματική κατανομή των λαμπτήρων που διατίθενται στο εμπόριο, κάτι που οπωσδήποτε δεν είναι εφικτό. Όπως είδαμε όμως, τα πράγματα δεν είναι ακριβώς έτσι (παρ. 7.9.2).

Έτσι παρόλο που η στοχοποίηση των άλλων μοντέλων και του προτεινόμενου είναι τελείως διαφορετική, τα πειραματικά δεδομένα των άλλων ερευνητών δεν μπορεί παρά να θεωρηθούν ως μία βάση σύγκρισης. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους για τους οποίους επιλέχθηκαν για μελέτη οι συγκεκριμένοι λαμπτήρες. Η μελέτη της

συμπεριφοράς των λαμπτήρων αυτών στην μεσοπική περιοχή έχει αποτελέσει αντικείμενο των περισσότερων ερευνητών της μεσοπικής περιοχής της όρασης. Στο πίνακα 8.1.1 αναγράφονται οι λόγοι της φωτοπικής λαμπρότητας νατρίου υψηλής πίεσης προς τη φωτοπική λαμπρότητα μεταλλικών αλογονιδίων που δίνουν το ίδιο οπτικό αποτέλεσμα, οι λόγοι αυτοί παρίστανται στο σχήμα 8.1.1

Πίνακας 8.1.1 Λόγοι ισοδύναμων λαμπροτήτων HPS/MH

| L (cd/m ²) | ADRIAN | HE-REA | PALMER1 | IKEDA | LEWEIS | MOVE | ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ | | |
|---------------------------|--------|--------|---------|----------|--------|------|----------------------|------|------|
| | | | | | | | ΥΠΟΒΑΘΡΟ | | |
| | | | | | | | HPS | MH | HG |
| 0,1 | 1,82 | 1,88 | 0,115 | 0,810345 | 7,8 | 1,64 | 2.34 | 3.31 | 2.43 |
| 1 | 1,35 | 1,88 | 1,02 | 0,939394 | 3,9 | 1,09 | 1.63 | 1.67 | 1.56 |
| 3 | 1,13 | | | | | 1,09 | 1.07 | 1.06 | 1.07 |
| 5 | | | | | | | 1.01 | 1.01 | 1.01 |



Σχήμα 8.1.1 Λόγοι ισοδύναμων λαμπροτήτων HPS/MH

Παρατηρούμε ότι οι τιμές των λόγων που παράγονται από το προτεινόμενο μοντέλο βρίσκονται αρκετά κοντά στις τιμές άλλων ερευνητών. Σε κάθε περίπτωση είναι όμως μεγαλύτερες με εξαίρεση το μοντέλο του Lewis. Επίσης παρατηρούμε ότι ο λόγος αυτός είναι διαφορετικός ανάλογα με το υπόβαθρο που χρησιμοποιείται. Αυτό αποτελεί και το κύριο χαρακτηριστικό του μοντέλου. Ο λόγος αυτός λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όταν χρησιμοποιείται υπόβαθρο λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί ο λαμπτήρας αυτός είναι πλούσιος σε ακτινοβολίες μικρού μήκους κύματος και παρουσιάζει πολύ καλύτερη απόδοση στη μεσοπική περιοχή. Αντίθετα ο λόγος αυτός λαμβάνει σχεδόν την ίδια τιμή αν το υπόβαθρο δημιουργείται από λαμπτήρα ατμών υδραργύρου ή νατρίου υψηλής. Αναμενόμενο αποτέλεσμα δεδομένου ότι και οι δύο λαμπτήρες είναι πλούσιες σε ερυθρές και κίτρινες ακτινοβολίες αντίστοιχα.

Έτσι λοιπόν ενώ υπάρχουν διαφορές στις μετρούμενες τιμές οι πειραματικές μετρήσεις δεν είναι εκτός ορίων, όπως για παράδειγμα οι μετρήσεις του Lewis. Οι διαφορές αυτές μπορεί να αποδοθούν στις διαφορετικές επιλογές κριτηρίου ταύτισης στα διάφορα πειράματα. Τα μοντέλα των Rea-He, Move, Lewis μελετούν το χρόνο αντίδρασης, ενώ τα μοντέλα Ikeda, Palmer χρησιμοποιούν ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας. Τέλος το μοντέλο του Adrian βασίζεται στις μετρήσεις της Kinney. Στο μοντέλο που προτείνεται χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ελαχιστοποίησης διαχωριστικού ορίου η οποία περιορίζει ουσιαστικά την επίδραση των διαφορετικών χρωματικών χαρακτηριστικών των ακτινοβολιών κατά τη ταύτιση.

Επίσης παρατηρείται ότι με υπόβαθρο δημιουργούμενου από λαμπτήρα ατμών υδραργύρου στην περιοχή $3-5\text{cd/m}^2$, ο λόγος αυτός έχει τη μεγαλύτερη τιμή. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην μεγάλη περιεκτικότητα της φασματικής κατανομής σε ερυθρές ακτινοβολίες.

Από τα μοντέλα που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα θεωρούνται σημαντικότερα τα μοντέλα του Rea και MOVE. Παρατηρούμε ότι οι διαφορές που παρουσιάζονται με αυτά τα μοντέλα είναι σημαντικές, ιδιαίτερα στις χαμηλές φωτοπικές λαμπρότητες. Σε καμία όμως περίπτωση δεν είναι τεράστιες, όπως για παράδειγμα οι τιμές που δίνει το μοντέλο του Lewis. Λαμβάνοντας δε υπόψη ότι και μεταξύ τους τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν πολύ μεγάλες διαφορές, όπως φαίνεται από το σχήμα στις 3cd/m^2 , οι διαφορές που παρουσιάζει το προτεινόμενο μοντέλο δεν το τοποθετούν εκτός πραγματικότητας, θα

μπορούσε μάλιστα να αποδοθεί στις διαφορετικές πειραματικές μεθόδους και στη διαφορετική θεωρητική τοποθέτηση των ερευνητών.

8.1.2 Σύγκριση των τιμών μεσοπικής λαμπρότητας οι οποίες δίνονται από τα τρία μοντέλα συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας

Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η μεσοπική λαμπρότητα η οποία αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη τιμή φωτοπικής, σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο έχει αναλυθεί στη παράγραφο 7.9.2. Δηλαδή, για κάθε τύπο λαμπτήρα, αντικαθιστούμε τις τιμές των σταθερών από το πίνακα 7.6.8 στις εξισώσεις 7.6.15 και 7.6.16. Ακολούθως υπολογίζονται τα x , y για την επιθυμητή φωτοπική λαμπρότητα και εξ αυτών η $K''(\lambda)$. Από αυτήν υπολογίζεται μεσοπική λαμπρότητα. Οι αντίστοιχες τιμές για τα μοντέλα Rea και MOVE βρίσκονται από τους πίνακες 4.7.1 και 4.12.2, χρησιμοποιώντας το λόγο S/P ο οποίος δίνεται στο πίνακα 8.1.2

Πίνακας 8.1.2 Φωτοπική, σκοτοπική λαμπρότητα και λόγος S/P για τους τρεις λαμπτήρες

| | HPS | MH | HG |
|--|---------|---------|--------|
| Φωτοπική λαμπρότητα cd/m ² | 15506.3 | 17434.4 | 8374.4 |
| Σκοτοπική λαμπρότητα cd/m ² | 7346.5 | 27619.1 | 7463.5 |
| Λόγος S/P | 0.47 | 0.89 | 1.58 |

Επειδή στα μοντέλα Rea και MOVE τα επίπεδα φωτοπικών λαμπροτήτων δεν είναι ίδια, κατασκευάζουμε τους πίνακες 8.1.3 έως 8.1.5 για τα κοινά επίπεδα λαμπρότητας.

Πίνακας 8.1.3 Μεσοπικές λαμπρότητες για το λαμπτήρα νατρίου υψηλής.

| Φωτοπική λαμπρότητα cd/m ² | MOVE | REA | Προτεινόμενο μοντέλο |
|---------------------------------------|----------|---------|----------------------|
| 0.01 | 0.03 | 0.0048 | 0.00474 |
| 0.03 | 0.072001 | 0.015 | 0.01425 |
| 0.1 | 0.143425 | 0.05786 | 0.04804 |
| 0.3 | 0.285788 | 0.23982 | 0.15212 |

Πίνακας 8.1.4 Μεσοπικές λαμπρότητες για το λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων.

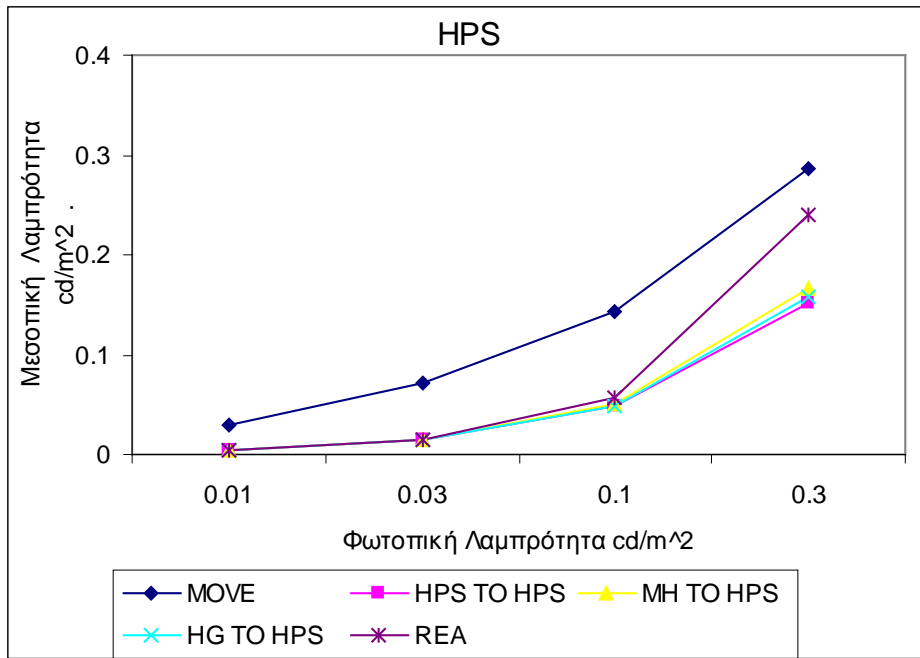
| Φωτοπική λαμπρότητα cd/m ² | MOVE | REA | Προτεινόμενο μοντέλο |
|---|---------|---------|-------------------------|
| 0.01 | 0.01481 | 0.01547 | 0.01582 |
| 0.03 | 0.03988 | 0.04452 | 0.04733 |
| 0.1 | 0.12198 | 0.13383 | 0.15553 |
| 0.3 | 0.34426 | 0.34074 | 0.44256 |

Πίνακας 8.1.5 Μεσοπικές λαμπρότητες για το λαμπτήρα ατμών υδραργύρου.

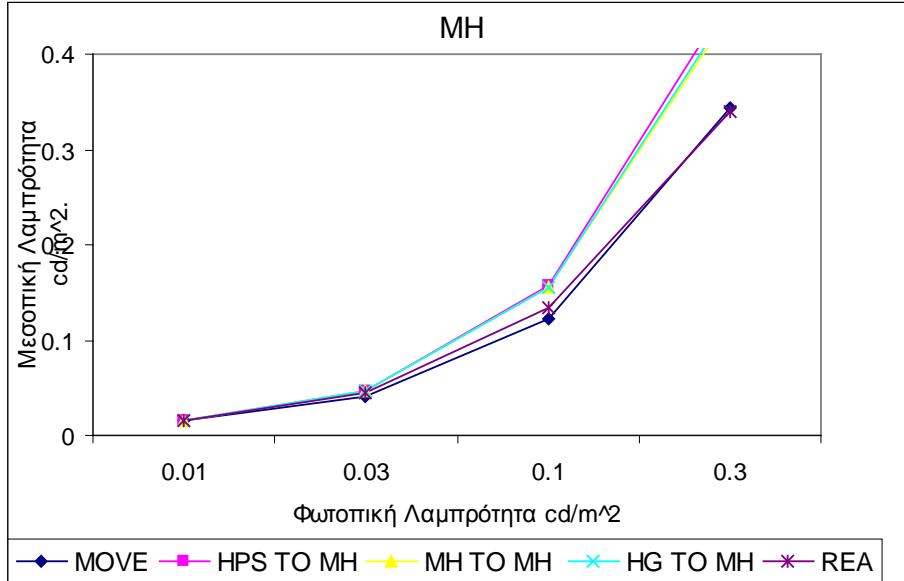
| Φωτοπική λαμπρότητα cd/m ² | MOVE | REA | Προτεινόμενο μοντέλο |
|---|----------|---------|-------------------------|
| 0.01 | 0.03 | 0.0048 | 0.00891 |
| 0.03 | 0.072001 | 0.015 | 0.02674 |
| 0.1 | 0.143425 | 0.05786 | 0.08916 |
| 0.3 | 0.285788 | 0.23982 | 0.26761 |

Από αυτούς του πίνακες είναι δυνατό να κατασκευαστούν τα διαγράμματα 8.1.2 έως 8.1.4, στα οποία παρίσταται η μεσοπική λαμπρότητα κάθε λαμπτήρα συναρτήσει της φωτοπικής, σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα.

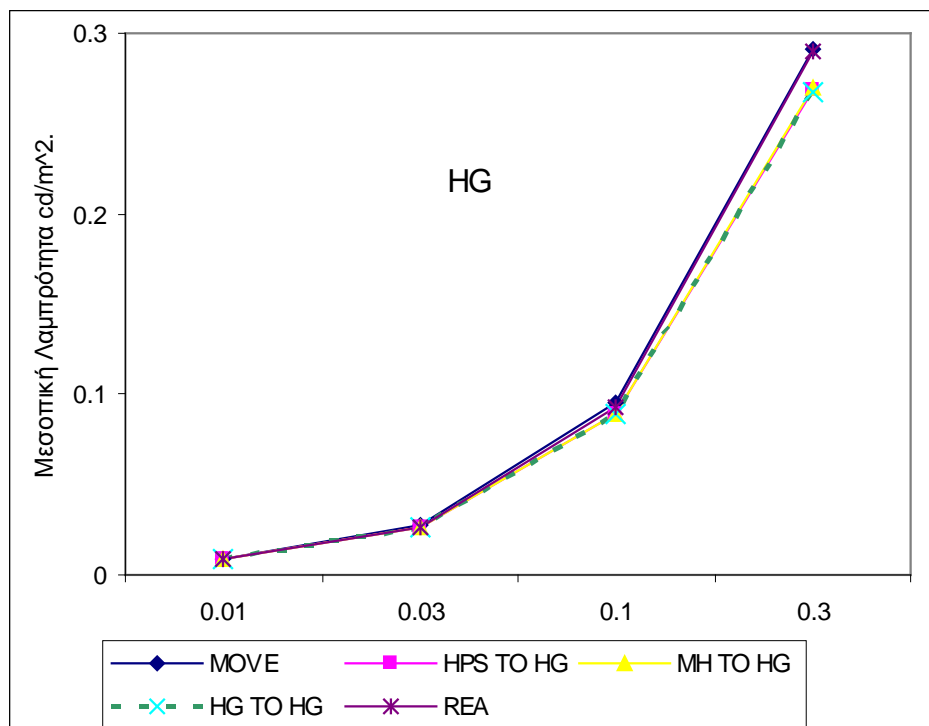
Παρατηρούμε ότι υπάρχουν διαφορές, σημαντικές αλλά σε καμιά περίπτωση εκτός των ορίων που θέτουν οι διαφορετικές πειραματικές μέθοδοι και το πειραματικό σφάλμα. Το προτεινόμενο μοντέλο και το μοντέλο του Rea μέχρι τις 0.6cd/m², σχεδόν ταυτίζονται, ενώ το MOVE παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις και από τα δύο. Στις 0.3cd/m², στις περιπτώσεις νατρίου υψηλής και ατμών υδραργύρου το μοντέλο Rea προσεγγίζει το MOVE ενώ στη περίπτωση των μεταλλικών αλογονιδίων προσεγγίζει το προτεινόμενο μοντέλο. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής και ατμών υδραργύρου έχουν μικρό λόγο S/P. Τέλος παρατηρούμε ότι το μοντέλο MOVE παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με τα δύο άλλα.



Σχήμα 8.1.2 Μεσοπική λαμπρότητα για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής συναρτήσεως της φωτοπικής λαμπρότητας και για τα τρία μοντέλα.



Σχήμα 8.1.3 Μεσοπική λαμπρότητα για τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων συναρτήσεως της φωτοπικής λαμπρότητας και για τα τρία μοντέλα.



Σχήμα 8.1.4 Μεσοπική λαμπρότητα για τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας και για τα τρία μοντέλα.

Για να γίνει η σύγκριση των τριών μοντέλων θα πρέπει να βρεθεί η μεσοπική ροή για τις ίδιες τιμές φωτοπικής λαμπρότητας και σε μεγαλύτερο εύρος τιμών. Αυτό είναι αρκετά προβληματικό δεδομένου ότι το μοντέλο του Rea δίνει τις τιμές του x για λαμπρότητες μέχρι 0.6cd/m^2 , επίσης θεωρεί ότι για μεγαλύτερες τιμές, η όραση είναι φωτοπική. Το δε μοντέλο του MOVE δίνει τις τιμές του x για λαμπρότητες 0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 1, 3, 10cd/m^2 . Η απόσταση όμως των 3 με τις 10cd/m^2 είναι αρκετά μεγάλη ώστε να γίνει γραμμική παρεμβολή. Το πρόβλημα λύνεται εάν προσεγγίσουμε τη μεταβολή του x σε σχέση με τη φωτοπική λαμπρότητα με μια συνάρτηση της μορφής $x=f(L)$. Αυτό έγινε με το προαναφερθέν λογισμικό και έδωσε ως προσέγγιση συναρτήσεις της μορφής:

$$x = a - b \cdot \exp(-c \cdot L^d) \quad 8.1.2.1$$

Οι τιμές των σταθερών, το τυπικό σφάλμα και ο συντελεστής συσχέτισης δίνονται στο πίνακα 8.1.6.

Πίνακας 8.1.6 Χαρακτηριστικά της προσέγγισης του x

| Συντελεστής | MOVE | | | REA | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | HPS | MH | HG | HPS | MH | HG |
| a | 1.986 | 2.649 | 2.874 | 1.000 | 1.027 | 1.004 |
| b | 3.146 | 4.254 | 5.762 | 0.997 | 1.031 | 1.004 |
| c | 0.874 | 0.782 | 0.971 | 2.112 | 1.513 | 1.757 |
| d | 0.141 | 0.093 | 0.071 | 1.538 | 0.947 | 1.201 |
| Τυπικό σφάλμα | 0.0368 | 0.0311 | 0.0321 | 0.0208 | 0.0069 | 0.0328 |
| Συντ. συσχέτισης | 0.997 | 0.998 | 0.997 | 0.999 | 0.999 | 0.997 |

Στη συνέχεια υπολογίζονται όπως και προηγουμένως οι μεσοπικές λαμπρότητες για τα τρία μοντέλα και προκύπτει ο πίνακας 8.1.7 έως 8.1.9. Από τους πίνακες αυτούς παρατηρείται ότι στο μοντέλο Rea μετά 0.6cd/m^2 , ισχύει $L_{mes}=L_{phot}$, στο μοντέλο MOVE υπάρχουν διαφορές και στις 7cd/m^2 , ενώ στο προτεινόμενο μοντέλο οι διαφορές τείνουν να μηδενιστούν στη περιοχή των 6cd/m^2 . Από του πίνακες αυτούς κατασκευάζονται τα διαγράμματα 8.1.5 έως 8.1.7.

Παρατηρούμε ότι με εξαίρεση τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου οι τιμές που δίνει το προτεινόμενο μοντέλο είναι ανάμεσα σε αυτές που δίνουν τα δύο άλλα μοντέλα. Παρατηρούμε ότι το προτεινόμενο μοντέλο και το μοντέλο Rea δίνουν τιμές που είναι κοντύτερα από αυτές που δίνει το μοντέλο MOVE. Επίσης παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις είναι εντονότερες σε πηγές με χαμηλό S/P. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην ομαδοποίηση που επιβάλλουν τα άλλα δύο μοντέλα, ενώ αντίθετα το προτεινόμενο μοντέλο αντιμετωπίζει κάθε πηγή ξεχωριστά.

Πίνακας 8.1.7 Μεσοπικές λαμπρότητες για το λαμπτήρα νατρίου υψηλής.

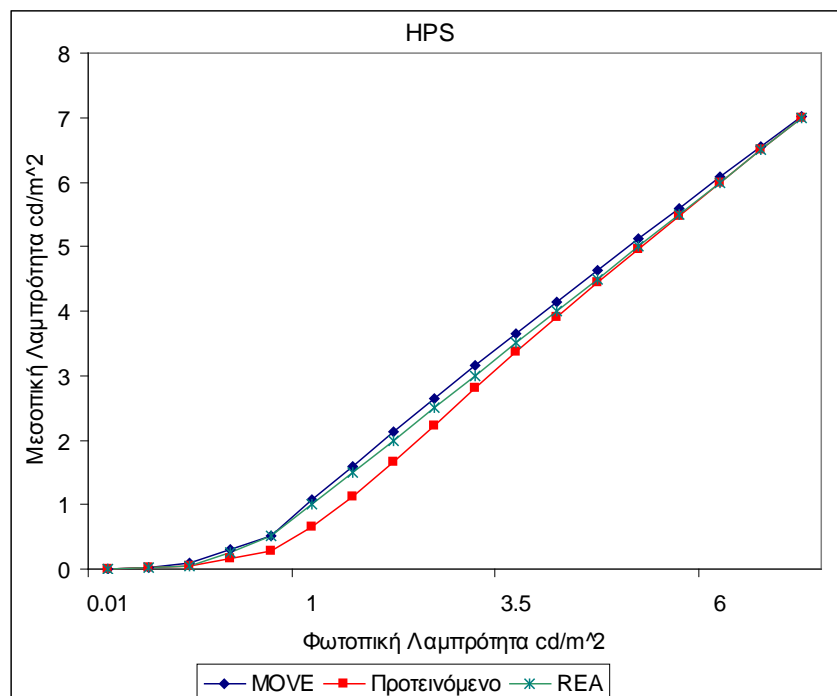
| Φωτοπική λαμπρότητα cd/m ² | MOVE | REA | Προτεινόμενο μοντέλο |
|---|---------|---------|-------------------------|
| 0.01 | 0.00457 | 0.00480 | 0.00474 |
| 0.03 | 0.02009 | 0.01476 | 0.01425 |
| 0.1 | 0.08695 | 0.05662 | 0.04804 |
| 0.3 | 0.30060 | 0.25263 | 0.15212 |
| 0.5 | 0.52060 | 0.51108 | 0.27137 |
| 1 | 1.06754 | 1.00000 | 0.64668 |
| 1.5 | 1.60226 | 1.50000 | 1.12131 |
| 2 | 2.12630 | 2.00000 | 1.66119 |
| 2.5 | 2.64061 | 2.50000 | 2.23047 |
| 3 | 3.14784 | 3.00000 | 2.80351 |
| 3.5 | 3.64823 | 3.50000 | 3.36648 |
| 4 | 4.1424 | 4.00000 | 3.91455 |
| 4.5 | 4.63157 | 4.50000 | 4.44813 |
| 5 | 5.11651 | 5.00000 | 4.96999 |
| 5.5 | 5.59705 | 5.50000 | 5.48338 |
| 6 | 6.07452 | 6.00000 | 5.99116 |
| 6.5 | 6.54885 | 6.50000 | 6.49547 |
| 7 | 7.02008 | 7.00000 | 6.99776 |

Πίνακας 8.1.8 Μεσοπικές λαμπρότητες για το λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων.

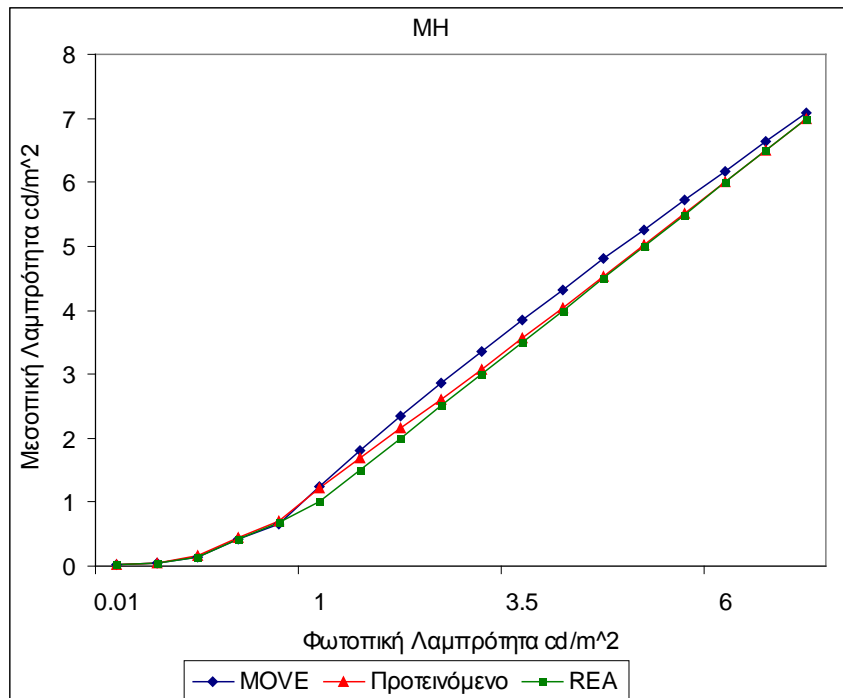
| Φωτοπική λαμπρότητα cd/m ² | MOVE | REA | Προτεινόμενο μοντέλο |
|---|---------|---------|-------------------------|
| 0.01 | 0.01541 | 0.01574 | 0.01582 |
| 0.03 | 0.04498 | 0.04671 | 0.04733 |
| 0.1 | 0.14454 | 0.15197 | 0.15553 |
| 0.3 | 0.41183 | 0.43278 | 0.44256 |
| 0.5 | 0.66389 | 0.67988 | 0.69662 |
| 1 | 1.25409 | 1.00000 | 1.23063 |
| 1.5 | 1.80876 | 1.50000 | 1.69912 |
| 2 | 2.34043 | 2.00000 | 2.15495 |
| 2.5 | 2.85440 | 2.50000 | 2.61525 |
| 3 | 3.35544 | 3.00000 | 3.08343 |
| 3.5 | 3.84543 | 3.50000 | 3.55899 |
| 4 | 4.32585 | 4.00000 | 4.04072 |
| 4.5 | 4.79878 | 4.50000 | 4.52740 |
| 5 | 5.26468 | 5.00000 | 5.01798 |
| 5.5 | 5.72421 | 5.50000 | 5.51151 |
| 6 | 6.17892 | 6.00000 | 6.00719 |
| 6.5 | 6.62856 | 6.50000 | 6.50439 |
| 7 | 7.07402 | 7.00000 | 7.00263 |

Πίνακας 8.1.9 Μεσοπικές λαμπρότητες για το λαμπτήρα ατμών υδραργύρου.

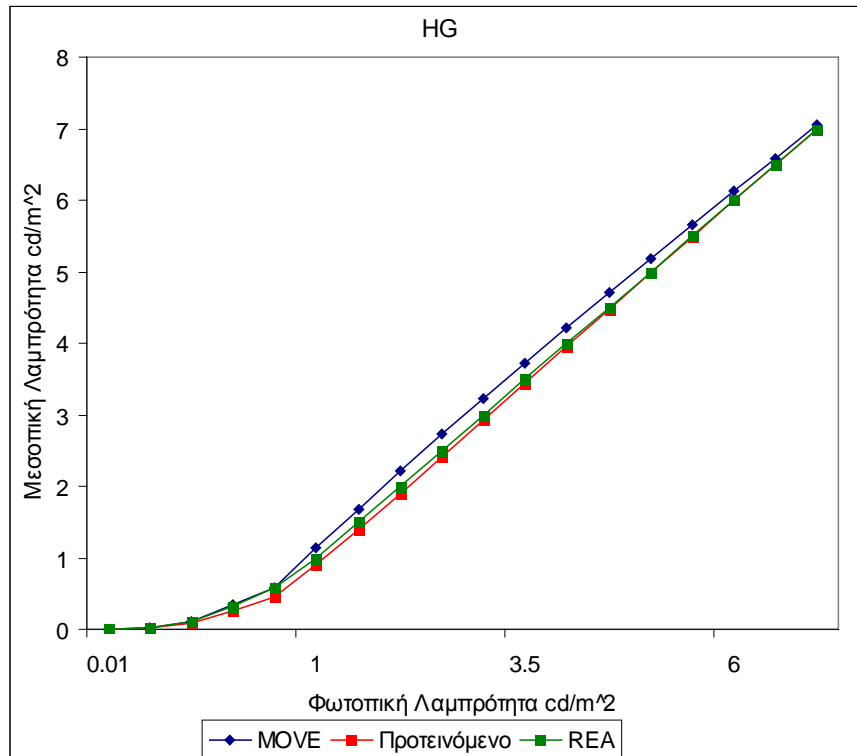
| Φωτοπική λαμπρότητα cd/m^2 | MOVE | REA | Προτεινόμενο μοντέλο |
|---|---------|---------|-------------------------|
| 0.01 | 0.00900 | 0.00896 | 0.00891 |
| 0.03 | 0.03046 | 0.02731 | 0.02674 |
| 0.1 | 0.11126 | 0.09691 | 0.08916 |
| 0.3 | 0.34711 | 0.33283 | 0.26761 |
| 0.5 | 0.57945 | 0.57945 | 0.44690 |
| 1 | 1.14195 | 1.00000 | 0.90651 |
| 1.5 | 1.68300 | 1.50000 | 1.38935 |
| 2 | 2.20941 | 2.00000 | 1.89261 |
| 2.5 | 2.72316 | 2.50000 | 2.40788 |
| 3 | 3.22828 | 3.00000 | 2.92748 |
| 3.5 | 3.72549 | 3.50000 | 3.44647 |
| 4 | 4.21539 | 4.00000 | 3.96244 |
| 4.5 | 4.69961 | 4.50000 | 4.47473 |
| 5 | 5.17901 | 5.00000 | 4.98358 |
| 5.5 | 5.65331 | 5.50000 | 5.48966 |
| 6 | 6.12426 | 6.00000 | 5.99365 |
| 6.5 | 6.59113 | 6.50000 | 6.49620 |
| 7 | 7.05508 | 7.00000 | 6.99777 |



Σχήμα 8.1.5 Μεσοπική λαμπρότητα για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής συνάρτησε της φωτοπικής λαμπρότητας και για τα τρία μοντέλα, για μεγάλες τιμές λαμπρότητας.



Σχήμα 8.1.6 Μεσοπική λαμπρότητα για τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων συναρτήσεως της φωτοπικής λαμπρότητας και για τα τρία μοντέλα, για μεγάλες τιμές λαμπρότητας.



Σχήμα 8.1.7 Μεσοπική λαμπρότητα για τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου συναρτήσεως της φωτοπικής λαμπρότητας και για τα τρία μοντέλα, για μεγάλες τιμές λαμπρότητας.

8.1.3 Σύγκριση του τρόπου μεταβολής της ροής κατά τη μετάβαση από τη φωτοπική στη σκοτοπική όραση

Προτεινόμενο μοντέλο

Σημαντικότερες όμως διαφορές παρουσιάζονται, σε σχέση με αυτά τα μοντέλα στο τρόπο που μεταβάλλεται η ροή ενός λαμπτήρα στη μετάβαση από τη σκοτοπική στη φωτοπική περιοχή. Σύμφωνα με τη CIE [50,81] κάθε μεσοπικό μοντέλο πρέπει να εξασφαλίζει τη ομαλή μετάβαση από τη σκοτοπική στη φωτοπική περιοχή. Καταρχήν αυτό σημαίνει μια ομαλή και μονότονη μεταβολή της μέγιστης φασματικής ευαισθησίας καθώς και του μήκους κύματος που αυτή παρουσιάζεται. Το μοντέλο που προτείνεται όπως εδείχθη στην παράγραφο 7.8 ικανοποιεί αυτές τις συνθήκες.

Επιπλέον όμως η έννοια της ομαλής μετάβασης επιβάλλει και η φωτεινή ροή του λαμπτήρα να μεταβάλλεται ομαλά από τη σκοτοπική στη φωτοπική φωτεινή ροή. Είναι προφανές ότι η μεσοπική ροή ενός λαμπτήρα δε μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την $\max(\Phi, \Phi')$ ούτε μικρότερη από την $\min(\Phi, \Phi')$. Για να βρεθεί ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η φωτεινή ροή θα πρέπει να καθορισθεί η φασματική κατανομή αναφοράς. Καθορίζεται λοιπόν ένας από τους τρεις λαμπτήρες ως αναφορά και βρίσκουμε για διάφορα επίπεδα λαμπρότητας τις μεσοπικές ροές και των τριών λαμπτήρων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τους άλλους δύο λαμπτήρες. Με αυτό τον τρόπο κατασκευάζονται οι πίνακες 8.1.10 έως 8.1.12. Στα σχήματα 8.1.8 έως 8.1.11 παριστάνεται γραφικά η μεταβολή των μεσοπικών φωτεινών ροών σε κάθε περίπτωση.

Από τους πίνακες και τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η μεταβολή γίνεται κατά τρόπο ομαλό και δεν υπάρχουν τιμές λαμπρότητας για τις οποίες η μεσοπική ροή να βρίσκεται εκτός του διαστήματος $[\Phi, \Phi']$. Επίσης οι διαφορές που παρουσιάζονται ανάλογα με τον λαμπτήρα αναφοράς είναι αισθητές όχι όμως μεγάλες

Πίνακας 8.1.10 Μεταβολή της μεσοπική ροής των τριών λαμπτήρων με λαμπτήρα αναφοράς τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής.

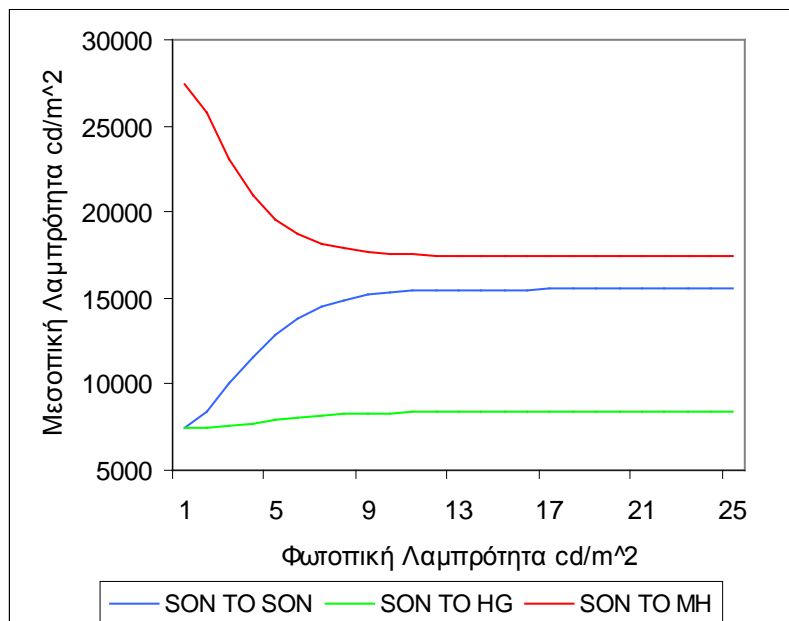
| L(cd/m ²) | Φ´[HPS] | Φ´[MH] | Φ´[HPS] |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| 0.1 | 7448.7 | 27246.6 | 7471.5 |
| 0.5 | 8416.0 | 24831.7 | 7506.2 |
| 1 | 10027.6 | 22135.5 | 7580.6 |
| 1.5 | 11591.6 | 20319.0 | 7725.1 |
| 2 | 12879.4 | 19193.9 | 7899.4 |
| 2.5 | 13834.5 | 18513.4 | 8057.6 |
| 3 | 14490.6 | 18101.5 | 8178.4 |
| 3.5 | 14914.7 | 17849.5 | 8260.5 |
| 4 | 15175.0 | 17693.3 | 8311.7 |
| 4.5 | 15327.5 | 17595.5 | 8341.5 |
| 5 | 15413.2 | 17534.1 | 8357.9 |
| 5.5 | 15459.4 | 17495.4 | 8366.4 |
| 6 | 15483.4 | 17471.3 | 8370.7 |
| 6.5 | 15495.5 | 17456.4 | 8372.7 |
| 7 | 15501.3 | 17447.4 | 8373.7 |
| 7.5 | 15504.1 | 17441.9 | 8374.1 |
| 8 | 15505.3 | 17438.7 | 8374. |
| 8.5 | 15505.9 | 17436.8 | 8374.3 |
| 9 | 15506.1 | 17435.7 | 8374.4 |
| 9.5 | 15506.2 | 17435.1 | 8374.4 |
| 10 | 15506.3 | 17434.8 | 8374.4 |
| 10.5 | 15506.3 | 17434.6 | 8374.4 |
| 11 | 15506.3 | 17434.5 | 8374.4 |
| 11.5 | 15506.3 | 17434.4 | 8374.4 |

Πίνακας 8.1.11 Μεταβολή της μεσοπική ροής των τριών λαμπτήρων με λαμπτήρα αναφοράς τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων.

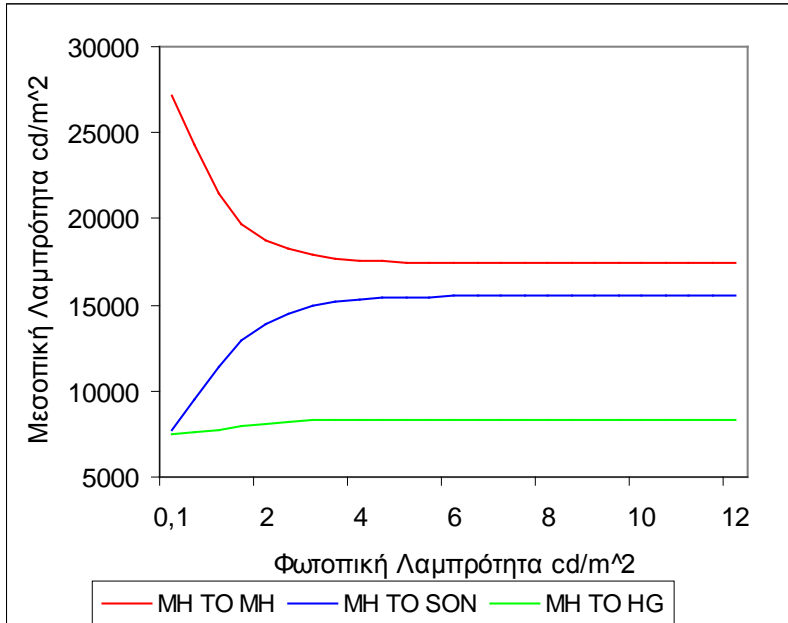
| L(cd/m ²) | Φ´[HPS] | Φ´[MH] | Φ´[HPS] |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| 0.1 | 7698.1 | 27115.5 | 7492.6 |
| 0.5 | 9481.8 | 24290.3 | 7598.3 |
| 1 | 11448.3 | 21455.3 | 7759.3 |
| 1.5 | 12892.8 | 19748.7 | 7936.1 |
| 2 | 13874.2 | 18785.1 | 8086.3 |
| 2.5 | 14510.8 | 18238.1 | 8195.6 |
| 3 | 14910.8 | 17919.2 | 8268.1 |
| 3.5 | 15156.1 | 17728.2 | 8313.2 |
| 4 | 15303.5 | 17611.8 | 8340.1 |
| 4.5 | 15390.4 | 17540.5 | 8355.5 |
| 5 | 15441.0 | 17497.1 | 8364.2 |
| 5.5 | 15469.9 | 17470.8 | 8368.9 |
| 6 | 15486.2 | 17455.3 | 8371.5 |
| 6.5 | 15495.3 | 17446.1 | 8372.9 |
| 7 | 15500.4 | 17440.9 | 8373.6 |
| 7.5 | 15503.1 | 17438.0 | 8374.0 |
| 8 | 15504.6 | 17436.3 | 8374.2 |
| 8.5 | 15505.4 | 17435.4 | 8374.3 |
| 9 | 15505.8 | 17434.9 | 8374.3 |
| 9.5 | 15506.0 | 17434.6 | 8374.4 |
| 10 | 15506.2 | 17434.5 | 8374.4 |
| 10.5 | 15506.2 | 17434.4 | 8374.4 |
| 11 | 15506.2 | 17434.4 | 8374.4 |
| 11.5 | 15506.3 | 17434.4 | 8374.4 |

Πίνακας 8.1.12 Μεταβολή της μεσοπική ροής των τριών λαμπτήρων με λαμπτήρα αναφοράς τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου.

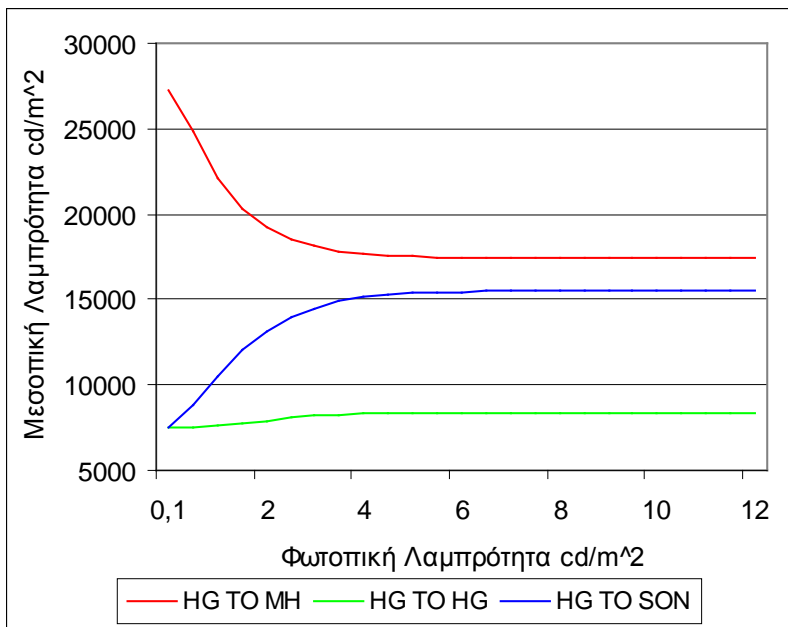
| L (cd/m ²) | Φ´[HPS] | Φ´[MH] | Φ´[HPS] |
|------------------------|---------|---------|---------|
| 0.1 | 7546.6 | 27246.6 | 7466.6 |
| 0.5 | 8836.1 | 24831.7 | 7485.1 |
| 1 | 10551.6 | 22135.5 | 7591.4 |
| 1.5 | 12012.6 | 20319.0 | 7756.6 |
| 2 | 13134.0 | 19193.9 | 7924.7 |
| 2.5 | 13942.6 | 18513.4 | 8065.8 |
| 3 | 14500.8 | 18101.5 | 8172.0 |
| 3.5 | 14873.6 | 17849.5 | 8246.3 |
| 4 | 15115.8 | 17693.3 | 8295.8 |
| 4.5 | 15269.6 | 17595.5 | 8327.4 |
| 5 | 15365.2 | 17534.1 | 8346.9 |
| 5.5 | 15423.5 | 17495.4 | 8358.6 |
| 6 | 15458.4 | 17471.3 | 8365.5 |
| 6.5 | 15479.0 | 17456.4 | 8369.5 |
| 7 | 15490.9 | 17447.4 | 8371.7 |
| 7.5 | 15497.7 | 17441.9 | 8373.0 |
| 8 | 15501.6 | 17438.7 | 8373.6 |
| 8.5 | 15503.7 | 17436.8 | 8374.0 |
| 9 | 15504.9 | 17435.7 | 8374.2 |
| 9.5 | 15505.6 | 17435.1 | 8374.3 |
| 10 | 15505.9 | 17434.8 | 8374.3 |
| 10.5 | 15506.1 | 17434.6 | 8374.4 |
| 11 | 15506.2 | 17434.5 | 8374.4 |
| 11.5 | 15506.2 | 17434.4 | 8374.4 |



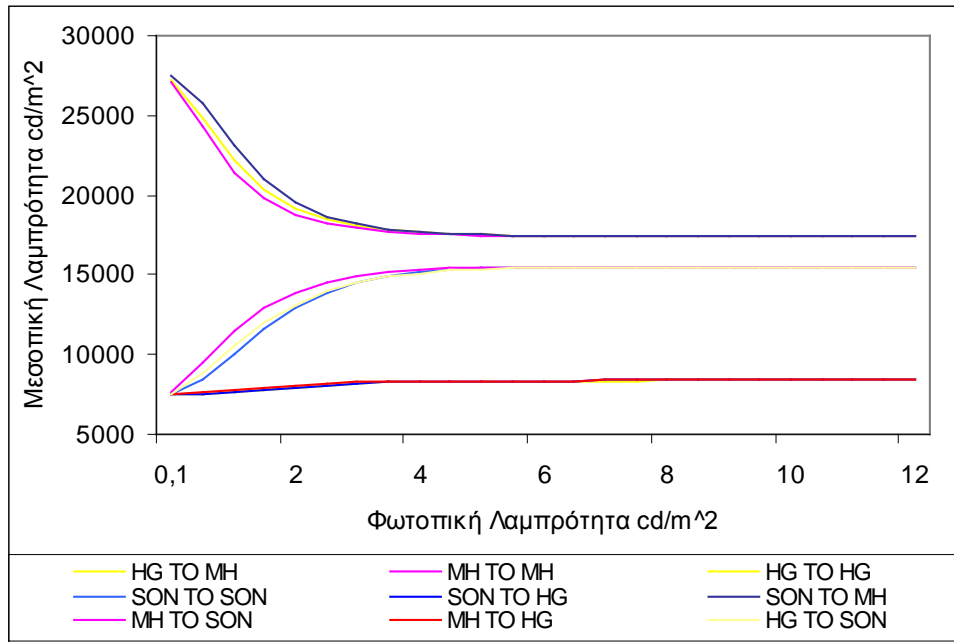
Σχήμα 8.1.8 Μεταβολή των μεσοπικών λαμπροτήτων των τριών λαμπτήρων με λαμπτήρα αναφοράς τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής



Σχήμα 8.1.9 Μεταβολή των μεσοπικών λαμπροτήτων των τριών λαμπτήρων με λαμπτήρα αναφοράς τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων



Σχήμα 8.1.10 Μεταβολή των μεσοπικών λαμπροτήτων των τριών λαμπτήρων με λαμπτήρα αναφοράς τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου.



Σχήμα 8.1.11 Συγκεντρωτική παρουσίαση της μεταβολής των μεσοπικών λαμπροτήτων των τριών λαμπτήρων για κάθε λαμπτήρα αναφοράς.

Μοντέλο MOVE

Για να γίνει σύγκριση των μοντέλων θα πρέπει να βρεθεί για τους τρεις λαμπτήρες ο τρόπος μεταβολής της μεταβολής της φωτεινής ροής τους, με βάση το γραμμικό μοντέλο MOVE. Η φωτοπική και η σκοτοπική ροή του κάθε λαμπτήρα δίνεται από το πίνακα 8.1.2

Για να βρούμε τη μεσοπική ροή βρίσκουμε πρώτα τη σχετική φασματική ευαισθησία, η οποία δίνεται από τη σχέση;

$$M(x)V''(\lambda) = x V(\lambda) + (1-x) V'(\lambda) \quad 8.1.2.1$$

Όπου $M(x)$ η σταθερά κανονικοποίησης, δηλαδή

$$M(x) = \max(V(\lambda) + (1-x) V'(\lambda)) \text{ για } \lambda \text{ από } 360\text{nm} \text{ έως } 780\text{nm}. \quad 8.2.2.2$$

Ο συντελεστής x δίνεται συναρτήσει του λόγου S/P και της φωτοπικής λαμπρότητας από το πίνακα 4.1.1. Οπότε η μεσοπική ροή θα δίνεται από τη σχέση

$$\Phi'' = K''_{\max} \int_{360}^{780} L_e(\lambda) \cdot V''(\lambda, x) \cdot d\lambda \quad 8.2.2.3$$

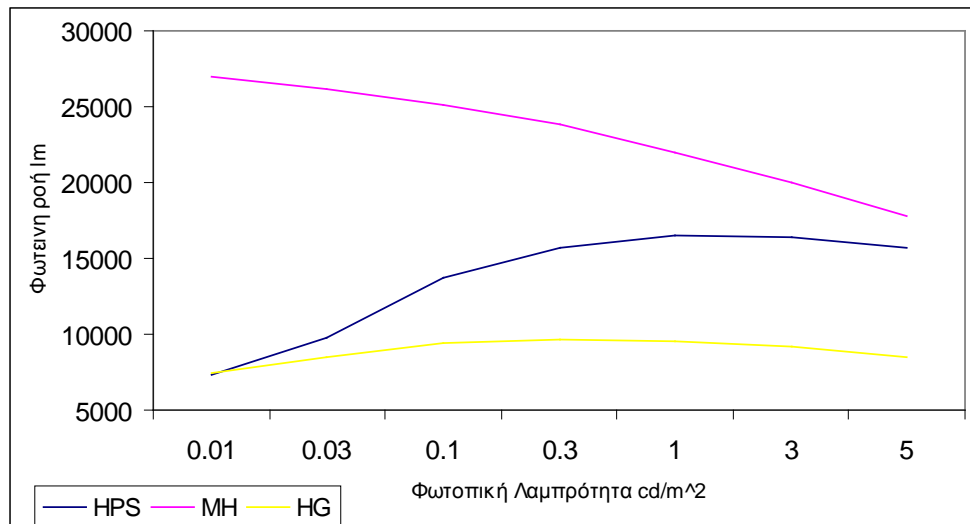
Όπου η K''_{\max} υπολογίζεται από την απαίτηση στα 555nm η φασματική απόδοση του ανθρώπινου οφθαλμού να είναι 683lm/W, δηλαδή:

$$K''_{\max} = \frac{683}{x + (1-x)0.402} \text{ lm/W} \quad 8.2.2.4$$

Οπότε υπολογίζεται η μεσοπική ροή του κάθε λαμπτήρα για διάφορα επίπεδα φωτοπικής λαμπρότητας. Τα αποτελέσματα αναγράφονται στο πίνακα 8.1.13 και στο σχήμα 8.1.12.

Πίνακας 8.1.13 Μεταβολή της μεσοπικής ροής των λαμπτήρων συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας σύμφωνα με το μοντέλο MOVE

| Φωτοπική λαμπρότητα cd/m ² | HPS | | MH | | HG | |
|---|---------|----------------|---------|---------|---------|---------------|
| | x | Φ'' | x | Φ'' | x | Φ'' |
| 0.01 | 0 | <u>7342.2</u> | 0.07951 | 26943.6 | 0.00348 | 7481.0 |
| 0.03 | 0.10838 | 9791.3 | 0.23327 | 26109.2 | 0.17856 | <u>8540.9</u> |
| 0.1 | 0.32868 | 13733.7 | 0.39663 | 25117.0 | 0.36142 | <u>9362.5</u> |
| 0.3 | 0.49928 | <u>15699.7</u> | 0.54067 | 23873.9 | 0.51776 | <u>9693.9</u> |
| 1 | 0.6702 | <u>16548.3</u> | 0.69301 | 22029.1 | 0.67984 | <u>9593.0</u> |
| 3 | 0.81662 | <u>16403.0</u> | 0.82777 | 20043.5 | 0.8211 | <u>9161.1</u> |
| 10 | 0.97084 | <u>15679.3</u> | 0.9725 | 17839.0 | 0.97148 | <u>8507.2</u> |



Σχήμα 8.1.12 Μεταβολή της μεσοπικής ροής των λαμπτήρων συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας σύμφωνα με το μοντέλο MOVE

Παρατηρούμε ότι με εξαίρεση τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων οι καμπύλες δεν είναι ομαλές, δεν είναι μονότονες. Μάλιστα η τιμή της μεσοπικής ροής

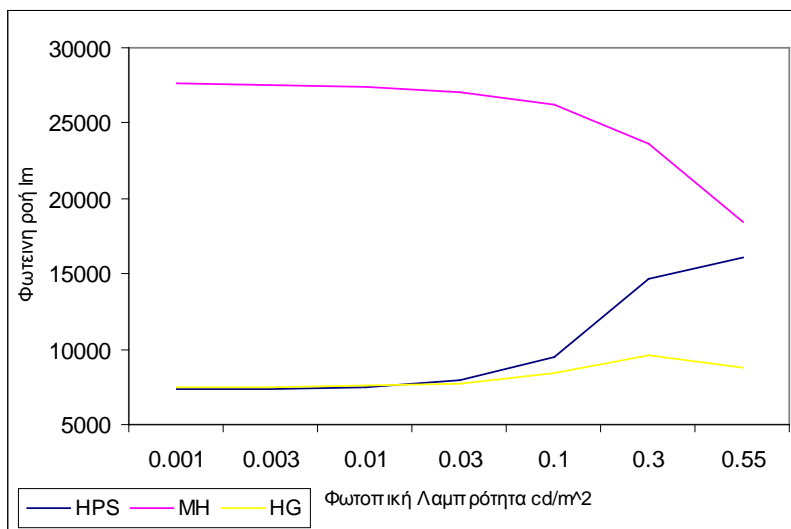
είναι πολλές φορές εκτός του διαστήματος $[\Phi, \Phi']$, οι τιμές αυτές στο πίνακα 8.1.5 παρίστανται με πλάγια και υπογραμμισμένη γραμματοσειρά

Μοντέλο REA

Δουλεύοντας όπως και στο μοντέλο MOVE, αφού τα δύο μοντέλα διαφέρουν μόνο στις τιμές του x , βρίσκουμε τις μεσοπικές λαμπρότητες που δίνει το μοντέλο Rea. Βέβαια οι τιμές του x , λαμβάνονται από το πίνακα 4.7.1. Οπότε προκύπτει ο πίνακας 8.1.14 και το διάγραμμα 8.1.13

Πίνακας 8.1.14 Μεταβολή της μεσοπικής ροής των λαμπτήρων συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας σύμφωνα με το μοντέλο REA

| Φωτοπική λαμπρότητα cd/m^2 | HPS | | MH | | HG | |
|------------------------------------|---------|----------------|---------|----------|---------|---------------|
| | x | Φ'' | x | Φ'' | x | Φ'' |
| 0.001 | 0 | <u>7342.2</u> | 0.00096 | 27592.9 | 0 | <u>7459.1</u> |
| 0.003 | 0.0007 | 7359.2 | 0.00615 | 27539.7 | 0.0028 | 7476.7 |
| 0.01 | 0.00632 | 7494.8 | 0.02415 | 27367.9 | 0.01324 | 7542.3 |
| 0.03 | 0.0233 | 7898.3 | 0.07267 | 26994.1 | 0.04344 | 7732.3 |
| 0.1 | 0.095 | 9507.3 | 0.22178 | 26167.6 | 0.15242 | 8394.3 |
| 0.3 | 0.3987 | 14662.2 | 0.56718 | 23593.3 | 0.48234 | <u>9654.9</u> |
| 0.55 | 0.89444 | <u>16090.7</u> | 0.93173 | 18453.4 | 0.91274 | <u>8776.6</u> |



Σχήμα 8.1.13 Μεταβολή της μεσοπικής ροής των λαμπτήρων συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας σύμφωνα με το μοντέλο REA

Παρατηρούμε και πάλι ότι παρουσιάζονται τα ίδια προβλήματα με το πρόγραμμα MOVE τα οποία φαίνεται ότι αποτελούν χαρακτηριστικά του γραμμικού μοντέλου. Δηλαδή ο τρόπος μεταβολής της φωτεινής ροής δεν είναι καθόλου ομαλός, ούτε μονότονος. Επίσης πάλι η τιμή της μεσοπικής ροής είναι πολλές φορές, λιγότερες βέβαια από το προηγούμενο μοντέλο, εκτός του διαστήματος $[\Phi, \Phi']$, οι τιμές αυτές στο πίνακα 8.1.6 παρίστανται πάλι με πλάγια και υπογραμμισμένη γραμματοσειρά. Τέλος πρέπει να παρατηρηθεί ότι σύμφωνα με το μοντέλο Rea μετά τις 0.65cd/m^2 , η όραση είναι φωτοπική.

Σύγκριση των τριών μοντέλων

Για να γίνει η σύγκριση των τριών μοντέλων θα πρέπει να βρεθεί η μεσοπική ροή για τις ίδιες τιμές φωτοπικής λαμπρότητας. Ακολουθείται η μέθοδος της προηγούμενης παραγράφου, δηλαδή η προσέγγιση του x , με τη ίδια συνάρτηση της εξίσωσης 8.1.2.1 και τιμές των σταθερών του πίνακα 8.1.6. Στη συνέχεια υπολογίζονται όπως και προηγουμένως οι μεσοπικές φωτεινές ροές που δίνουν τα τρία μοντέλα για κάθε λαμπτήρα και κατασκευάζονται οι πίνακες 8.1.15 έως 8.1.17 και τα διαγράμματα 8.1.14 έως 8.1.16.

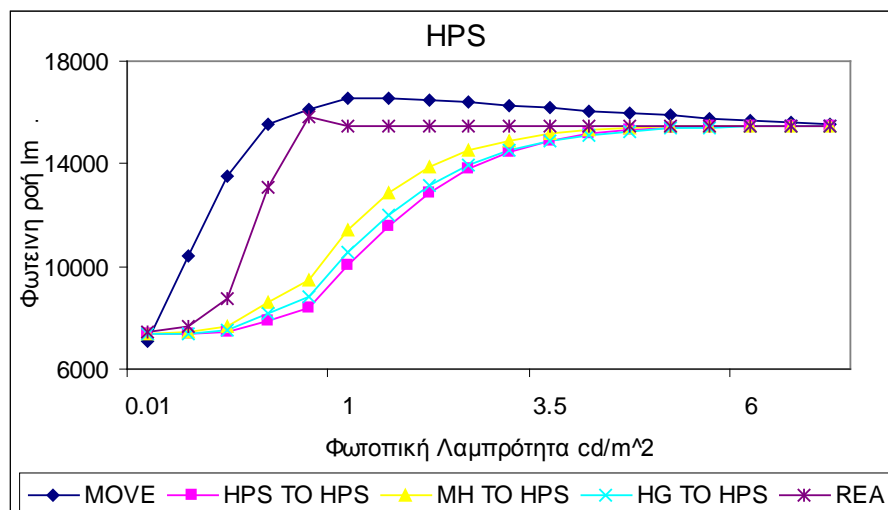
Παρατηρούμε ότι οι παρουσιαζόμενες διαφορές είναι αρκετά μεγάλες, ακόμα και ανάμεσα στα δύο γραμμικά μοντέλα. Το μοντέλο Rea από τις 0.65cd/m^2 και άνω η ροή έχει τη φωτοπική τιμή ενώ στο μοντέλο MOVE η ροή διαφοροποιείται της φωτοπικής ακόμα και στις 7cd/m^2 . Στο προτεινόμενο μοντέλο η ροή είναι ίση με τη φωτοπική από τις $4.5\text{-}6\text{cd/m}^2$. Ακόμα στο προτεινόμενο μοντέλο δεν υπάρχουν περιπτώσεις όπου η φωτεινή ροή να είναι εκτός των ορίων του διαστήματος $[\Phi, \Phi']$, πράγμα που δεν ισχύει για τα γραμμικά μοντέλα. Επίσης είναι φανερό ότι η όποια ομαλότητα δίνουν στη μετάβαση από τη φωτοπική στη σκοτοπική περιοχή αυτή εξαντλείται στον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων. Επίσης οι διαφορές ανάμεσα στα τρία μοντέλα είναι πολύ μικρές στη περίπτωση αυτή, Στις περιπτώσεις όμως των ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής οι διαφορές είναι μεγάλες με το μοντέλο Rea στις μικρές λαμπρότητες να είναι κοντύτερα στο προτεινόμενο μοντέλο στη συνέχεια κοντύτερα στο μοντέλο MOVE και μετά πάλι κοντύτερα στο προτεινόμενο μοντέλο. Επίσης και στα δύο μοντέλα

εμφανίζονται τιμές εκτός των ορίων του διαστήματος $[\Phi, \Phi']$, οι οποίες σημειώνονται στους πίνακες με πλάγια και υπογραμμισμένη γραμματοσειρά.

Κατόπιν αυτών μάλλον η συμπεριφορά το υ προτεινόμενο υ μοντέλου είναι καλύτερη από αυτήν των γραμμικών.

Πίνακας 8.1.15 Μεταβολή της φωτεινής ροής για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα.

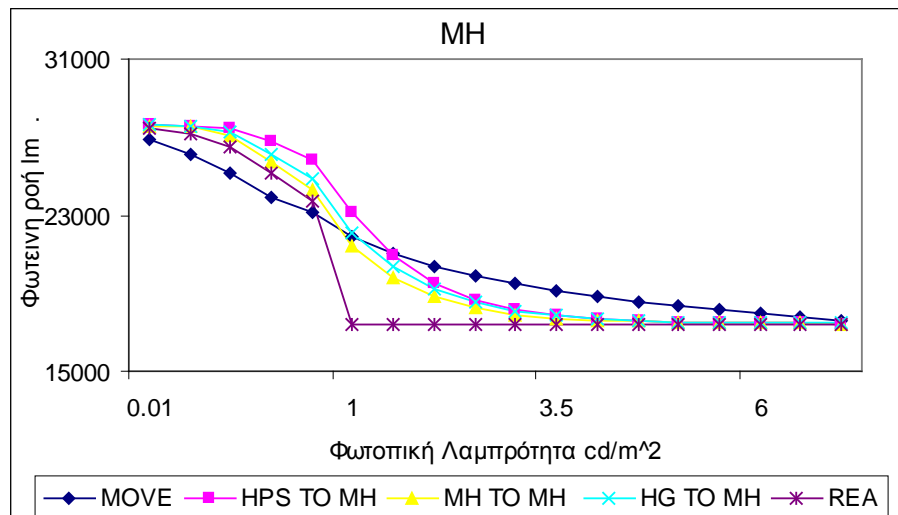
| Φωτοπική λαμπρότητα cd/m^2 | MOVE | REA | Λαμπτήρας αναφοράς προτεινόμενου μοντέλου | | |
|------------------------------------|---------|---------|--|---------|---------|
| | | | HPS | MH | HG |
| 0.01 | 7085.6 | 7443.8 | 7349.8 | 7369.2 | 7356.7 |
| 0.03 | 10387.6 | 7630.8 | 7363.4 | 7430.9 | 7388.8 |
| 0.1 | 13484.0 | 8780.6 | 7448.7 | 7698.1 | 7546.6 |
| 0.3 | 15537.4 | 13058.3 | 7862.6 | 8583.1 | 8149.3 |
| 0.5 | 16145.3 | 15850.0 | 8416.0 | 9481.8 | 8836.1 |
| 1 | 16553.7 | 15505.1 | 10027.6 | 11448.3 | 10551.6 |
| 1.5 | 16563.4 | 15505.1 | 11591.6 | 12892.8 | 12012.6 |
| 2 | 16485.6 | 15505.1 | 12879.4 | 13874.2 | 13134.0 |
| 2.5 | 16378.4 | 15505.1 | 13834.5 | 14510.8 | 13942.6 |
| 3 | 16270.5 | 15505.1 | 14490.6 | 14910.8 | 14500.8 |
| 3.5 | 16163.0 | 15505.1 | 14914.7 | 15156.1 | 14873.6 |
| 4 | 16058.3 | 15505.1 | 15175.0 | 15303.5 | 15115.8 |
| 4.5 | 15959.7 | 15505.1 | 15327.5 | 15390.4 | 15269.6 |
| 5 | 15867.6 | 15505.1 | 15413.2 | 15441.0 | 15365.2 |
| 5.5 | 15779.9 | 15505.1 | 15459.4 | 15469.9 | 15423.5 |
| 6 | 15698.9 | 15505.1 | 15483.4 | 15486.2 | 15458.4 |
| 6.5 | 15622.8 | 15505.1 | 15495.5 | 15495.3 | 15479.0 |
| 7 | 15550.8 | 15505.1 | 15501.3 | 15500.4 | 15490.9 |



Σχήμα 8.1.14 Μεταβολή της φωτεινής ροής για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα

Πίνακας 8.1.16 Μεταβολή της φωτεινής ροής για τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα.

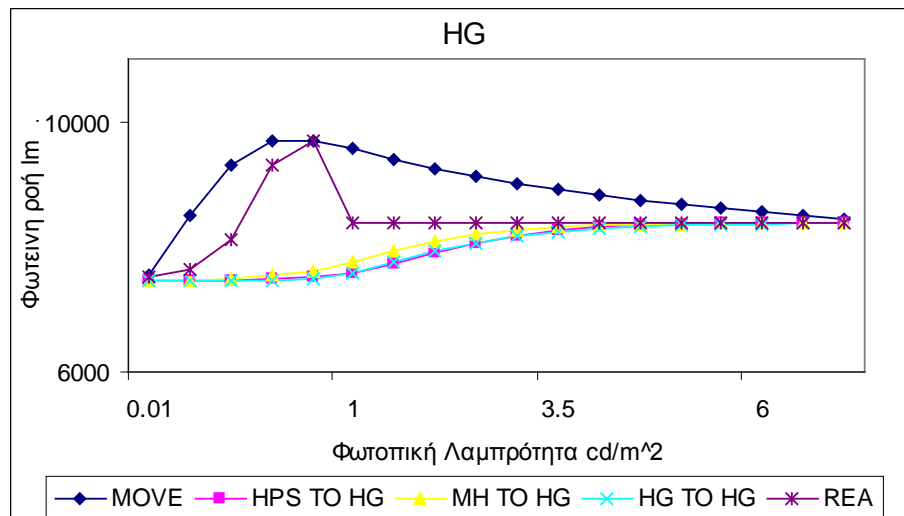
| Φωτοπική λαμπρότητα cd/m ² | MOVE | REA | Λαμπτήρας αναφοράς προτεινόμενου μοντέλου | | |
|---|---------|---------|--|---------|---------|
| | | | HPS | MH | HG |
| 0.01 | 26878.3 | 27445.2 | 27614.9 | 27589.7 | 27602.3 |
| 0.03 | 26143.3 | 27147.5 | 27596.4 | 27505.7 | 27545.0 |
| 0.1 | 25200.4 | 26495.2 | 27469.7 | 27115.5 | 27246.6 |
| 0.3 | 23933.6 | 25151.3 | 26774.4 | 25719.3 | 26086.3 |
| 0.5 | 23149.0 | 23706.8 | 25793.1 | 24290.3 | 24831.7 |
| 1 | 21864.4 | 17434.4 | 23100.7 | 21455.3 | 22135.5 |
| 1.5 | 21023.2 | 17434.4 | 20948.2 | 19748.7 | 20319.0 |
| 2 | 20402.0 | 17434.4 | 19534.1 | 18785.1 | 19193.9 |
| 2.5 | 19905.9 | 17434.4 | 18674.7 | 18238.1 | 18513.4 |
| 3 | 19500.0 | 17434.4 | 18164.4 | 17919.2 | 18101.5 |
| 3.5 | 19155.1 | 17434.4 | 17861.4 | 17728.2 | 17849.5 |
| 4 | 18854.6 | 17434.4 | 17680.9 | 17611.8 | 17693.3 |
| 4.5 | 18592.0 | 17434.4 | 17573.7 | 17540.5 | 17595.5 |
| 5 | 18357.3 | 17434.4 | 17511.0 | 17497.1 | 17534.1 |
| 5.5 | 18145.1 | 17434.4 | 17475.1 | 17470.8 | 17495.4 |
| 6 | 17954.3 | 17434.4 | 17455.3 | 17455.3 | 17471.3 |
| 6.5 | 17779.2 | 17434.4 | 17444.8 | 17446.1 | 17456.4 |
| 7 | 17618.7 | 17434.4 | 17439.4 | 17440.9 | 17447.4 |



Σχήμα 8.1.15 Μεταβολή της φωτεινής ροής για τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα

Πίνακας 8.1.17 Μεταβολή της φωτεινής ροής για τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα.

| Φωτοπική λαμπρότητα cd/m ² | MOVE | REA | Λαμπτήρας αναφοράς προτεινόμενου μοντέλου | | |
|---|---------|--------|--|--------|--------|
| | | | HPS | MH | HG |
| 0.01 | 7543.5 | 7506.9 | 7463.8 | 7465.9 | 7464.0 |
| 0.03 | 8502.9 | 7625.6 | 7465.11 | 7471.7 | 7464.9 |
| 0.1 | 9317.92 | 8115.8 | 7471.5 | 7492.6 | 7466.6 |
| 0.3 | 9689.7 | 9291.0 | 7489.7 | 7545.8 | 7470.2 |
| 0.5 | 9705.1 | 9705.2 | 7506.2 | 7598.3 | 7485.1 |
| 1 | 9563.2 | 8374.4 | 7580.6 | 7759.3 | 7591.4 |
| 1.5 | 9396.1 | 8374.4 | 7725.1 | 7936.1 | 7756.6 |
| 2 | 9251.3 | 8374.4 | 7899.4 | 8086.3 | 7924.7 |
| 2.5 | 9122.0 | 8374.4 | 8057.6 | 8195.6 | 8065.8 |
| 3 | 9011.7 | 8374.4 | 8178.4 | 8268.1 | 8172.0 |
| 3.5 | 8913.9 | 8374.4 | 8260.5 | 8313.2 | 8246.3 |
| 4 | 8825.3 | 8374.4 | 8311.7 | 8340.1 | 8295.8 |
| 4.5 | 8745.9 | 8374.4 | 8341.5 | 8355.5 | 8327.4 |
| 5 | 8674.2 | 8374.4 | 8357.9 | 8364.2 | 8346.9 |
| 5.5 | 8607.8 | 8374.4 | 8366.4 | 8368.9 | 8358.6 |
| 6 | 8547.8 | 8374.4 | 8370.7 | 8371.5 | 8365.5 |
| 6.5 | 8491.8 | 8374.4 | 8372.7 | 8372.9 | 8369.5 |
| 7 | 8440.3 | 8374.4 | 8373.7 | 8373. | 8371.7 |



Σχήμα 8.1.16 Μεταβολή της φωτεινής ροής για τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα

8.1.4 Σύγκριση χρηστικότητας των μοντέλων.

Και τα τρία μοντέλα απαιτούν τη χρήση λογισμικού, έστω και απλής μορφής. Αυτό τη σημερινή εποχή δεν μπορεί να θεωρηθεί πρόβλημα. Τα γραμμικά μοντέλα απαιτούν τη γνώση του λόγου της σκοτοπικής προς τη φωτοπική λαμπρότητα του κάθε λαμπτήρα. Αυτό δεν είναι ιδιαίτερα προβληματικό αν και για τη μέτρηση αυτού του λόγου απαιτούνται ειδικά φίλτρα, οι δε κατασκευάστριες εταιρείες δεν τον παρέχουν. Βέβαια η λαμπρότητα είναι συνάρτηση της γεωμετρίας της εφαρμογής και όχι χαρακτηριστικό της φωτεινής πηγής. Από την άλλη μεριά το προτεινόμενο μοντέλο απαιτεί τη γνώση της φασματικής κατανομής της πηγής, πράγμα που ενώ φαίνεται προβληματικότερο δεν είναι, ανήκει στις πληροφορίες που δίνουν για τα προϊόντα τους οι κατασκευάστριες εταιρείες.

Σημαντική διαφορά επίσης από τα άλλα μοντέλα είναι και η στόχευση του κάθε ενός. Τα γραμμικά μοντέλα αποσκοπούν στο να βρο Ψ ποια είναι η μεσοπική λαμπρότητα δοθείσης της φωτοπικής. Δεν ασχολούνται καθόλου με την αιτία της λαμπρότητας που είναι η φωτεινή ροή. Αντίθετα το προτεινόμενο μοντέλο παρέχει αυτά που παρέχουν τα γραμμικά μοντέλα, δηλαδή τη μεσοπική σε σχέση με τη φωτοπική λαμπρότητα. Όμως παρέχει και την έκφραση της φωτοπικής λαμπρότητας σε σχέση με τη μεσοπική. Επίσης και κυριότερο παρέχει τη δυνατότητα εύρεσης της μεσοπικής ροής. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί στις εφαρμογές φωτισμού η προκαλούμενη λαμπρότητα εξαρτάται αφενός από τη φωτεινή ροή των φωτιστικών και από τα πολικά τους διαγράμματα. Εξαρτάται όμως και από τη γεωμετρία της εφαρμογής όπως και από τους περιορισμούς που τίθενται από τις προδιαγραφές. Οι περισσότερες μελέτες φωτισμού γίνονται πλέον με χρήση πακέτων λογισμικού, τα περισσότερα των οποίων βελτιστοποιούν τη μελέτη με προκαθορισμένες μεταβολές στους γεωμετρικούς παράγοντες. Έτσι λοιπόν αν υποθέσουμε ότι ζητείται μελέτη φωτισμού η οποία να προκαλεί στο παρατηρητή αντίληψη λαμπρότητας A_{cd}/m^2 , η τιμή A βέβαια ανήκει στη μεσοπική περιοχή. Για να γίνει η μελέτη υπάρχουν δύο μέθοδοι. Αφενός να βρεθεί ποια είναι η αντίστοιχη φωτοπική λαμπρότητα και να γίνει η μελέτη χρησιμοποιώντας αυτήν ως επιθυμητή λαμπρότητα και ως φωτεινή ροή τη φωτοπική ροή του λαμπτήρα. Αφετέρου να βρεθεί η μεσοπική ροή και να εκτελεστεί η μελέτη με επιθυμητή λαμπρότητα A_{cd}/m^2 και φωτεινή ροή την μεσοπική φωτεινή ροή. Τα αποτελέσματα των

δύο μελετών δε συμπίπτουν. Αυτό γίνεται γιατί η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της μελέτης εξαρτάται κατά ένα βαθμό από τη φωτεινή ροή. Έτσι είναι φανερό ότι σε αυτό το σημείο το προτεινόμενο μοντέλο υπερτερεί των γραμμικών.

Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα

9.1 Ανακεφαλαίωση της διατριβής

Οι στόχοι αυτής της διατριβής ήταν δύο. Η μελέτη της κεντρικής όρασης σε χαμηλά επίπεδα φωτισμού και η κατασκευή ενός μοντέλου για τη μεσοπική περιοχή.

Η έρευνα της κεντρικής όρασης έγινε χρησιμοποιώντας ως κριτήριο αποτίμησης την οπτική οξύτητα. Ελέγχθηκε η οπτική οξύτητα έξι νέων ατόμων σε έξι επίπεδα φωτισμού, στη περιοχή της χαμηλής μεσοπικής περιοχής, χρησιμοποιώντας τέσσερις διαφορετικούς λαμπτήρες. Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας είναι παραπλήσια με άλλων ερευνητών. Συγκεκριμένα παρατηρείται εξάρτηση της οπτικής οξύτητας όχι μόνο από τα επίπεδα της λαμπρότητας αλλά και από τη φασματική κατανομή της πηγής που τη προκαλεί. Η εξάρτηση όμως του οπτικού αισθήματος από τη φασματική κατανομή της φωτίζουσας ακτινοβολίας, αποτελεί ένα εναλλακτικό ορισμό για τη μεσοπική όραση. Βέβαια η κεντρική μεσοπική όραση δε μπορεί να αποδοθεί στα ίδια αίτια με αυτά που προκαλούν τη περιφερειακή μεσοπική. Στη κεντρική όραση δεν υπάρχουν ραβδία, η όραση είναι αποτέλεσμα της δράσης των κωνίων. Αυτό σημαίνει ότι στη μεσοπική περιοχή, η δράση των κωνίων διαφοροποιείται ανάλογα με τη μέση λαμπρότητα και τη φασματική κατανομή της πηγής. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται κατά κύριο λόγο στο ότι τα S-κωνία συνεισφέρουν στη μεσοπική περιοχή πολύ λιγότερο από ότι στη φωτοπική. Αποτέλεσμα είναι πηγές με πλούσιο φάσμα στα μεγάλα μήκη κύματος να είναι αποδοτικότερες στη κεντρική μεσοπική όραση, από αυτές που έχουν φάσμα πλούσιο σε μικρά μήκη κύματος. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από τη πειραματική διαδικασία.

Άμεση συνέπεια των ανωτέρω είναι ότι η $V(\lambda)$ δεν ισχύει για λαμπρότητες μικρότερες των 10cd/m^2 , κάτι το οποίο τονίζεται και από τη CIE κατά την εισαγωγή της καμπύλης σχετικής φασματικής ευαισθησίας για τη φωτοπική περιοχή.

Επειδή, τα περιφερειακά κωνία δε συμπεριφέρονται διαφορετικά από τα κεντρικά, δεν υπάρχει λόγος οι μεσοπικές καμπύλες να είναι γραμμικός συνδυασμός των καμπυλών για τη φωτοπική και τη σκοτοπική όραση. Αυτή η έμμεση συνέπεια της

διαφοροποίησης της δράσης των κωνίων είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη κατασκευή ενός μεσοπικού μοντέλου.

Η ανάπτυξη του μεσοπικού μοντέλου στηρίχθηκε στις παρακάτω θέσεις:

- Το κριτήριο ταύτισης πρέπει να είναι καθαρά οπτικό, κάθε άλλο κριτήριο μετρά και παράγοντες άσχετους με το οπτικό αίσθημα.
- Η φασματική κατανομή στην οποία προσαρμόζεται ο οφθαλμός του παρατηρητή, πρέπει να παραμένει σταθερή. Δηλαδή η διαφοροποίηση που προκαλεί η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τους οπτικούς στόχους πρέπει να είναι αμελητέα.
- Η φασματική κατανομή της φωτίζουσας ακτινοβολίας διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στη μεσοπική όραση. Η κατάταξη των πηγών σύμφωνα με το λόγο S/P που προτείνουν τα γραμμικά μοντέλα αποτελεί ένα θετικό βήμα σε σχέση με τα παλαιότερα μοντέλα.. Ο λόγος αυτός αποτελεί ένα κριτήριο χαρακτηρισμού του φάσματος μιας πηγής, όμως όπως εδείχθη δεν αποτελεί ένα ισχυρό κριτήριο. Αποφασίστηκε λοιπόν ότι ένα μοντέλο μεσοπικής όρασης πρέπει να είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τη συγκεκριμένη φασματική κατανομή τα πηγής.
- Το προτεινόμενο μοντέλο πρέπει να είναι μη γραμμικό. Κάθε γραμμικό μοντέλο μπορεί να μετασχηματισθεί σε μια συνάρτηση του λόγου S/P, άρα κάθε γραμμικό μοντέλο συνδέεται με κλάσεις φασματικών κατανομών που έχουν τον ίδιο λόγο S/P. Αυτό όμως σύμφωνα με τα προηγούμενα δεν είναι επιθυμητό. Οι καμπύλες $V(\lambda)$ και $V'(\lambda)$ είναι χρήσιμες στη κατασκευή φίλτρων με τη βοήθεια των οποίων τα φωτομετρικά μεγέθη μετρούνται με όργανα. Στη περίπτωση όμως που τα φωτομετρικά μεγέθη υπολογίζονται από τη φασματική κατανομή με τη βοήθεια απλού λογισμικού είναι προτιμότερη η χρήση των καμπύλων φασματικής απόδοσης. Έτσι αποφασίστηκε το μοντέλο να έχει τέτοια μορφή ώστε να κατασκευάζονται μεσοπικές καμπύλες φασματικής ευαισθησίας ως συνάρτηση των καμπυλών φωτοπικής και σκοτοπικής φασματικής ευαισθησίας.

Η μορφή του μοντέλου για τη μεσοπική όραση πήρε τη μορφή:

$$K''(\lambda) = x \cdot K(\lambda) + (1 - x) \cdot K^y(\lambda) \cdot K'^{(1-y)}(\lambda)$$

Όπου x, y μεταβλητές που ανήκουν στο διάστημα $[0, 1]$. Αυτή η μορφή παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι η τιμή της K'' για $\lambda=555\text{nm}$ είναι 683lm/W .

Για το προσδιορισμό των μεταβλητών x, y σχεδιάστηκε πρωτότυπη πειραματική διάταξη. Η πρωτοτυπία της διάταξης συνίσταται στα εξής:

- Ο έλεγχος της φωτεινής ροής των λαμπτήρων γίνεται με κινούμενο διάφραγμα, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη σταθερότητα της φασματικής κατανομής της φωτεινής πηγής.
- Το πολικό διάγραμμα του φωτιστικού παραμένει σταθερό και ανεξάρτητο από το τύπο το u λαμπτήρα που u περιέχει, όπως και από τη θέση του διαφράγματος. Προσομοιάζει δε σε Lambertian επιφάνεια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο φωτισμός των στόχων και υποβάθρου να παρουσιάζει σε κάθε περίπτωση τα ίδια χαρακτηριστικά.
- Χρησιμοποιείται για πρώτη φορά στη έρευνα της μεσοπικής όραση η μέθοδος ελαχιστοποίησης διαχωριστικού ορίου και μάλιστα στη περιφερειακή όραση.

Έγινε έλεγχος της προσθετικότητας της διάταξης, για τη φωτοπική περιοχή, με τη συμμετοχή εννέα ατόμων. Κατά τη διαδικασία ελέγχου της διάταξης γίνονταν ταυτίσεις μονοχρωματικών ακτινοβολιών, οι οποίες παράγονταν με τη βοήθεια φίλτρων. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά.

Μετά τον έλεγχο της διάταξης, έγιναν οπτικές ταυτίσεις για τέσσερα επίπεδα λαμπρότητας $0.1, 1, 3$ και 5cd/m^2 , για τρεις διαφορετικούς φωτισμούς του υποβάθρου. Στο πείραμα έλαβαν μέρος δεκαπέντε άτομα, με κανονική όραση. Μετρήθηκαν οι επιφανειακές πυκνότητες ακτινοβολίας των στόχων και με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο οικείο κεφάλαιο (7) μετατράπηκαν σε λόγους λαμπροτήτων, των πηγών ανά δύο.

Από του λόγους αυτούς και με τη βοήθεια του λογισμικού που περιγράφηκε υπολογίζονται οι τιμές των x, y για κάθε επίπεδο λαμπρότητας και κάθε λαμπτήρα υποβάθρου. Οι τιμές αυτές προσεγγίζονται, για κάθε λαμπτήρα υποβάθρου, με συναρτήσεις της μορφής:

$$y = a \cdot b^L \cdot L^c \quad \text{και} \quad x = 1 - \exp(-d \cdot L^f)$$

Με αυτό τον τρόπο για κάθε τιμή φωτοπικής λαμπρότητας υπολογίζονται τα x , y και από αυτά η μεσοπική καμπύλη φασματικής ευαισθησίας, άρα και κάθε φωτομετρικό μέγεθος.

Ακολούθως εξετάστηκε αν το μοντέλο εξασφαλίζει ομαλή μετάβαση από τη σκοτοπική στη φωτοπική περιοχή. Βρέθηκε ότι η τιμή της μέγιστης τιμής της φασματικής ευαισθησίας μεταβάλλεται ομαλά και μονότονα από 1700lm/W σε 683lm/W. Επίσης το μήκος κύματος που παρουσιάζεται αυτή η τιμή μεταβάλλεται επίσης ομαλά και μονότονα ανάμεσα στα μήκη κύματος που παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές για τη φωτοπική και τη σκοτοπική όραση. Τέλος η φωτεινή ροή των λαμπτήρων μεταβάλλεται ομαλά από τη σκοτοπική προς τη φωτοπική φωτεινή ροή και έχει πάντα τιμές εντός του διαστήματος $[\Phi, \Phi']$.

Αυτό αποτελεί ένα χαρακτηριστικό του προτεινόμενου μοντέλου. Τα γραμμικά μοντέλα δίνουν τιμές εκτός αυτού του διαστήματος, πράγμα το οποίο είναι λανθασμένο και αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα των μοντέλων, σε βαθμό που να αμφισβητείται η ορθότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των τιμών που δίνει το προτεινόμενο μοντέλο και τα αυτών που δίνουν τα γραμμικά μοντέλα. Παρατηρήθηκε ότι στη περιοχή από 0.001 έως 0.6cd/m², οι τιμές που δίνει το προτεινόμενο μοντέλο βρίσκονται πλησιέστερα στις τιμές που προβλέπει το μοντέλο του Rea. Στη περιοχή από 1 έως 10cd/m², οι τιμές που δίνει το προτεινόμενο μοντέλο βρίσκονται πλησιέστερα στις τιμές που προβλέπει το μοντέλο του MOVE. Τέλος στη περιοχή από 0.6 έως 1cd/m², οι τιμές που δίνει το προτεινόμενο μοντέλο είναι είτε μεγαλύτερες από τα δύο γραμμικά είτε μικρότερες. Αυτό εξαρτάται από το λόγο S/P. Οι διαφορές αυτές είναι μικρές, αλλά υπάρχουν. Μπορούν να αποδοθούν στο ότι το προτεινόμενο μοντέλο εξαρτάται από τη συγκεκριμένη φασματική κατανομή της πηγής, ενώ τα γραμμικά μοντέλα από το λόγο S/P δηλαδή τη κλάση στην οποία ανήκει η πηγή.

Ο τρόπος εφαρμογής του μοντέλου είναι απλός. Προϋποθέτει τη θεώρηση ενός από τους τρεις μελετηθέντες λαμπτήρες ως λαμπτήρα αναφοράς, τη γνώση της φασματική κατανομής του λαμπτήρα εφαρμογής και τη χρήση ενός απλού λογισμικού. Τη σημερινή εποχή αυτά είναι πράγματι τετριμμένα. Οι φασματικές κατανομές δίνονται από τις κατασκευάστριες εταιρείες, ενώ η χρήση υπολογιστών είναι πλέον γενικευμένη.

Με αυτά τα στοιχεία είναι δυνατός ο υπολογισμός της συνάρτησης $L''=f(L)$ για κάθε τύπο λαμπτήρα στο διάστημα 0 έως 6cd/m^2 . Η συνάρτηση αυτή μπορεί να εκφραστεί είτε ως πολυώνυμο δεκάτου βαθμού για μεγάλη ακρίβεια στις πολύ χαμηλές λαμπρότητες είτε ως πολυωνύμου πρώτου ή δευτέρου βαθμού με μικρότερη ακρίβεια, όμως απολύτως ικανοποιητικής για πρακτικές εφαρμογές.

Ακόμα, και αυτό αποτελεί ένα προτέρημα του προτεινόμενου μοντέλου, μπορεί να βρεθεί κατά τον ίδιο τρόπο η συνάρτηση $L=f(L')$. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά τον σχεδιασμό μελετών φωτισμού. Αυτό γιατί αν είναι γνωστή η φωτοπική λαμπρότητα στην οποία ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται την επιθυμητή μεσοπική λαμπρότητα, η εκπόνηση της μελέτης γίνεται χρησιμοποιώντας φωτοπικές μονάδες και κατά συνέπεια τα διάφορα λογισμικά που διατίθενται στο εμπόριο. Ακόμα είναι εύκολη η πιστοποίηση της εφαρμογής με μετρήσεις των φωτοπικών μεγεθών.

Με άλλα λόγια το προτεινόμενο μοντέλο με τη βοήθεια των προαναφερθέντων συναρτήσεων καθιστά δυνατή τη χρήση των μονάδων του τυποποιημένου φωτομετρικού συστήματος ενώ τα αποτελέσματα της όποιας εφαρμογής θα είναι τέτοια ώστε ο παρατηρητής να αντιλαμβάνεται την επιθυμητή λαμπρότητα, τη μεσοπική.

Τέλος, στη διδακτορική αυτή διατριβή τέθηκε και το ζήτημα της πληρότητας των φωτομετρικών προτύπων, εφ' όσον οι τιμές που καθορίζουν είναι στη μεσοπική περιοχή. Όπως είναι φανερό το πρόβλημα της μεσοπικής όρασης οδεύει στη λύση του [92]. Το προτεινόμενο μοντέλο όπως και τα υπάρχοντα γραμμικά εξαρτούν τη μεσοπική λαμπρότητα από το είδος της φασματικής κατανομής της φωτίζουσας ακτινοβολίας. Αν λοιπόν μια προδιαγραφή φωτισμού καθορίζει ως τιμή λαμπρότητας μια τιμή εντός της μεσοπικής περιοχής, η λαμπρότητα που θα αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής θα ποικίλη ανάλογα με τους χρησιμοποιούμενους λαμπτήρες. Με άλλα λόγια τα οπτικά αποτελέσματα δεν θα είναι ισοδύναμα. Οπότε γίνεται κατανοητό ότι η προδιαγραφή δε καθορίζει ισοδύναμα οπτικά αποτελέσματα. Αν όμως αυτή καθόριζε τη τιμή της φωτοπικής λαμπρότητας καθώς και το λαμπτήρα υπό το φωτισμού του οποίου αυτή επιτυγχάνεται τότε θα ήταν γνωστή η επιθυμητή μεσοπική λαμπρότητα. Αυτό σημαίνει ότι με τη χρήση ενός μεσοπικού μοντέλου οι διάφορες μελέτες θα έδιναν αποτελέσματα οπτικώς ισοδύναμα.

Στη περίπτωση αυτή θα πρέπει να τονισθεί ότι τα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι πολλά. Απλά θα πρέπει να καθορισθεί η συμπεριφορά του λαμπτήρα αναφοράς και ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών των υπολοίπων λαμπτήρων είναι θέμα γνώσης της φασματικής τους κατανομής.

9.2 Συμβολή της διατριβής

Η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής στην μελέτη της μεσοπικής όρασης, προκύπτει συσχετίζοντας τα κυριότερα συμπεράσματα των εκτεθέντων στη § 9.1 (ανακεφαλαίωση της διατριβής), με τις αντίστοιχες προτάσεις άλλων ερευνητών που ορίζουν το σημερινό ορίζοντα γνώσης στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Επιβεβαιώθηκε ότι στη κεντρική όραση σε χαμηλά επίπεδα φωτισμού η καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας δεν είναι η $V(\lambda)$. Εισήχθη ο όρος κεντρική μεσοπική όραση για να εκφράσει την εξάρτηση της κεντρικής όρασης από τη φασματική κατανομή της φωτίζουσας ακτινοβολίας στη μεσοπική περιοχή.

Κατασκευάστηκε ένα μοντέλο για τη μεσοπική περιοχή. Η ανάπτυξη του μοντέλου έγινε πραγματοποιώντας σειρά πειραματικών μετρήσεων σε ανθρώπινα υποκείμενα.

Η πρωτοτυπία της πειραματικής διάταξης συνίσταται στα εξής:

- Χρησιμοποιείται η μέθοδος ελαχιστοποίησης διαχωριστικού ορίου για πρώτη φορά στην έρευνα μεσοπικής όρασης.
- Η ρύθμιση του φωτισμού γίνεται κατά τρόπο που η φασματική κατανομή της φωτίζουσας ακτινοβολίας να είναι σταθερή.
- Ο φωτισμός γίνεται με φωτιστικά που έχουν σταθερό πολικό διάγραμμα ανεξάρτητα του λαμπτήρα που περιέχουν.

Η πρωτοτυπία του προτεινόμενου μοντέλου συνίσταται στα εξής:

- Το μοντέλο παρέχει τη καμπύλη φασματικής ευαισθησίας σε κάθε επίπεδο φωτισμού και όχι τη καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας.
- Το μοντέλο είναι μη γραμμικό, η μορφή του οποίου παρουσιάζεται για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία.

- Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τη φασματική κατανομή επί της οποίας εφαρμόζεται.
- Στοχεύει στην εύρεση των επιπέδων προσαρμογής του παρατηρητή σε διάφορα επίπεδα φωτισμού και όχι στη εύρεση ισοδυνάμων λαμπροτήτων. Η σχέση ανάμεσα στη φωτοπική και μεσοπική λαμπρότητα απορρέει από τη εύρεση της μεσοπικής λαμπρότητας από τη φασματική κατανομή της πηγής με τη βοήθεια της αντίστοιχης μεσοπικής καμπύλης φασματικής ευαισθησίας.
- Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι δυνατόν να δοθούν και με τη μορφή συναρτήσεων, με τη χρήση του κατάλληλου λογισμικού. Οι συναρτήσεις αυτές είναι $L''=f(L)$ και $L=f(L'')$ και είναι χαρακτηριστικές του κάθε λαμπτήρα.

Ως σημαντική συμβολή στη μελέτη της μεσοπικής όρασης είναι και το εξής: τα άλλα δυο γραμμικά μοντέλα που κυριαρχούν αυτή τη στιγμή στο χώρο παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Το προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιώντας τελείως διαφορετική πειραματική μέθοδο μπορεί να αποτελέσει μέτρο σύγκρισης. Πράγματι η σύγκριση έδειξε ότι σε χαμηλά επίπεδα φωτισμού το προτεινόμενο μοντέλο είναι κοντύτερα στο μοντέλο του Rea ενώ σε υψηλότερα επίπεδα κοντύτερα στο MOVE.

Δημιούργησε κριτήρια ελέγχου των μοντέλων της μεσοπικής όρασης τα οποία δεν υπήρχαν μέχρι τώρα. Συγκεκριμένα κάθε μοντέλο για τη μεσοπική περιοχή πρέπει να ικανοποιεί:

- Η μέγιστη τιμή της φασματικής ευαισθησίας πρέπει να μεταβάλλεται ομαλά και μονότονα σε σχέση με τα επίπεδα λαμπρότητας
- Το ίδιο πρέπει να ισχύει και για το μήκος κύματος στο οποίο παρουσιάζεται αυτή.
- Η μεσοπική ροή ενός λαμπτήρα πρέπει να μεταβάλλεται ομαλά από τη σκοτοπική στη φωτοπική ροή. Επιπλέον η τιμή της μεσοπικής ροής πρέπει να βρίσκεται εντός του διαστήματος $[\Phi, \Phi']$.

Τέλος σημαντική είναι η παρατήρηση ότι τα πρότυπα φωτισμού, όταν οι τιμές που καθορίζουν βρίσκονται εντός της μεσοπικής περιοχής, οδηγούν σε εκπόνηση μελετών που δεν είναι οπτικά ισοδύναμες. Το οπτικό αίσθημα που προσλαμβάνεται από το παρατηρητή εξαρτάται από το τύπο του χρησιμοποιούμενου λαμπτήρα. Ο συγγραφέας θεωρεί ότι θα πρέπει όταν οι τιμές που καθορίζουν τα πρότυπα αναφέρονται στη μεσοπική περιοχή να καθορίζουν και το τύπο λαμπτήρα υπό το φως

του οποίου επιτυγχάνονται αυτές οι τιμές. Έτσι θα επιτευχθεί ο στόχος για τον οποίο θεσπίστηκαν τα πρότυπα

9.3 Επέκταση της διατριβής

Κλείνοντας, παρατίθενται κάποιες σκέψεις οι οποίες θα μπορούσαν υλοποιηθούν στο πλαίσιο μιας ενδεχόμενης επέκτασης της παρούσας εργασίας.

Το μοντέλο που προτείνεται αποδείχτηκε ακριβές και εύχρηστο σε σύγκριση με τα άλλα μοντέλα μεσοπικής όρασης.

Ανοικτό παραμένει το θέμα της κεντρικής όρασης στη μεσοπική περιοχή. Η παρούσα εργασία έδειξε ότι στη κεντρική όραση υπάρχει ένα είδος μεσοπικής όρασης, η οποία ο φέιεται στη διαφοροποίηση της συνεισφοράς των κωνίων στη μεσοπική περιοχή. Αυτό θα ήταν χρήσιμο να μελετηθεί και να παραχθούν τα κατάλληλα μοντέλα.

Επίσης θα ήταν χρήσιμο να μελετηθεί η μεσοπική όραση σε ανομοιόμορφα οπτικά πεδία. Δηλαδή να μελετηθεί η όραση όταν η μέση λαμπρότητα είναι στη μεσοπική περιοχή αλλά το οπτικό πεδίο να αποτελείται από τμήματα με διαφορετικές τιμές λαμπρότητας με χρήση διαφόρων λαμπτήρων. Κάτι τέτοιο θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών νυκτερινής οδήγησης.

Βιβλιογραφία

- [1] W. M. M.D. Hart, “*Adler’s Physiology of the Eye: Clinical Application*”, Mosby–Yearbook Inc., 1992.
- [2] P. Trezona, “*Luminance Level Conversions to Assist Lighting Engineers Use Fundamental Visual Data*”, *Lighting Research and Technology*, 15, 2, 1983.
- [3] M. S. Rea, M. J. Oullette, “*Relative Performance: a Basis for Application*”, *Lighting Research and Technology*, 23, 3, 1991.
- [4] <http://retina.anatomy.upenn.edu/~lance/eye/pupil.html>.
- [5] G. Wald, P.K Brown, “*Cold Spring Harbor Symposium Quantum Biology*”, 1965.
- [6] H.Dartnall, “*The Interpretation of Spectral Sensitivity Curves*”, *British Medical Bulletin*, 9, 1953.
- [7] T. W. Kraft, D. M. Schneeweis, J. L Schnapf, “*Visual Transduction in Human Rod Photoreceptors*”, *Journal of Physiology*, 747-765, 1993.
- [8] H. Dartnall, J. Bowmaker, J. Mollon, “*Human Visual Pigments: Microspectrophotometric Results from the Eyes of seven Persons*”, *Proceedings of the Royal Society of London*, B 220, 1983.
- [9] http://www.ling.upenn.edu/courses/Spring_1999/ling525/color_vision.html.
- [10] J. Vos, P. Walraven, “*On the Derivation of the Foveal Receptor Primaries*”, *Vision Research*, 11, 799-818 1971.
- [11] V. C. Smith, J. Pokorny, “*Spectral Sensitivity of the Foveal Cone Photopigment between 400 and 500 nm*”, *Vision Research*, 15, 161-171, 1975.
- [12] A. Stockman, D. MacLeod, N. Johnson, *Journal of the Optical Society of America*, 10, 2491-2521, 1993.
- [13] W. Ganong, “*Ιατρική Φυσιολογία*”, Μετάφραση Ι. Χατζημηνά, εκδόσεις Γ. Κ. Αθανασιάδης, Αθήνα 1975.
- [14] <http://webvision.med.utah.edu/kallspatial.html>, “*Eye, Vision & Visibility:sensitivity of the visual system*” .
- [15] E. H. Adelson, “*Saturation and Adaptation in the Rod System*”, *Vision Research*, 22, 1299-1312,1982

- [16] H. D. Baker, “*The Course of Foveal Adaptation Measured by the Threshold Intensity Increment*”, Journal of the Optical Society of America, 39, 172-179, 1949
- [17] L.A. Riggs, “*Vision. In*”, Wood-worth and Schlosberg's Experimental Psychology. New York, Holt, Rinehart and Winston, 1971.
- [18] W. Verdon and A. J. Adams, “*Short-Wavelength-Sensitive Cones do not Contribute to Mesopic Luminosity*”, Journal of the Optical Society of America, 1.4, 1, 91-95, 1987.
- [19] A. Eisner and D. MacLeod, “*Blue-sensitive Cones do not Contribute to Luminance*” Journal of the Optical Society of America, 70/1, 121-123, January 1980.
- [20] K. Sagawa, “*70 Years of Photometry*”, Commission Internationale de l'Eclairage, CIE x009-1995
- [21] H. W. Bodmann, “*The Scientific Basis of Photometry*”, Commission Internationale de l'Eclairage, CIE x009, 1995.
- [22] Commission Internationale de l'Eclairage, “*Light as a True Visual Quantity: Principles of Measurement*”, CIE pub 41.
- [23] Commission Internationale de l'Eclairage, “*The Basis of Physical Photometry*”, CIE pub. 18.2 (TC-1.2), 1983.
- [24] S. Berman, R. Clear, “*Additivity Constraints and Visual Task Considerations in Mesopic Photometry*”, Journal of the Illuminating Engineering Society, winter 2001
- [25] Y. Hsia, C. H. Graham, “*Spectral sensitivity of the cones in the dark adapted human eye*) Proc. Nat'l Acad. Sciences 38, 80-85, 1952.
- [26] W. S. Stiles, B. H. Crawford. “*The liminal brightness increment as a function of wave-length for different conditions of the foveal and parafoveal retina.*” Proc. Roy. Soc. London. B 113, 496-530, 1933.
- [27] M. Kalloniatis, C. Luu, “*Psychophysics of Vision*”, doi.wiley.com /10.1002/glia.20044.
- [28] Y. Le Grand. “*Light, Colour and Vision*”, Chapman & Hall, Ltd., London, 1968.
- [29] J. J. Voss, “*Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer*”, Institute for Perception-TNO, Report No. 12F 1974.12, 1974.
- [30] K. S. Gibson, E. P. T. Tyndall “*Visibility of radiant energy.*” Bur. of Standards

- Scientific Papers 19.131-191.1923.
- [31] R. M. Boynton, P. K. Kaiser, “*Vision: the additivity law made to work for heterochromatic photometry with bipartite fields*”, *Science*, 161, 566-368, 1968.
- [32] <http://webvision.med.utah.edu>, *Eye, Vision & Visibility*, “*sensitivity of the visual system*”
- [33] Φ. Β. Τοπαλής, “*Φωτοτεχνία*”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, 1994.
- [34] Commission Internationale de l'Eclairage, “*CIE 1988 2 ° Spectral Luminous Efficiency Functions for Photopic Vision*”, CIE Publ. N ° 86, 1990.
- [35] Commission Internationale de l'Eclairage “*CIE Proceedings 1951*”, Vol. 1, Sec 4; Vol 3, p. 37, Bureau Central de la CIE, Paris, 1951
- [36] G. Wald, “*Human Vision and the Spectrum*”, *Science*, 101, 653-658, 1945.
- [37] B. H. Crawford, “*The Scotopic Visibility Function*”, *Proceedings of the Physical Society*, B62, 321, 1949
- [38] Lennie et al, “*Luminance*”, *Journal of the Optical Society of America*, 10,6, 1283-1290, 1993.
- [39] Commission Internationale de l'Eclairage, “*Spectral Luminous Efficiency Functions Based upon Brightness Matching for Monochromatic Point Sources 2 ° and 10 ° fields*”, Pub No 75, 1988.
- [40] 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
- [41] J. Vos, “*Colorimetric and Photometric Properties of a 2-deg Fundamental Observer*”, *Color Research and Application*, 3, 125-128, 1978.
- [42] Commission Internationale de l'Eclairage, “*CIE Proceedings 1964*”, Vienna Session, Vol. B, 1963. (Committee Report E-1.4.1).
- [43] G. Wyszecki, W. Stiles, “*Colour Science*”, John Wiley & sons, 1982.
- [44] Commission Internationale de l'Eclairage, “*Colorimetry*”.
- [45] Commission Internationale de l'Eclairage, “*Proceedings, 1931 Cambridge*”. Cambridge University Press, CIE 1932.
- [46] Committee on Colorimetry Optical Society of America, “*The Science of Color*”,

June 1970.

- [47] “*IESNA Lighting Handbook*”, 2000
- [48] P.K. Kaiser, G.Wyszecki, “*Additivity failures in heterochromatic brightness matching*”, *Color Research and Application* 3 177-182 1978.
- [49] H. V. Walters, W. D. Wright, "*The spectral sensitivity of the fovea and extrafovea in the Purkinje range*" *Proc. R. Soc. London Ser. B* 131, 340-361 (1943).
- [50] Commission Internationale de l'Eclairage, “*Mesopic Photometry History, Special Problems and Practical Solutions*”, CIE Pub 81, 1st Edition 1989.
- [51] S. Guth, “*Luminance Addition: General Considerations and Some Results at Foveal Threshold*”, *Journal of the optical society of America*, 55, 6
- [52] S. Guth, H. Lodge, “*Heterochromatic Additivity, Foveal Spectral Sensitivity, and a New Model*”, *Journal of the optical society of America*, Vol. 3, 450-462, 1972.
- [53] S. Guth, “*Vector Model for Normal and Dichromatic Color Vision*”, *Optical Society of America*, 70, 2, February 1980.
- [54] L. Guth, N. Donley, T. Marrocco, “*On Luminance Additivity and Related Topics*”, *Vision Research*, Vol.9, 537-575, 1968.
- [55] W. Adrian “*Equivalence Luminance its Numerical Description and its Meaning for the Basic Visual Functions*”, CIE x009, 1995.
- [56] W. Andrian “*Spectral Sensitivity of the Pupillary System*”, *Clinical and Experimental Optometry*, 86.4, 235-238, July 2003
- [57] S. Kokoschka, “*Concept and Application of the Equivalent Luminance in Photometry*”, CIE x009, 1995
- [58] I. Lewin, “*Lumen Effectiveness Multipliers For Outdoor Lighting Design*”, *Illuminating Engineering Society*, Paper no. 50.
- [59] I. Lewin, “*Lamp Spectral Effects at Roadway Lighting Levels*”, http://www.venturelighting.com/WhatsNew/lamp_spectral_effects_at_roadway.htm.
- [60] I. Lewin, “*Lamp Color and Visibility in Outdoor Lighting Design*”, FIES, L.C.
- [61] A. L. Lewis, “*Equating Light Sources for Visual Performance at Low Luminances*”, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Winter 1998.
- [62] M. Ikeda and H. Shimozomo, “*Mesopic Luminous-Efficiency Functions*”, *Journal*

- of the Optical Society of America, 71,3, 280-285, March 1981.
- [63] M. Ikeda, H. Yaguchi, K. Yoshimatsu, and M. Ohmi, “*Luminous-Efficiency Functions for Point Sources*”, Journal of the Optical Society of America, 72, 68-72, January 1982.
- [64] M. Ikeda, “*Linearity Law Reexamined for Flicker Photometry by the Summation-Index Method*” Journal of the Optical Society of America, 73, 8, 1055-1059, August 1983.
- [65] M. Ayama, M. Ikeda, “*Brightness-to-Luminance Ratio of Colored Light in the Entire Chromaticity Diagram*”, Color Research and Application, 23, 10, 274-287, 1998.
- [66] K. Sagawa, T. Keishiro, “*Spectral Luminous Efficiency Functions in the Mesopic Range*”, Optical Society of America, 3, 1, 71-75, 1986.
- [67] D.A Palmer, “*A system of mesopic photometry*”, Nature 209 276-281 1966.
- [68] D.A.Palmer, “*Mesopic photometry with non-monochromatic lights*”, Journal of the Optical Society of America. 64 1386 1974
- [69] P. W. Trezona, “*Luminance: Its Use and Misuse*”, Color Research and Application, 25, 2, 145-147, April 2000.
- [70] P. W. Trezona, “*Equivalent Luminance from Photopic to Scotopic Levels*”, Color Research and Application, 21, 4, November 1999.
- [71] P. W. Trezona, “*Theoretical Aspects of Mesopic Photometry and Their Implication in Data Assessment and Investigation Planning*”, Color Research and Application, 23, 5, 264-273, October 1998.
- [72] P. W. Trezona, “*Derivation of the 1964 CIE 10° XYZ Colour-Matching Functions and Their Applicability in Photometry*”, Color Research and Application, 26, 1, 67-75, February 2001.
- [73] T. McGowan and M. Rea, “*Visibility and Spectral Composition, another Look in the Mesopic*”, draft report, Lighting Research Center Rensselaer Polytechnic Institute, 2003.
- [74] Y.He, M.Rea, A.Bierman, and J.Bullough, “*Evaluating Light Source Efficacy Under Mesopic Conditions Using Reaction Times*”, Journal of the Illuminating

- Engineering Society,125-134, Winter 1997.
- [75] R. Lingard, M. Rea, “*Off-Axis Detection at Mesopic Light Levels in a Driving Context*”, Journal of the Illuminating Engineering Society, Winter 1998.
- [76] Y. Akashi, M. Rea, “*Peripheral Detection While Driving Under a Mesopic Light Level*”, Journal of the Optical Society of America, 66, 7, July 1976.
- [77] M. Rea, J. Bullough, J. Freyssinier-Nova, A. Bierman, “*A proposed unified system of photometry*”, Lighting Research and Technology, 36: 85-11, 2004.
- [78] M. Eloholma, M. Viikaria, L. Halonen, H. Walkey, T. Goodmanc , J. Alferdinck, A Freiding, P. Bodrogi and G. Varady, “*Mesopic models* from brightness matching to visual performance in night-time driving: a review*”, Lighting Research and Technology 37,2 pp. 155_ 175, 2005
- [79] M. Eloholma, “*Development of visual performance based mesopic photometry*”,y,[dissertation], Espoo (Finland): Helsinki University of Technology, report 36, 2005
- [80] M. Eloholma, “*Development of visual performance based mesopic photometry*”,[dissertation], Espoo (Finland): Helsinki University of Technology, report 37, 2005
- [81] M. Eloholma, L. Halonen, “*New Model for Mesopic Photometry and its Application to Road Lighting*”, LEUKOS Vol 2 No 4 April 2006 pp 263–293
- [82] Commission Internationale de l’E´clairage. “*Testing of supplementary systems of photometry*”, Vienna, Austria: CIE 141:2001.
- [83] S. M. Bermann, “*Energy Efficiency Consequences of Scotopic Sensitivity*”, Journal of the Illuminating Engineering Society, Winter 1992.
- [84] J. A. Kinney, “*Comparison of Scotopic, Mesopic, and Photopic Spectral Sensitivity Curves*”, Journal of the Optical Society of America, 73, 9, 185-190, September 1982.
- [85] C.A. Curcio, K.A. Allen, K.R. Sloan, C.L. Lerea, J.B. Hurley, I.B. Klock, A.H. Milam, “*Distribution and morphology of human cone photoreceptors stained with anti-blue opsin*”. The Journal of Comparative Neurology. 312 pp: 610-624 1991.
- [86] C. A. Curcio, K. R Sloan, R. E. Kalina, A. E. Hendrickson, “*Human Photoreceptor*

- Topography*”, Journal of Comparative Neurology 292, pp:497-523, 1990.
- [87] M. Mehra, M.Rea, D.Maniccia, “*A field study of visual acuity, color naming and visual search under mesopic lighting*”: *Proceedings of the IESNA*, San Antonio, 1998.
- [88] C. Ripamonti, W. L. Woo, E. Crowther, A. Stockman, “*The S-cone contribution to luminance depends on the M- and L-cone adaptation levels: Silent surrounds?*”, Journal of Vision 9(3):10, pp: 1–16, 2009.
- [89] J. Kremers, H. P. N. Scholl, H. Knau., “*L/M cone ratios in human trichromats assessed by psychophysics, electroretinography, and retinal densitometry*” Journal of the Optical Society of America A Vol. 17, No. 3/March 2000
- [90] R. McCluney, “*Introduction to Radiometry and Photometry*”, Artech House, 1994.
- [91] American Institute of Physics, “*Handbook of Applied Photometry*”, 1997.
- [92] J. Schanda, T. Goodman, ” *Vision and lighting in mesopic conditions*”, CIE News No 74.pp 1–2. 2005

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Ι. Ραδιομετρικά – φωτομετρικά μεγέθη

Στο κεφάλαιο αυτό, ορίζονται οι βασικές έννοιες και μεγέθη της ραδιομετρίας καθώς επίσης οι βασικές έννοιες και τα φωτομετρικά μεγέθη του τυποποιημένου φωτομετρικού συστήματος [33,90,91]. Δηλαδή όλοι οι απαιτούμενοι ορισμοί, που είναι απαραίτητοι για την κατανόηση των κεφαλαίων που ακολουθούν.

Ι.1 Βασικές έννοιες και μεγέθη της ραδιομετρίας

Μια ακτινοβολούσα πηγή εκπέμπει ενέργεια με μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η εκπεμπόμενη ενέργεια είναι μετρήσιμη αντικειμενικά. Με τον όρο αντικειμενικά, νοείται η ανεξαρτησία του αποτελέσματος της μέτρησης από τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά του παρατηρητή που την εκτελεί. Η ενέργεια και η ισχύς της ακτινοβολούσας πηγής μετρώνται στο σύστημα SI.

Στην συνέχεια ορίζονται τα ραδιομετρικά μεγέθη.

Ενέργεια ακτινοβολίας (Radiant energy) Q_e

Η ποσότητα ενέργειας που εκπέμπεται, μεταδίδεται ή απορροφάται από μια συγκεκριμένη επιφάνεια σε ορισμένο χρονικό διάστημα.

Ροή ακτινοβολίας (Radiant flux) Φ_e

Ο λόγος της ενέργειας ακτινοβολίας προς το ν χρό ν εντός του οποίου εκπέμφθηκε, διαδόθηκε ή απορροφήθηκε.

$$\text{Εξίσωση ορισμού: } \Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

Φασματική ροή ακτινοβολίας (Spectral radiant flux) $\Phi_{e,\lambda}$

Η ροή ακτινοβολίας ανά μήκος κύματος λ και ανά μονάδα μήκους κύματος.

$$\text{Εξίσωση ορισμού: } \Phi_{e,\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}$$

Ένταση ακτινοβολίας (Radiant intensity) I_e

Το πηλίκο της ροής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την πηγή και διαδίδεται μέσα σε μια στοιχειώδη στερεά γωνία, προς την στοιχειώδη στερεά γωνία.

$$\text{Εξίσωση ορισμού: } I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}$$

όπου $d\omega$ η στοιχειώδης στερεά γωνία.

Φασματική ένταση ακτινοβολίας (Spectral radiant intensity) $I_{e,\lambda}$

Η ένταση ακτινοβολίας ανά μήκος κύματος λ και ανά μονάδα μήκους κύματος.

$$\text{Εξίσωση ορισμού: } I_{e,\lambda} = \frac{dI_e}{d\lambda} = \frac{d^2\Phi_e}{d\lambda d\omega}$$

όπου $d\omega$ η στοιχειώδης στερεά γωνία.

Ακτινοβολία (Radiance): L_e

Η ροή ακτινοβολίας η οποία διαδίδεται ή εκπέμπεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, ανά μονάδα στερεάς γωνίας και ανά μονάδα επιφανείας καθέτου στην διεύθυνση διάδοσης.

$$\text{Εξίσωση ορισμού: } L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dA_n d\omega} \quad \text{ή} \quad L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dA \cos\theta d\omega}$$

Όπου dA_n η κάθετος στην διεύθυνση διάδοσης στοιχειώδης επιφάνεια, dA η στοιχειώδης επιφάνεια, $d\omega$ η στοιχειώδης στερεά γωνία και θ η γωνία ανάμεσα στην διεύθυνση διάδοσης και στην κάθετο στην επιφάνεια dA .

Φασματική ακτινοβολία (Spectral radiance) $L_{e,\lambda}$

Η ακτινοβολία ανά μήκος κύματος λ και ανά μονάδα μήκους κύματος.

$$\text{Εξίσωση ορισμού: } L_{e,\lambda} = \frac{dL_e}{d\lambda} = \frac{d^3\Phi_e}{dA_n d\omega d\lambda} \quad \text{ή} \quad L_{e,\lambda} = \frac{d^3\Phi_e}{dA \cos\theta d\omega d\lambda}$$

Όπου dA_n η κάθετος στην διεύθυνση διάδοσης στοιχειώδης επιφάνεια, dA η στοιχειώδης επιφάνεια, $d\omega$ η στοιχειώδης στερεά γωνία και θ η γωνία ανάμεσα στην διεύθυνση διάδοσης και στην κάθετο στην επιφάνεια dA .

Επιφανειακή πυκνότητα ακτινοβολίας (Irradiance) E_e

Ορίζεται ως το πηλίκο της ροής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα σημείο μίας επιφάνειας, προς το εμβαδόν αυτής της στοιχειώδους επιφάνειας.

$$\text{Εξίσωση ορισμού: } E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$$

όπου dA η στοιχειώδης επιφάνεια.

Φασματική επιφανειακή πυκνότητα ακτινοβολίας (Spectral Irradiance): $E_{e,\lambda}$

Η επιφανειακή πυκνότητα ακτινοβολίας ανά μήκος κύματος λ και ανά μονάδα μήκους κύματος.

$$\text{Εξίσωση ορισμού: } E_{e,\lambda} = \frac{dE_{e,\lambda}}{d\lambda} = \frac{d^2\Phi_{e,\lambda}}{dA d\lambda}$$

όπου dA η στοιχειώδης επιφάνεια.

Στον πίνακα I.1 αναγράφονται συνοπτικά τα ραδιομετρικά μεγέθη, οι εξισώσεις ορισμού καθώς και οι μονάδες μέτρησης.

Πίνακας I.1 Ραδιομετρικά μεγέθη

| Μέγεθος | Εξίσωση ορισμού | Μονάδες μέτρησης |
|---|---|-------------------------|
| Ροή ακτινοβολίας (Radiant energy) Q_e . | $\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$ | Watt (W) |
| Φασματική ροή ακτινοβολίας Spectral radiant flux $\Phi_{e,\lambda}$. | $\Phi_{e,\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}$ | W/nm |
| Ένταση ακτινοβολίας Radiant intensity I_e . | $I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}$ | W /sr |
| Φασματική ένταση ακτινοβολίας Spectral radiant intensity $I_{e,\lambda}$. | $I_{e,\lambda} = \frac{dI_e}{d\lambda}$ | W /sr·nm |
| Ακτινοβολία Radiance L_e | $L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dA_n d\omega}$ | W /sr·m ² |
| Φασματική ακτινοβολία Spectral radiance $L_{e,\lambda}$. | $L_{e,\lambda} = \frac{dL_e}{d\lambda}$ | W/sr·m ² ·nm |

1.2 Βασικές έννοιες και μεγέθη του τυποποιημένου φωτομετρικού συστήματος

1.2.1 Βασικές έννοιες

Η ακτινοβολία, που έχει την ιδιότητα να διεγείρει τον ανθρώπινο οφθαλμό λέγεται **φως**. Την ιδιότητα αυτή την έχουν οι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες με μήκη κύματος 380-780 nm, η περιοχή αυτή του φάσματος ονομάζεται ορατό φάσμα.

Η ορατή ακτινοβολία διεγείρει τους φωτοανιχνευτές του ανθρώπινου οφθαλμού. Τα σήματα των φωτοανιχνευτών, μέσω μιας πολύπλοκης νευροφυσιολογικής διαδικασίας δημιουργούν την αίσθηση της όρασης.

Η ανταπόκριση του ανθρώπινου οφθαλμού, στις ορατές ακτινοβολίες, εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Επομένως είναι απαραίτητη η κατασκευή της **καμπύλης φασματικής ευαισθησίας**, η οποία θα χαρακτηρίζει την απόδοση του ανθρώπινου οφθαλμού σε κάθε μήκος κύματος, της ορατής ακτινοβολίας. Είναι προφανές, ότι η ανταπόκριση στις ορατές ακτινοβολίες θα διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο, λόγω των διαφορών που παρουσιάζουν στην φυσιολογία τους. Οι διαφορές αυτές σε ανθρώπους με φυσιολογική όραση δεν είναι μεγάλες, παρ' όλα αυτά όμως υπάρχουν.

Είναι αναγκαίο λοιπόν η οπτική απόδοση, για κάθε μήκος κύματος, να μετρηθεί σε μεγάλο δείγμα ατόμων. **Τυπικός παρατηρητής**, σε μια πρώτη προσέγγιση, λέγεται ο παρατηρητής του οποίου η οπτική απόδοση για κάθε μήκος κύματος είναι ο μέσος όρος των οπτικών αποδόσεων που μετρήθηκαν στο δείγμα.

Η οπτική απόδοση του ανθρώπινου οφθαλμού εξαρτάται και από τα επίπεδα φωτισμού. Είναι διαφορετική σε έντονο φωτισμό, όπως φως ημέρας, και διαφορετική σε χαμηλό φωτισμό, όπως έναστρος ουρανός. Στην πρώτη περίπτωση η όραση λέγεται φωτοπική στην δεύτερη σκοτοπική. Η ενδιάμεση περιοχή καλείται περιοχή μεσοπικής όρασης.

Στην φωτοπική περιοχή, η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας καθορίστηκε από την διεθνή επιτροπή φωτισμού (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE). Η κανονικοποιημένη καμπύλη, ονομάζεται **καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας** του ανθρώπινου οφθαλμού και συμβολίζεται με **V(λ)**. Με αυτό τον τρόπο σε κάθε μήκος κύματος αντιστοιχεί ένας συγκεκριμένος συντελεστής φασματικής ευαισθησίας V_λ , ο

οποίος είναι καθαρός αριθμός (αδιάστατο μέγεθος) και παίρνει τιμές στο διάστημα [0,1]. Με αυτό τον τρόπο απλοποιούνται οι υπολογισμοί των φωτομετρικών μεγεθών.

1.2.2 Μεγέθη του τυποποιημένου φωτομετρικού συστήματος

Με την βοήθεια της καμπύλης σχετικής φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού, τα φωτομετρικά μεγέθη του τυποποιημένου φωτομετρικού συστήματος, ορίζονται ως εξής:

Φωτεινή ενέργεια (Luminous energy) Q

Είναι το ποσόν της ενέργειας ακτινοβολίας μιας πηγής, το οποίο προσλαμβάνεται ως φως. Πολλές φορές αναφέρεται και ως ποσότητα φωτός. Για να υπολογισθεί η φωτεινή ενέργεια μιας ακτινοβολίας θα πρέπει να πολλαπλασιασθεί η ενέργεια ακτινοβολίας σε κάθε μήκος κύματος με το ν αντίστοιχο συντελεστή απόδοσης, όπως αυτός καθορίζεται από την καμπύλη φασματικής ευαισθησία. Δηλαδή η εξίσωση ορισμού θα είναι:

$$Q = K_m \int_{380}^{830} Q_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad \text{όπου } K_m = 683 \text{ lm/W}$$

Φωτεινή ροή (Luminous flux) Φ

Ο λόγος της φωτεινής ενέργειας μιας ακτινοβολίας προς τον χρόνο εντός του οποίου εκπέμφθηκε, διαδόθηκε ή απορροφήθηκε.

$$\text{Εξίσωση ορισμού: } \Phi = \frac{dQ}{dt}$$

Ένταση φωτεινής πηγής (Luminous intensity) I

Το ηλίκο της φωτεινής ροής της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την πηγή και διαδίδεται μέσα σε μια στοιχειώδη στερεά γωνία, προς την στοιχειώδη στερεά γωνία.

$$\text{Εξίσωση ορισμού: } I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad \text{ή ισοδύναμα } I = K_m \int_{380}^{830} I_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad \text{όπου } K_m = 683 \text{ lm/W}$$

Λαμπρότητα (Luminance) L

Η φωτεινή ροή της ακτινοβολίας η οποία διαδίδεται ή εκπέμπεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, ανά μονάδα στερεάς γωνίας και ανά μονάδα επιφανείας καθέτου στην διεύθυνση διάδοσης.

Εξίσωση ορισμού: $L = \frac{d^2\Phi}{dA_n d\omega}$ ή $L = \frac{d^2\Phi}{dA \cos\theta d\omega}$ όπου θ η γωνία ανάμεσα στην

διεύθυνση διάδοσης και στην κάθετο στην επιφάνεια ή ισοδύναμα $L = K_m \int_{380}^{830} L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$

όπου $K_m=683 \text{ lm/W}$.

Φωτισμός (Illuminance) E

Ορίζεται ως το πηλίκο της φωτεινής ροής της ακτινοβολίας που προσπίπτει, διαδίδεται ή εκπέμπεται από ένα σημείο μίας συγκεκριμένης επιφάνειας, προς το εμβαδόν αυτής της επιφάνειας.

Εξίσωση ορισμού: $E = \frac{d\Phi}{dA}$ ή ισοδύναμα $E = K_m \int_{380}^{830} E_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$ όπου $K_m=683 \text{ lm/W}$

1.2.3 Μονάδες μετρήσεως του τυποποιημένου φωτομετρικού συστήματος

Η θεμελιώδης φωτομετρική μονάδα είναι η candela (cd). Αυτή ορίζεται ως εξής: Μία cd είναι η ένταση φωτεινής πηγής, σε δεδομένη διεύθυνση, η οποία εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία συχνότητας 540.10^{12} Hz και έχει ένταση ακτινοβολίας σε αυτή τη διεύθυνση $1/683 \text{ W/sr}$.

Με βάση τον ορισμό της cd και τις εξισώσεις ορισμού των φωτομετρικών μεγεθών, είναι δυνατόν να ορισθούν οι υπόλοιπες φωτομετρικές μονάδες.

Lumen (lm): είναι φωτεινή ροή που εκπέμπεται σε ένα στερεακτίνο από μία ισότροπη σημειακή φωτεινή πηγή, η οποία έχει φωτεινή ένταση 1 candela.

Lux (lx): είναι ο φωτισμός μίας επιφάνεια εμβαδού 1 m^2 , ο οποίος προκαλείται από φωτεινή ροή 1 lm, η οποία προσπίπτει ομοιόμορφα κατανεμημένη σε αυτή την επιφάνεια.

Μονάδα φωτισμού αμφιβληστροειδούς (Troland) Td

Το Troland είναι μια μονάδα που χρησιμοποιείται τον φωτισμό του αμφιβληστροειδούς. Ορίζεται ως το γινόμενο της λαμπρότητας επί το εμβαδόν της κόρης. Ένα Troland είναι ο φωτισμός αμφιβληστροειδούς που προκαλείται, όταν η λαμπρότητα είναι $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ και το εμβαδόν της κόρης είναι 1 mm^2 . Δηλαδή $1\text{Td}=1\text{cd}\cdot\text{mm}^2/\text{m}^2$

Στον πίνακα I.2 αναγράφονται συνοπτικά τα φωτομετρικά μεγέθη, οι εξισώσεις ορισμού καθώς και οι μονάδες μέτρησης.

Πίνακας I.2 Φωτομετρικά μεγέθη

| Μέγεθος | Εξίσωση ορισμού | Μονάδες μέτρησης |
|---|------------------------------------|-------------------|
| Φωτεινή ροή Luminous flux Φ | $\Phi = \frac{dQ}{dt}$ | lm |
| Ένταση φωτεινής πηγής Luminous intensity I | $I = \frac{d\Phi}{d\omega}$ | cd |
| Λαμπρότητα Luminance L | $L = \frac{d^2\Phi}{dA_n d\omega}$ | cd/m ² |
| Φωτισμός Illuminance E | $E = \frac{d\Phi}{dA}$ | lx |

Πίνακας σχημάτων.

| Σχήμα | Περιγραφή | Σελίδα |
|------------|---|--------|
| Σχήμα 1.1 | Ο ανθρώπινος οφθαλμός | 11 |
| Σχήμα 1.2 | Διάμετρος κόρης σε σχέση με την λαμπρότητα | 13 |
| Σχήμα 1.3 | Διάταξη και μορφή των φωτοανιχνευτών | 14 |
| Σχήμα 1.5 | Φάσμα απορρόφησης ροδοψίνης | 15 |
| Σχήμα 1.6 | Σχετική απορρόφηση των ραβδίων σε λογαριθμικές μονάδες | 16 |
| Σχήμα 1.7 | Φασματική ευαισθησία ραβδίων, σε λογαριθμικές μονάδες, σε σχέση με το μήκος κύματος | 16 |
| Σχήμα 1.8 | Απορρόφηση ραβδίων | 16 |
| Σχήμα 1.9 | Κανονικοποιημένη φασματική ευαισθησία των κωνίων (S,M,L) | 17 |
| Σχήμα 1.10 | Απορροφήσεις κωνίων | 18 |
| Σχήμα 1.11 | Φασματικές ευαισθησίες κωνίων κατά Vos, Walraven | 20 |
| Σχήμα 1.12 | Φασματικές ευαισθησίες κωνίων κατά Smith and Pokorny | 20 |
| Σχήμα 1.13 | Φασματικές ευαισθησίες κωνίων κατά Stockman, MacLeod and Johnson | 20 |
| Σχήμα 1.14 | Ανίχνευση μαρμαρυγής σε σχέση με την συχνότητα εναλλαγής οπτικών ερεθισμάτων για την περιφερειακή και κεντρική όραση(αριστερά) και ανίχνευση μαρμαρυγής σε σχέση με την λαμπρότητα για την περιφερειακή και κεντρική όραση (δεξιά). | 21 |
| Σχήμα 1.15 | Αριστερά: Χρονοσειρά προσαρμογής στο φως του συστήματος ραβδίων Δεξιά: Χρονοσειρά προσαρμογής στο φως του συστήματος κωνίων. | 22 |
| Σχήμα 1.16 | Χρονοσειρά προσαρμογής στο σκοτάδι των ραβδίων και κωνίων | 23 |
| Σχήμα 1.19 | Μηχανισμοί λειτουργίας ανθρώπινης όρασης | 25 |
| Σχήμα 2.1 | Ψυχομετρική καμπύλη με τη διαδικασία ναι-όχι | 33 |
| Σχήμα 2.2 | Ψυχομετρική καμπύλη με τη διαδικασία 2AFC (αριστερά) και με τη διαδικασία 4AFC | 33 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Σχήμα 2.3 | Σχήματα Snellen | 36 |
| Σχήμα 2.4 | Καθορισμός αποστάσεων και οπτικών πεδίων | 37 |
| Σχήμα 2.5 | Σχετικές φασματικές ευαισθησίες του ανθρώπινου οφθαλμού για την φωτοπική $V(\lambda)$ και σκοτοπική όραση $V'(\lambda)$ | 39 |
| Σχήμα.2.6 | Φασματικές ευαισθησίες για την φωτοπική $K(\lambda)$ και σκοτοπική όραση $K'(\lambda)$ | 39 |
| Σχήμα 2.7 | Καμπύλες φασματικής ευαισθησίας | 43 |
| Σχήμα 2.8 | Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και καμπύλης $V(\lambda)$ | 43 |
| Σχήμα 2.9 | Σύγκριση $V(\lambda)$ με την τροποποιημένη $V_M(\lambda)$, σε λογαριθμικές μονάδες | 43 |
| Σχήμα 2.10 | Σύγκριση της $V(\lambda)$ (κύκλοι) με καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας που κατασκευάστηκε με ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας (συνεχής γραμμή) | 44 |
| Σχήμα 2.11 | Καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας, $V_b(\lambda)$, $V_{b,10}(\lambda)$ | 45 |
| Σχήμα 2.12 | Ελάχιστη αντιληπτή διαφορά μήκους κύματος κατά μήκος κύματος | 46 |
| Σχήμα 2.13 | Προσθετικότητα χρωμάτων | 47 |
| Σχήμα 2.14 | Χρωματικές συναρτήσεις CIE 1931 | 48 |
| Σχήμα 2.15 | Χρωματικός χώρος (αριστερά) και το επίπεδο x, y (δεξιά) | 50 |
| Σχήμα 2.19 | Plankian locus και ισοθερμοκρασιακές γραμμές | 51 |
| Σχήμα 3.1 | Υποθετικές μεσοπικές καμπύλες | 54 |
| Σχήμα 3.2 | Έννοια της ισοδύναμης λαμπρότητας | 55 |
| Σχήμα 3.3 | Ταύτιση ερεθισμάτων | 56 |
| Σχήμα 3.4 | Γραφική παράσταση πηγών σε λογαριθμική κλίμακα | 57 |
| Σχήμα 4.1.1 | Σχηματική παράσταση του μοντέλου ATD | 60 |
| Σχήμα 4.2.1 | Καμπύλες της Kinney | 63 |
| Σχήμα 4.2.2 | Οπτική οξύτητα σε σχέση με την λαμπρότητα. | 64 |
| Σχήμα 4.2.3 | Οπτική οξύτητα σε σχέση με την ισοδύναμη λαμπρότητα. | 64 |
| Σχήμα 4.2.4 | Μέγεθος κόρης σε σχέση με την λαμπρότητα | 65 |
| Σχήμα 4.2.5 | Μέγεθος κόρης σε σχέση με την ισοδύναμη λαμπρότητα | 65 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Σχήμα 4.2.6 | Οπτική απόδοση σε σχέση με την λαμπρότητα | 66 |
| Σχήμα 4.3.1 | Πειραματική διάταξη οπτικής ταύτισης, σε επίπεδο αρχής | 70 |
| Σχήμα 4.3.2 | Γραφική λύση του προσδιορισμού της ισοδύναμης λαμπρότητας μετά από αλλαγή του ερεθίσματος αναφοράς | 70 |
| Σχήμα 4.3.3 | Ο λόγος L'/L συναρτήσει του μήκους κύματος και θερμοκρασίας | 72 |
| Σχήμα 4.3.5 | Ο λόγος L_{10}/L συναρτήσει του μήκους κύματος και θερμοκρασίας | 73 |
| Σχήμα 4.3.6 | Ο λόγος $L_{b,2}(\lambda)/L$ και $L_{b,10}(\lambda)/L$ σε σχέση με το μήκος κύματος | 73 |
| Σχήμα 4.3.7 | Γραφική των F συναρτήσεων παράσταση συναρτήσει του $\log L_{eq}$ | 74 |
| Σχήμα 4.3.8 | Σχηματικά ο τρόπος μέτρησης της ισοδύναμης λαμπρότητας | 76 |
| Σχήμα 4.3.9 | Γραφικός υπολογισμός των F συναρτήσεων για 0.01cd/m^2 | 77 |
| Σχήμα 4.3.10 | Γραφικός υπολογισμός της L_{eq} , ($L_{eq}=0.0179 \text{cd/m}^2$) | 77 |
| Σχήμα 4.5.1 | Γραφική παράσταση των κατωφλίων αντίθεσης με την λαμπρότητα | 83 |
| Σχήμα 4.5.2 | Γραφική παράσταση του λόγου L/L_{eq} σε σχέση με την λαμπρότητα | 83 |
| Σχήμα 4.6.1 | Φασματικές ευαισθησίες για 9 επίπεδα φωτισμού αμφιβληστροειδούς για τους παρατηρητές (HS) και (TG) | 85 |
| Σχήμα 4.6.2 | Σύγκριση των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας, φωτοπικής-σκοτοπικής, με τα πειραματικά δεδομένα στις ακραίες τιμές φωτισμού | 85 |
| Σχήμα 4.6.3 | Συντελεστές a και b για τους δύο παρατηρητές | 86 |
| Σχήμα 4.6.4 | Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών καμπυλών | 86 |
| Σχήμα 4.6.5 | Συναρτήσεις p_1 , p_2 , για πέντε επίπεδα φωτισμού αμφιβληστροειδούς, για τον παρατηρητή YN | 87 |
| Σχήμα 4.6.6 | Συναρτήσεις p_1 , p_2 , για πέντε επίπεδα φωτισμού αμφιβληστροειδούς, για τον παρατηρητή CI | 87 |
| Σχήμα 4.6.7 | Αποτελέσματα διορθωμένα σύμφωνα με την θεωρία του Ikeda | 88 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Σχήμα 4.7.1 | Φασματικές ευαισθησίες για 9 επίπεδα φωτισμού αμφιβληστροειδούς για 12 άτομα | 89 |
| Σχήμα 4.7.2 | Καμπύλες που προκύπτουν από τον μέσο όρο των 12 ατόμων | 90 |
| Σχήμα 4.7.3 | Κανονικοποιημένες καμπύλες στα 570nm | 90 |
| Σχήμα 4.7.4 | Γραφική παράσταση της έκφρασης της μεσοπικής λαμπρότητας, συναρτήσει φωτοπικής-σκοτοπικής στα 0.32 Td | 91 |
| Σχήμα 4.7.5 | Σύγκριση θεωρητικά προσδιορισμένων καμπυλών και πειραματικών | 92 |
| Σχήμα 4.7.6 | Γραφική παράσταση των συντελεστών $\alpha_1, \alpha_2, \alpha$ | 93 |
| Σχήμα 4.7.7 | Γραφική λύση του μοντέλου, με χρήση δύο συντελεστών | 93 |
| Σχήμα 4.7.8 | Γραφική λύση του μοντέλου, με χρήση ενός συντελεστή | 95 |
| Σχήμα 4.9.1 | Καμπύλη σχήματος S που καλύπτει όλες τις περιοχές όρασης | 98 |
| Σχήμα 4.9.2 | Καμπύλες S για διάφορες ακτινοβολίες αναφοράς | 100 |
| Σχήμα 4.9.3 | Καμπύλη μορφής S όπου φαίνονται τα σημεία P, S | 100 |
| Σχήμα 4.9.4 | Τα όρια φωτοπικής και σκοτοπικής περιοχής. Παριστάνονται επίσης και οι αντίστοιχες φασματικές ευαισθησίες $V'(\lambda), V_{10}(\lambda)$ | 103 |
| Σχήμα 4.10.1 | Συσκευή μέτρησης χρόνων αντίδρασης | 105 |
| Σχήμα 4.10.2 | Τυπικά αποτελέσματα της μεθόδου χρόνων αντίδρασης | 106 |
| Σχήμα 4.10.3 | Καμπύλες ευαισθησίας με την μέθοδο χρόνων αντίδρασης | 107 |
| Σχήμα 4.10.4 | Σχέση ανάμεσα στο x και τον φωτισμό αμφιβληστροειδούς | 108 |
| Σχήμα 4.10.5 | Σχέση ανάμεσα στο x και τον μεσοπικό φωτισμό αμφιβληστροειδούς | 109 |
| Σχήμα 4.12.1 | Γραμμικό μοντέλο του MOVE της παραμέτρου x σαν συνάρτηση του λογαρίθμου της φωτοπικής λαμπρότητας και οι πειραματικές τιμές. | 113 |
| Σχήμα 4.12.2 | Καμπύλη φασματικής ευαισθησίας για λαμπρότητα cd/m^2 | 113 |
| Σχήμα 4.12.3 | τιμές του x σαν συνάρτηση του λόγου σκοτοπικής προς φωτοπική λαμπρότητα για διάφορες τιμές φωτοπικής | 114 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| | λαμπρότητας | |
| Σχήμα 4.12.1 | Φασματικές κατανομές. | 116 |
| Σχήμα 5.1.1 | Φασματική απόδοση για υποθετικές μεσοπικές καμπύλες | 121 |
| Σχήμα 5.1.2 | Κανονικοποιημένες υποθετικές μεσοπικές καμπύλες | 121 |
| Σχήμα 5.2.1 | Λόγος φωτοπική προς σκοτοπική λαμπρότητα, για διάφορους τύπους λαμπτήρων | 126 |
| Σχήμα 5.2.2 | Λόγος $V'(\lambda)/V(\lambda)$ | 126 |
| Σχήμα 5.2.3 | Λόγος $x(\lambda)/V(\lambda)$. | 126 |
| Σχήμα 5.2.4 | Λόγος $z(\lambda)/V(\lambda)$. | 126 |
| Σχήμα 5.2.5 | Λόγος $x_{10}(\lambda)/V(\lambda)$. | 126 |
| Σχήμα 5.2.6 | Λόγος $y_{10}(\lambda)/V(\lambda)$. | 127 |
| Σχήμα 5.2.7 | Λόγος $z_{10}(\lambda)/V(\lambda)$. | 127 |
| Σχήμα 5.1 | Φασματικές κατανομές δύο υποθετικών πηγών α και β οι οποίες έχουν το ίδιο λόγο S/P | 133 |
| Σχήμα 6.1 | Πειραματική διάταξη μέτρησης οπτικής οξύτητας. | 138 |
| Σχήμα 6.2 | Δακτύλιοι του Landlot που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. (σμίκρυνση 69.1%) | 141 |
| Σχήμα 6.3 | Κανονικοποιημένες φασματικές κατανομές στο ορατό φάσμα για τους λαμπτήρες α : μεταλλικών αλογονιδίων β : ατμών υδραργύρου γ : φθορισμού | 142 |
| Σχήμα 6.4 | Οπτική οξύτητα συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας | 147 |
| Σχήμα 6.5 | Οπτική οξύτητα συναρτήσει του λόγου S/P | 147 |
| Σχήμα 6.6 | Σχετική οπτική οξύτητα με λαμπτήρα αναφοράς το λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων | 148 |
| Σχήμα 7.3.1 | Πειραματική διάταξη | 157 |
| Σχήμα 7.3.2 | Εικόνα του οπτικού στόχου, την οποία αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής | 159 |
| Σχήμα 7.3.3 | Κανονικοποιημένη φασματική κατανομή στο ορατό φάσμα για τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου 125W | 164 |
| Σχήμα 7.3.4 | Κανονικοποιημένη φασματική κατανομή στο ορατό φάσμα για τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου 400W | 164 |
| Σχήμα 7.3.5 | Κανονικοποιημένη φασματική κατανομή στο ορατό φάσμα για τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων 250W | 165 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Σχήμα 7.3.6 | Κανονικοποιημένη φασματική κατανομή στο ορατό φάσμα για τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων 400W | 165 |
| Σχήμα 7.3.7 | Κανονικοποιημένη φασματική κατανομή στο ορατό φάσμα για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης 250W | 165 |
| Σχήμα 7.3.8 | Κανονικοποιημένη φασματική κατανομή στο ορατό φάσμα για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης 4000W | 166 |
| Σχήμα 7.4.1 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων πειραματικά προσδιοριζόμενος και θεωρητικά για τα μήκη κύματος 440 και 560. | 168 |
| Σχήμα 7.4.2 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων πειραματικά προσδιοριζόμενος και θεωρητικά για τα μήκη κύματος 500 και 560 | 168 |
| Σχήμα 7.4.3 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων πειραματικά προσδιοριζόμενος και θεωρητικά για τα μήκη κύματος 540 και 560 | 169 |
| Σχήμα 7.4.4 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων πειραματικά προσδιοριζόμενος και θεωρητικά για τα μήκη κύματος 500 και 540 | 169 |
| Σχήμα 7.4.5 | Λόγοι ισοδυνάμων λαμπροτήτων πειραματικά προσδιοριζόμενος και θεωρητικά για τα εξεταζόμενα μήκη κύματος | 170 |
| Σχήμα 7.5.1 | Λόγοι ισοδυνάμων λαμπροτήτων (L(MH)/L(HPS)), (L(HG)/L(HPS)) και (L(MH)/L(HG)) συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας του υποβάθρου που δημιουργείται με φωτισμό από λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης | 191 |
| Σχήμα 7.5.2 | Λόγοι ισοδυνάμων λαμπροτήτων (L(MH)/L(HPS)), (L(HG)/L(HPS)) και (L(MH)/L(HG)) συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας του υποβάθρου που δημιουργείται με φωτισμό από λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων | 192 |
| Σχήμα 7.5.3 | Λόγοι ισοδυνάμων λαμπροτήτων (L(MH)/L(HPS)), | 192 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| | (L(HG)/L(HPS)) και (L(MH)/L(HG)) συναρτήσεως της φωτοπικής λαμπρότητας του υποβάθρου που δημιουργείται με φωτισμό από λαμπτήρα ατμών υδραργύρου | |
| Σχήμα 7.6.2 | Γραφική παράσταση των συναρτήσεων x και y στη περίπτωση φασματικής κατανομής που παράγεται από λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης | 201 |
| Σχήμα 7.6.3 | Γραφική παράσταση των συναρτήσεων x και y στη περίπτωση φασματικής κατανομής που παράγεται από λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων | 201 |
| Σχήμα 7.6.4 | Γραφική παράσταση των συναρτήσεων x και y στη περίπτωση φασματικής κατανομής που παράγεται από λαμπτήρα ατμών υδραργύρου | 201 |
| Σχήμα 7.6.5 | Γραφική παράσταση των συναρτήσεων y για τις φασματικές κατανομές των τριών τύπων λαμπτήρων | 202 |
| Σχήμα 7.6.6 | Γραφική παράσταση των συναρτήσεων x για τις φασματικές κατανομές των τριών τύπων λαμπτήρων | 202 |
| Σχήμα 7.7.2 | Πειραματικά και θεωρητικά υπολογισμένοι λόγοι MH/HG, MH/HPS και HG/HPS στη περίπτωση υποβάθρου νατρίου υψηλής πίεσης | 205 |
| Σχήμα 7.7.3 | Πειραματικά και θεωρητικά υπολογισμένοι λόγοι MH/HG, MH/HPS και HG/HPS στη περίπτωση υποβάθρου μεταλλικών αλογονιδίων | 206 |
| Σχήμα 7.7.4 | Πειραματικά και θεωρητικά υπολογισμένοι λόγοι MH/HG, MH/HPS και HG/HPS στη περίπτωση υποβάθρου ατμών υδραργύρου | 206 |
| Σχήμα 7.8.1 | Μεταβολή της μέγιστης K'' συναρτήσεως της μεσοπικής λαμπρότητας για τους τρεις τύπους λαμπτήρων | 207 |
| Σχήμα 7.8.2 | Μεταβολή του λ στο οποίο παρουσιάζεται η μέγιστη K'' συναρτήσεως της μεσοπικής λαμπρότητας για τους τρεις τύπους λαμπτήρων | 208 |
| Σχήμα 7.8.2 | Μεσοπικές καμπύλες φασματικής ευαισθησίας λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων ($x=0.13202$ $y=0.008333$) και | 209 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| | λαμπτήρα νατρίου υψηλής ($x=0.131877$ $y=0.01385$) | |
| Σχήμα 7.9.1 | Καμπύλες φασματικής ευαισθησίας. Φωτοπική, σκοτοπική και μεσοπικές παραγόμενες από το αναπτυχθέν μοντέλο | 212 |
| Σχήμα 7.9.2 | Καμπύλες σχετικής φασματικής ευαισθησίας. Φωτοπική, σκοτοπική και μεσοπικές παραγόμενες από το αναπτυχθέν μοντέλο | 213 |
| Σχήμα 7.9.3 | Καμπύλη φασματικής ευαισθησίας και σχετικής φασματικής ευαισθησίας σε σύγκριση με τις αντίστοιχες φωτοπική και σκοτοπική ($x=0.677$, $y=0.103$) | 215 |
| Σχήμα 7.9.4 | Μεσοπική λαμπρότητα ως συνάρτηση της φωτοπικής για τους λαμπτήρες νατρίου υψηλής, μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου | 218 |
| Σχήμα 7.9.5 | Μεσοπική λαμπρότητα ως συνάρτηση της φωτοπικής και για τους τρεις λαμπτήρες νατρίου υψηλής, μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου | 218 |
| Σχήμα 7.9.6 | Μεσοπική λαμπρότητα ως συνάρτηση της φωτοπικής και για τους τρεις λαμπτήρες νατρίου υψηλής, μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου σε λογαριθμική κλίμακα | 219 |
| Σχήμα 7.9.7 | Φασματική ισχύς (W/nm για κάθε 1000lm) της SYLVANIA Fluorescent lamp WW | 223 |
| Σχήμα 7.9.8 | Μεταβολή της μεσοπικής λαμπρότητας συναρτήσει της φωτοπικής για τον λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA FL WW | 225 |
| Σχήμα 7.9.9 | Πολικά διαγράμματα για το φωτιστικό Philips SGS 203 PC P3 με λαμπτήρες SON TP 70W και CDM 70W/830 | 232 |
| Σχήμα 8.1.1 | Λόγοι ισοδυνάμων λαμπροτήτων HPS/MH | 236 |
| Σχήμα 8.1.2 | Μεσοπική λαμπρότητα για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας και για τα τρία μοντέλα | 240 |
| Σχήμα 8.1.3 | Μεσοπική λαμπρότητα για τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας και για τα τρία μοντέλα | 240 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Σχήμα 8.1.4 | Μεσοπική λαμπρότητα για τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας και για τα τρία μοντέλα | 241 |
| Σχήμα 8.1.5 | Μεσοπική λαμπρότητα για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας και για τα τρία μοντέλα, για μεγάλες τιμές λαμπρότητας | 244 |
| Σχήμα 8.1.6 | Μεσοπική λαμπρότητα για τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας και για τα τρία μοντέλα, για μεγάλες τιμές λαμπρότητας | 245 |
| Σχήμα 8.1.7 | Μεσοπική λαμπρότητα για τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας και για τα τρία μοντέλα, για μεγάλες τιμές λαμπρότητας | 245 |
| Σχήμα 8.1.8 | Μεταβολή των μεσοπικών λαμπροτήτων των τριών λαμπτήρων με λαμπτήρα αναφοράς τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής | 248 |
| Σχήμα 8.1.9 | Μεταβολή των μεσοπικών λαμπροτήτων των τριών λαμπτήρων με λαμπτήρα αναφοράς τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων | 249 |
| Σχήμα 8.1.10 | Μεταβολή των μεσοπικών λαμπροτήτων των τριών λαμπτήρων με λαμπτήρα αναφοράς τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου | 249 |
| Σχήμα 8.1.11 | Συγκεντρωτική παρουσίαση της μεταβολής των μεσοπικών λαμπροτήτων των τριών λαμπτήρων για κάθε λαμπτήρα αναφοράς | 250 |
| Σχήμα 8.1.12 | Μεταβολή της μεσοπικής λαμπρότητας των λαμπτήρων συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας σύμφωνα με το μοντέλο MOVE | 251 |
| Σχήμα 8.1.13 | Μεταβολή της μεσοπικής λαμπρότητας των λαμπτήρων συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας σύμφωνα με το μοντέλο REA | 252 |
| Σχήμα 8.1.14 | Μεταβολή της φωτεινής ροής για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα | 254 |
| Σχήμα 8.1.15 | Μεταβολή της φωτεινής ροής για τον λαμπτήρα | 255 |

μεταλλικών αλογονιδίων σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα
Σχήμα 8.1.16 Μεταβολή της φωτεινής ροής για τον λαμπτήρα ατμών 256
υδραργύρου σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα

Πίνακας πινάκων.

| Πίνακας | Περιγραφή | Σελίδα |
|----------------|---|--------|
| Πίνακας 4.2.1 | Τιμές των σταθερών μοντέλου Adrian | 63 |
| Πίνακας 4.2.2 | Απαιτούμενα σχετικά lumen διαφορετικών πηγών ώστε να έχουμε ίδια οπτική απόδοση. | 67 |
| Πίνακας 4.2.3 | Οπτική απόδοση φωτεινών πηγών των 400W | 67 |
| Πίνακας 4.2.4 | Σχετική ισχύς του λαμπτήρα σε W ο οποίος αποδίδει 100 lm σε λαμπρότητα 10cd/m ² ώστε να επιτυγχάνεται η ίδια οπτική απόδοση. | 68 |
| Πίνακας 4.3.1 | Οι τιμές των F συναρτήσεων και φυσική κόρη για οπτικό πεδίο 10°. | 75 |
| Πίνακας 4.3.2 | Υπολογισμός των ϕ_1, ϕ_2 | 77 |
| Πίνακας 4.4.1 | LEM (νατρίου υψηλής πίεσης=1.00) από μεσοπικές συναρτήσεις που παρήχθησαν σύμφωνα με το κριτήριο ταύτισης φωτεινότητας | 81 |
| Πίνακας 4.4.2 | LEM (νατρίου υψηλής πίεσης =1.00) με χρήση μεσοπικών συναρτήσεων, οι οποίες παρήχθησαν σύμφωνα με το κριτήριο του χρόνου αντίδρασης. | 81 |
| Πίνακας 4.5.1 | Πολλαπλασιαστές Lewis για λαμπτήρες διαφόρων τύπων | 82 |
| Πίνακας 4.5.2 | Αποτελέσματα μετρήσεων (κατά Lewis)για διάφορους τύπους λαμπτήρων | 83 |
| Πίνακας 4.7.2 | Τιμές των συντελεστών a_1, a_2 στο μοντέλο Sagawa | 92 |
| Πίνακας 4.7.3 | Τιμές των συντελεστών a_1, a_2, a . | 96 |
| Πίνακας 4.10.1 | Τιμές του x στο μοντέλο Rea. | 107 |
| Πίνακας 4.10.2 | Τιμές του x και της μεσοπικής λαμπρότητας για διάφορες τιμές του λόγου S/P(στήλες) και φωτοπικής λαμπρότητας(γραμμές) | 110 |
| Πίνακας 4.12.1 | Πίνακας πειραμάτων στο πρόγραμμα MOVE | 112 |
| Πίνακας 4.12.2 | Τιμές του x συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας | 114 |
| Πίνακας 4.12.1 | Συγκριτικός πίνακας των περιγραφέντων μοντέλων | 116 |
| Πίνακας 4.12.2 | Χρωματικές συντεταγμένες των λαμπτήρων | 117 |
| Πίνακας 4.12.3 | Χρωματικές συντεταγμένες των ακτινοβολιών | 117 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| Πίνακας 4.12.4 | Φωτεινές αποδόσεις μονοχρωματικών ακτινοβολιών στην περιοχή της μεσοπικής όρασης | 117 |
| Πίνακας 4.12.5 | Συγκρίσεις ισοδυνάμων λαμπροτήτων για τους λαμπτήρες MH, HG, HPS. | 118 |
| Πίνακας 4.12.6 | Συγκρίσεις ισοδυνάμων λαμπροτήτων για χρωματισμένες ακτινοβολίες. | 118 |
| Πίνακας 6.1 | Λόγοι σκοτοπικής προς φωτοπική λαμπρότητα των λαμπτήρων ατμών υδραργύρου, μεταλλικών αλογονιδίων, φθορισμού και πυράκτωσης | 143 |
| Πίνακας 6.2 | Χαρακτηριστικά των δακτυλίων Landlot | 144 |
| Πίνακας 6.3 | Οπτική οξύτητα με φωτισμό υποβάθρου από λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων | 145 |
| Πίνακας 6.4 | Οπτική οξύτητα με φωτισμό υποβάθρου από λαμπτήρα ατμών υδραργύρου | 145 |
| Πίνακας 6.5 | Οπτική οξύτητα με φωτισμό υποβάθρου από λαμπτήρα πυράκτωσης | 145 |
| Πίνακας 6.6 | Οπτική οξύτητα με φωτισμό υποβάθρου από λαμπτήρα φθορισμού | 146 |
| Πίνακας 6.7 | Μέση τιμή οπτικής οξύτητας για διάφορους φωτισμούς υποβάθρου | 146 |
| Πίνακας 6.7 | Σχετική οπτική οξύτητα με λαμπτήρα αναφοράς το λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων | 146 |
| Πίνακας 7.3.1 | Τύποι λαμπτήρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση του πειράματος ελαχιστοποίησης διαχωριστικού ορίου | 161 |
| Πίνακας 7.4.1 | Λόγοι ισοδυνάμων φωτοπικών λαμπροτήτων | 167 |
| Πίνακας 7.5.1 | Λόγοι Lux(φωτοπικά)/(Watt/cm ²) | 172 |
| Πίνακας 7.5.2 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m ² . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης. | 173 |
| Πίνακας 7.5.3 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. | 173 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| | Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης. | |
| Πίνακας 7.5.4 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης. | 174 |
| Πίνακας 7.5.5 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης. | 174 |
| Πίνακας 7.5.6 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης. | 175 |
| Πίνακας 7.5.7 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης. | 175 |
| Πίνακας 7.5.8 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης. | 176 |
| Πίνακας 7.5.9 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης | 176 |
| Πίνακας 7.5.10 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης. | 177 |
| Πίνακας 7.5.11 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1cd/m^2 . Φωτισμός | 177 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| | υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης. | |
| Πίνακας 7.5.12 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου 0.1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης. | 178 |
| Πίνακας 7.5.13 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου 0.1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης | 178 |
| Πίνακας 7.5.14 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων. | 179 |
| Πίνακας 7.5.15 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: μεταλλικών αλογονιδίων. | 179 |
| Πίνακας 7.5.16 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων. | 180 |
| Πίνακας 7.5.17 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων. | 180 |
| Πίνακας 7.5.18 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: μεταλλικών αλογονιδίων. | 181 |
| Πίνακας 7.5.19 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων. | 181 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| Πίνακας 7.5.20 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων. | 182 |
| Πίνακας 7.5.21 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: μεταλλικών αλογονιδίων. | 182 |
| Πίνακας 7.5.22 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων. | 183 |
| Πίνακας 7.5.23 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων. | 183 |
| Πίνακας 7.5.24 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: μεταλλικών αλογονιδίων. | 184 |
| Πίνακας 7.5.25 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων. | 184 |
| Πίνακας 7.5.26 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου. | 185 |
| Πίνακας 7.5.27 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: ατμών υδραργύρου. | 185 |
| Πίνακας 7.5.28 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών | 186 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| | υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 5cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου. | |
| Πίνακας 7.5.29 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου. | 186 |
| Πίνακας 7.5.30 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: ατμών υδραργύρου. | 187 |
| Πίνακας 7.5.31 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 3cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου. | 187 |
| Πίνακας 7.5.32 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου. | 188 |
| Πίνακας 7.5.33 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: ατμών υδραργύρου. | 188 |
| Πίνακας 7.5.34 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου. | 189 |
| Πίνακας 7.5.35 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου. | 189 |
| Πίνακας 7.5.36 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων μεταλλικών αλογονιδίων και νατρίου υψηλής πίεσης. | 190 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| | Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1 cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: ατμών υδραργύρου. | |
| Πίνακας 7.5.37 | Λόγος ισοδυνάμων λαμπροτήτων λαμπτήρων ατμών υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης. Λαμπρότητα υποβάθρου: 0.1 cd/m^2 . Φωτισμός υποβάθρου: λαμπτήρας ατμών υδραργύρου. | 190 |
| Πίνακας 7.5.38 | Μέσοι όροι των λόγων ισοδυνάμων λαμπροτήτων για τους τρεις φωτισμούς υποβάθρου και τα αντίστοιχα επίπεδα λαμπρότητας. | 191 |
| Πίνακας 7.6.1 | Λαμπρότητες στόχων για φωτισμό υποβάθρου με λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας. | 195 |
| Πίνακας 7.6.2 | Λαμπρότητες στόχων για φωτισμό υποβάθρου με λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας. | 195 |
| Πίνακας 7.6.3 | Λαμπρότητες στόχων για φωτισμό υποβάθρου με λαμπτήρα ατμών υδραργύρου στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας. | 195 |
| Πίνακας 7.6.4 | Το γινόμενο $f \cdot F$ για φωτισμό υποβάθρου με λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας. | 196 |
| Πίνακας 7.6.5 | Το γινόμενο $f \cdot F$ για φωτισμό υποβάθρου με λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας. | 196 |
| Πίνακας 7.6.6 | Το γινόμενο $f \cdot F$ για φωτισμό υποβάθρου με λαμπτήρα ατμών υδραργύρου στα διάφορα επίπεδα λαμπρότητας. | 196 |
| Πίνακας 7.6.7 | Τιμές των x και y για κάθε λαμπτήρα φωτισμού υποβάθρου και κάθε επίπεδο λαμπρότητας. | 199 |
| Πίνακας 7.6.8 | Οι τιμές των σταθερών a , b , c , d και f των εξισώσεων x, y για κάθε λαμπτήρα υποβάθρου. | 200 |
| Πίνακας 7.7.1 | Πειραματικά και θεωρητικά προσδιορισμένες τιμές των x και y | 204 |
| Πίνακας 7.7.2 | Πειραματικά και θεωρητικά υπολογισμένοι λόγοι | 205 |

MH/HG, MH/HPS και HG/HPS

| | | |
|----------------|--|-----|
| Πίνακας 7.8.1 | Ισοδυναμία x και y λαμπτήρων HPS-MH και HPS-HG | 210 |
| Πίνακας 7.8.2 | Ισοδυναμία x και y λαμπτήρων MH-HPS και MH-HG | 210 |
| Πίνακας 7.8.3 | Ισοδυναμία x και y λαμπτήρων HG-MH και HG-HPS | 211 |
| Πίνακας 7.9.1 | Τιμές της $K''(\lambda)$ με βήμα 10nm ($x=0.677$, $y=0.103$) | 215 |
| Πίνακας 7.9.2 | Φωτοπικές λαμπρότητες και οι αντίστοιχες μεσοπικές για τους λαμπτήρες νατρίου υψηλής, μεταλλικών αλογονιδίων και ατμών υδραργύρου | 217 |
| Πίνακας 7.9.3 | Συντελεστές των συναρτήσεων $L''=f(L)$ για κάθε τύπο λαμπτήρα | 220 |
| Πίνακας 7.9.4 | Συντελεστές των συναρτήσεων $L=f(L')$ για κάθε τύπο λαμπτήρα | 220 |
| Πίνακας 7.9.5 | Συντελεστές των γραμμικών συναρτήσεων $L''=f(L)$ για κάθε τύπο λαμπτήρα | 221 |
| Πίνακας 7.9.6 | Συντελεστές των γραμμικών συναρτήσεων $L=f(L')$ για κάθε τύπο λαμπτήρα | 221 |
| Πίνακας 7.9.7 | Αντιστοιχία φωτοπικής- μεσοπικής λαμπρότητας για το λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA FL WW | 225 |
| Πίνακας 7.9.8 | Συντελεστές της συνάρτησης $L''=f(L)$ για το λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA FL WW | 225 |
| Πίνακας 7.9.9 | Συντελεστές της συνάρτησης $L=f(L')$ για το λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA FL WW | 226 |
| Πίνακας 7.9.10 | Συντελεστές της γραμμικής συνάρτησης $L''=f(L)$ για το λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA FL WW | 226 |
| Πίνακας 7.9.11 | Συντελεστές της γραμμικής συνάρτησης $L=f(L')$ για το λαμπτήρα φθορισμού SYLVANIA FL WW | 227 |
| Πίνακας 7.9.12 | Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης φωτισμού για τους δύο υποθετικούς λαμπτήρες σε φωτοπικές συνθήκες | 228 |
| Πίνακας 7.9.13 | Ισοδύναμες μεσοπικές λαμπρότητες των λαμπτήρων MH, HPS | 229 |
| Πίνακας 7.9.14 | Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης φωτισμού για τους δύο υποθετικούς λαμπτήρες σε μεσοπικές συνθήκες (λαμπρότητα 1cd/m^2 με λαμπτήρα HPS) | 230 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| Πίνακας 7.9.15 | Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης φωτισμού για τους δύο υποθετικούς λαμπτήρες σε μεσοπικές συνθήκες (λαμπρότητα 1cd/m^2 με λαμπτήρα MH) | 231 |
| Πίνακας 7.9.16 | Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης φωτισμού για τους δύο λαμπτήρες σε φωτοπικές συνθήκες | 233 |
| Πίνακας 7.9.17 | Σύγκριση των αποτελεσμάτων της μελέτης φωτισμού για τους δύο λαμπτήρες σε φωτοπικές συνθήκες. | 234 |
| Πίνακας 8.1.1 | Λόγοι ισοδυνάμων λαμπροτήτων HPS/MH | 236 |
| Πίνακας 8.1.2 | Φωτοπική, σκοτοπική λαμπρότητα και λόγος S/P για τους τρεις λαμπτήρες | 238 |
| Πίνακας 8.1.3 | Μεσοπικές λαμπρότητες για το λαμπτήρα νατρίου υψηλής | 238 |
| Πίνακας 8.1.4 | Μεσοπικές λαμπρότητες για το λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων | 239 |
| Πίνακας 8.1.5 | Μεσοπικές λαμπρότητες για το λαμπτήρα ατμών υδραργύρου | 239 |
| Πίνακας 8.1.6 | Χαρακτηριστικά της προσέγγισης του x | 242 |
| Πίνακας 8.1.7 | Μεσοπικές λαμπρότητες για το λαμπτήρα νατρίου υψηλής | 243 |
| Πίνακας 8.1.8 | Μεσοπικές λαμπρότητες για το λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων | 243 |
| Πίνακας 8.1.9 | Μεσοπικές λαμπρότητες για το λαμπτήρα ατμών υδραργύρου | 244 |
| Πίνακας 8.1.10 | Μεταβολή της μεσοπική ροής των τριών λαμπτήρων με λαμπτήρα αναφοράς τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής | 247 |
| Πίνακας 8.1.11 | Μεταβολή της μεσοπική ροής των τριών λαμπτήρων με λαμπτήρα αναφοράς τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων. | 247 |
| Πίνακας 8.1.12 | Μεταβολή της μεσοπική ροής των τριών λαμπτήρων με λαμπτήρα αναφοράς τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου | 248 |
| Πίνακας 8.1.13 | Μεταβολή της μεσοπικής λαμπρότητας των λαμπτήρων συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας σύμφωνα με το μοντέλο MOVE | 251 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| Πίνακας 8.1.14 | Μεταβολή της μεσοπικής λαμπρότητας των λαμπτήρων συναρτήσει της φωτοπικής λαμπρότητας σύμφωνα με το μοντέλο REA | 252 |
| Πίνακας 8.1.15 | Μεταβολή της φωτεινής ροής για τον λαμπτήρα νατρίου υψηλής σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα. | 254 |
| Πίνακας 8.1.16 | Μεταβολή της φωτεινής ροής για τον λαμπτήρα μεταλλικών αλογονιδίων σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα. | 255 |
| Πίνακας 8.1.17 | Μεταβολή της φωτεινής ροής για τον λαμπτήρα ατμών υδραργύρου σύμφωνα και με τα τρία μοντέλα. | 256 |