



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΤΕΧΝΙΑΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ
ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ
ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΟΦΘΑΛΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΤΗΣ ΜΕΣΟΠΙΚΗΣ ΟΡΑΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Β. Μερεντίτης

Επιβλέπων: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2007



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΤΕΧΝΙΑΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ
ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ
ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΟΦΘΑΛΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΤΗΣ ΜΕΣΟΠΙΚΗΣ ΟΡΑΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Β. Μερεντίτης

Επιβλέπων: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 8η Οκτωβρίου 2007

.....
Φ. Τοπαλής
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ι. Σταθόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Μπούρκας
Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2007

.....
Κωνσταντίνος Β. Μερεντίτης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών
Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Κωνσταντίνος Β. Μερεντίτης, 2007

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση του τρόπου με τον οποίο τυποποιήθηκε το υπάρχον φωτομετρικό σύστημα στη περιοχή της φωτοπικής και σκοτοπικής όρασης. Συγκεντρώνονται πειραματικά δεδομένα και καταχωρούνται σε πίνακες ώστε να καθίσταται εύκολη η σύγκριση και η επεξεργασία τους. Για κάθε πείραμα, παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα και τέλος εξάγονται κάποια συμπεράσματα και διαπιστώσεις.

Λέξεις – κλειδιά

Φωτοπική καμπύλη, σκοτοπική καμπύλη, φασματική ευαισθησία, φωτοανιχνευτές, ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας, φωτομετρία μαρμαρυγής, βήμα προς βήμα μέθοδος

Abstract

The scope of this thesis is the examination of the way the present photometric system has been standardized in the field of photopic and scotopic vision. Experimental data has been gathered and placed in tables, in order to make comparison and processing easier. For each experiment, the corresponding diagram is presented and finally, certain conclusions and ascertainments are drawn.

Key - words

Photopic function, scotopic function, spectral luminous efficiency, heterochromatic brightness matching, flicker photometry, step by step brightness matching

Σημείωση:

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Φ.Τοπαλή και τον κ. Ν.Μπισκετζή για την πολύτιμη βοήθεια, την καθοδήγηση και για την συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	9
2. Σύντομη περιγραφή της ανθρώπινης όρασης και φωτομετρία	11
2.1. Φυσιολογία	11
2.1.1 Οφθαλμός.....	11
2.2 Φωτομετρία.....	13
2.3 Κατασκευή των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας.....	15
2.3.1 Νόμοι του Abney (προσθετικότητα).....	15
2.4 Δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά την πειραματική κατασκευή των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας.....	17
2.5 Πειραματικές μέθοδοι '	17
2.5.1 Οπτικά κατώφλια	17
2.5.2 Φωτομετρία μαρμαρυγής (Flicker Photometry)	21
2.5.3 Άμεση Ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας (Direct Heterochromatic Brightness Matching).....	21
2.5.4 Βήμα προς βήμα ταύτιση φωτεινότητας (Step-by-Step Brightness Matching).....	22
2.5.5 Ελαχιστοποίηση διαχωριστικού ορίου (Minimally Distinct Border)	22
2.5.6 Οπτική οξύτητα (Visual Acuity).....	22
2.5.7 Κρίσιμη συχνότητα μαρμαρυγής (Critical flicker frequency).....	24
2.5.8 Συγκρίσεις μεθόδων.....	24
2.6 Φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού.....	24
2.7 Προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την χρήση των $V(\lambda)$ και $V'(\lambda)$	28
2.8 Διόρθωση Judd-Woss	29
2.9 Άλλες καμπύλες σχετικής φασματικής ευαισθησίας.....	32
3. Η καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας στη φωτοπική όραση	34
3.1. Εισαγωγή	34
3.2 Coblentz - Emerson.....	34
3.2.1 Εισαγωγή	34
3.2.2 Διάταξη	34
3.2.3 Μέθοδος παρατήρησης	36
3.2.4 Αποτελέσματα.....	36
3.3 Gibson & Tyndall	38
3.3.1 Εισαγωγή	38
3.3.2 Διάταξη	38
3.3.3 Ενεργειακές μετρήσεις.....	39
3.3.4 Μέθοδος παρατήρησης	40
3.3.5 Αποτελέσματα.....	40
3.4 L.C.Thomson	42
3.3.1. Εισαγωγή	42
3.3.2 Μέθοδος.....	42
3.3.3 Διάταξη	43
3.3.4 Φυσικές μετρήσεις.....	43
3.3.5 Αποτελέσματα.....	43
3.4. Σύγκριση των αποτελεσμάτων και ποσοστιαίες αποκλίσεις	46
4. Η καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας ταύτισης φωτεινότητας ($V_b(\lambda)$).....	48
4.1 Εισαγωγή	48
4.2 Ikeda, Yaguchi, Sagawa.....	49
4.2.1 Εισαγωγή	49

4.2.2. Μέθοδος	49
4.2.3. Αποτελέσματα.....	49
4.3 D.A.Palmer	52
4.3.1 Διάταξη	52
4.3.2 Ρυθμίσεις συσκευών	52
4.3.3. Μέθοδος.....	53
4.3.4. Αποτελέσματα.....	53
4.4 Sagawa – Takeichi	58
4.4.1. Εισαγωγή	58
4.4.2. Διάταξη	58
4.4.3. Ρυθμίσεις.....	58
4.4.4. Διαδικασία	59
4.4.5. Αποτελέσματα.....	59
4.5 Ikeda, Nakano	61
4.6. CIE	65
4.7.1 Σύγκριση των καμπυλών Vb2 και αποκλίσεις από της CIE.....	67
4.7.2. Σύγκριση των καμπυλών Vb10 και αποκλίσεις από της CIE.....	68
5. Η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας στη σκοτοπική όραση	71
5.1. Εισαγωγή	71
5.2. Γενικοί πειραματικοί όροι και διάταξη συσκευών	71
5.2.1. Συνθήκες όρασης	71
5.2.2. Διάταξη	73
5.2.3. Φυσικές μετρήσεις.....	74
5.2.4. Παρατηρητές.....	74
5.2.5. Αποτελέσματα.....	75
5.2.6 Σύγκριση της φωτομετρικής μεθόδου με τη μέθοδο του κατωφλίου	77
5.2.7 Σύγκριση με τα αποτελέσματα άλλων παρατηρητών	78
5.2.8 Σύγκριση με τις προτεινόμενες καμπύλες της CIE και ποσοστιαίες αποκλίσεις.....	81
6. Συμπεράσματα – Επισημάνσεις.....	83
Παράρτημα	85
Βιβλιογραφία	94

1. Εισαγωγή

Ένας πρώτος ορισμός για το φως είναι "φως ονομάζουμε κάθε ακτινοβολία η οποία μπορεί να ερεθίσει τον ανθρώπινο οφθαλμό"². Είναι γνωστό ότι η ανταπόκριση του οφθαλμού στις φωτεινές ακτινοβολίες εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως λαμπρότητα, μήκος κύματος, άνοιγμα κόρης, μέγεθος οπτικού πεδίου κ.α. Σύμφωνα με την CIE³, ως φως ορίζεται η ισχύς ακτινοβολίας διαμορφωμένη από την φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού. Ο ορισμός αυτός παραπέμπει σε μετρήσεις και πράγματι η φωτομετρία μελετά την μέτρηση του φωτός ορίζοντας κατάλληλα φωτομετρικά μεγέθη.

Η ανθρώπινη όραση εξαρτάται από τα επίπεδα φωτισμού. Ανάλογα με τα επίπεδα φωτισμού διακρίνεται σε φωτοπική (φως ημέρας) και σκοτοπική (έναστρος ουρανόσ). Η όραση στην ενδιάμεση περιοχή καλείται μεσοπική.

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

Το τυποποιημένο φωτομετρικό σύστημα καθορίσθηκε από τη Διεθνή Επιτροπή Φωτισμού (Commission Internationale de l'Eclairage, CIE) την εποχή του μεσοπολέμου και έκτοτε έχει γίνει αποδεκτό διεθνώς. Αποτελεί ένα σύστημα μεγεθών και μονάδων μέτρησης με το οποίο εκφράζονται όλες οι έρευνες και οι μελέτες φωτισμού.

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι να εξετάσει τον τρόπο με τον οποίο τυποποιήθηκε το υπάρχον φωτομετρικό σύστημα στη περιοχή της φωτοπικής και σκοτοπικής όρασης.

Η εργασία αυτή είναι βιβλιογραφικής μορφής. Συγκεντρώνει όλες τις αναφορές που απαιτούνται για την κατασκευή των καμπύλων φασματικής ευαισθησίας, ενώ παράλληλα όλα τα δεδομένα καταγράφονται σε ηλεκτρονική μορφή. Εξετάζονται οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν από τους ερευνητές. Γίνεται καταχώρηση των μετρήσεων σε πίνακες Excel ώστε να είναι δυνατή η εύκολη πρόσβαση και επεξεργασία τους. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τα άρθρα στα οποία υπάρχουν οι μετρήσεις αυτές είναι αρκετά σπάνιες και σπαταλήθηκε πολύς χρόνος για την εύρεση τους. Παρουσιάζονται τα διαγράμματα που παράγονται από τις μετρήσεις και τέλος γίνονται συγκρίσεις και διατυπώνονται και κάποια συμπεράσματα η διαπιστώσεις.

Στόχος της εργασίας αυτής είναι να αποτελέσει ένα εργαλείο για εκείνους που ενδιαφέρονται για την φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού στις διάφορες περιοχές όρασης.

2. Σύντομη περιγραφή της ανθρώπινης όρασης και φωτομετρία

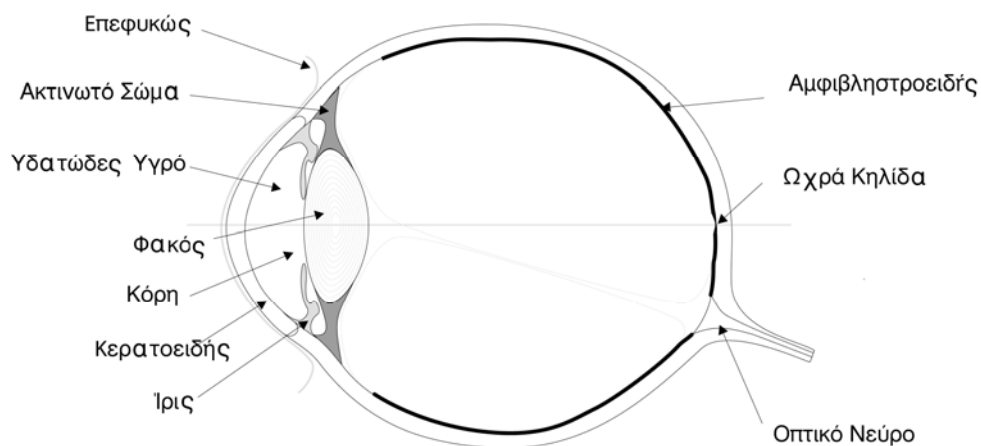
2.1. Φυσιολογία

2.1.1 Οφθαλμός

Η όραση αποτελεί την ανώτερη αισθητηριακή αντίληψη του φωτός, των αντικειμένων και των χρωμάτων. Χάρη σ' αυτήν την ικανότητα ερχόμαστε σε επαφή με τον έξω κόσμο και συνειδητοποιούμε τη θέση μας και τη κίνησή μας μέσα στο χώρο.

Οι φωτεινές ακτίνες όταν προσπέσουν στο μάτι μας, περνούν τα διαφανή στοιχεία του (τον κερατοειδή, το υδατοειδές υγρό, το φακό και το υαλοειδές σώμα) που λέγονται και διαθλαστικά μέσα και τέλος συγκεντρώνονται στον αμφιβληστροειδή (ωχρά κηλίδα).

Οι ακτίνες αυτές ερεθίζουν τους φωτοανιχνευτές του ανθρώπινου οφθαλμού (κωνία και ραβδία) προκαλώντας φωτοχημικές αντιδράσεις και βιοηλεκτρικές μεταβολές οι οποίες τελικά παράγουν νευρικά σήματα που μεταφέρονται με το οπτικό νεύρο στον εγκέφαλο. Στον εγκέφαλο (στον ηνιακό βολβό αυτού) τα σήματα αυτά κατά κάποιο τρόπο "κωδικοποιούνται" και ολοκληρώνεται η όλη λειτουργία της όρασης



Σχήμα 2.1 Φυσιολογία του οφθαλμού

2.1.1.1. Η κόρη

Η διάμετρος της κόρης αλλάζει κατά κύριο λόγο, αναλόγως προς τον διάχυτο φωτισμό. 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 ανίχνευση των αντικειμένων παρά η ευκρίνεια των ειδώλων τους και η ανάλυση της εικόνας, η κόρη διαστέλλεται, για να δεχθεί ο οφθαλμός περισσότερο φως.

2.1.1.2. 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.
- Την Ωχρά Κηλίδα. Πρόκειται για 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 σε αντίθεση με τα άλλα νευρικά κύτταρα, παράγουν σήματα σε ψηφιακή (ναι-όχι) μορφή, και σήματα αναλογικά, εξαρτώμενα από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

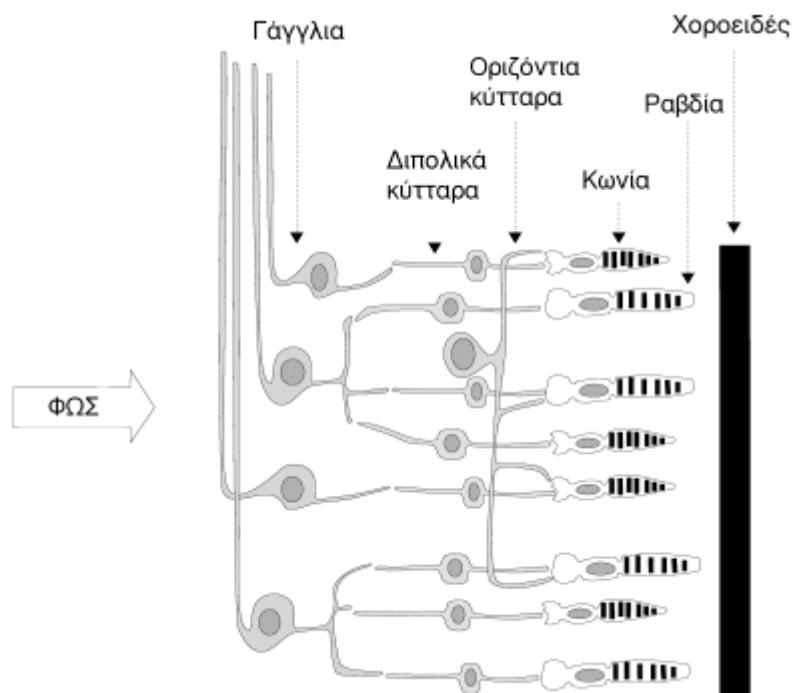
2.1.1.3. Τα φωτοευαίσθητα κύτταρα (φωτοϋποδοχείς)

Υπάρχουν δύο κατηγορίες φωτοανιχνευτών: τα Ραβδία και τα Κωνία, που έχουν παρόμοια κατασκευή αλλά είναι ευαίσθητα σε διαφορετικά επίπεδα φωτισμού^{4,5}

Τα ραβδία είναι ευαίσθητα σε πολύ χαμηλά επίπεδα φωτισμού και φθάνουν στην μέγιστη απόδοσή τους σε μέτρια επίπεδα φωτισμού. Σε μεγαλύτερα επίπεδα φωτισμού η απόδοσή τους δεν εξαρτάται από τον ίδιο το φωτισμό. Επίσης δεν

αντιλαμβάνονται χρώμα, ξεχωρίζουν μόνο μαύρο, άσπρο και αποχρώσεις του γκριζου.

Τα κωνία αντίθετα είναι πολύ λιγότερο ευαίσθητα στον χαμηλό φωτισμό, ανταποκρίνονται όμως σε υψηλά επίπεδα φωτισμού, ενώ σε αυτά δεν παρουσιάζεται το φαινόμενο του κορεσμού.



4

Σχήμα 2.2 φωτούποδοχείς

2.1.1.4. 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 κύρια, είναι η απορρόφηση που παρουσιάζει στο ορατό φάσμα

2.2 Φωτομετρία

Η φωτομετρία ασχολείται με την μέτρηση του φωτός ορίζοντας τα κατάλληλα φωτομετρικά μεγέθη. Τα φυσικά 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 άνθρωπό 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 , 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 , 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 τον 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.

2.3 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.

2.3.1 Νόμοι του Abney (προσθετικότητας)

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 Abney⁶.

Η έννοια προσθετικότητας 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 ιδιότητα⁷ σαν μία συναρτησιακή σχέση V , η οποία συνδέει την πηγή $A(\lambda)$ (το ερέθισμα) και κάποια μετρήσιμη ψυχοφυσική ιδιότητα (την ανταπόκριση). Για παράδειγμα η $V_A(\lambda)$ 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 $V_A(\lambda)=V_B(\lambda)$. Στην περιγραφή των νόμων του Abney στο εξής, χάριν απλοποίησης, θα παραλείπουμε 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) Προσθετικότητας: 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 η (4) εκφράζει την απόλυτη προσθετικότητα. Ορίζεται⁸ 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.

2.4 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 έχουν 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.

2.5 Πειραματικές μέθοδοι ^{9,10}

2.5.1 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. 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.

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

α) Κατάσταση προσαρμογής του οφθαλμού: Η τιμή του κατωφλίου 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 μπορούν να γίνουν με αρκετούς τρόπους, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι:

1) Μέθοδος της ρύθμισης

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

2) Μέθοδος των ορίων

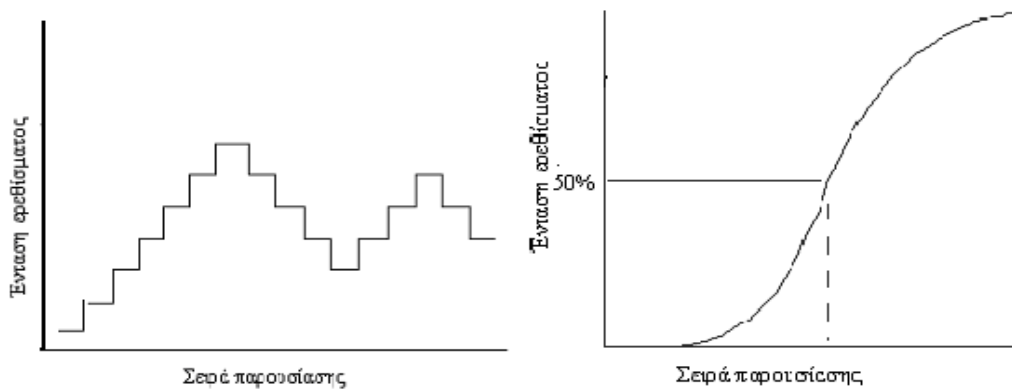
Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την παρουσίαση ενός ερεθίσματος, του οποίου η φωτεινότητα είναι αρκετά πάνω από το κατώφλι και την οποία μειώνουμε με μικρά βήματα μέχρι ο παρατηρητής, να μην μπορεί να ανιχνεύσει το ερέθισμα. Η μέθοδος αυτή λέγεται μέθοδος φθινόντων ορίων. Μέθοδος αυξανόμενων ορίων λέγεται 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

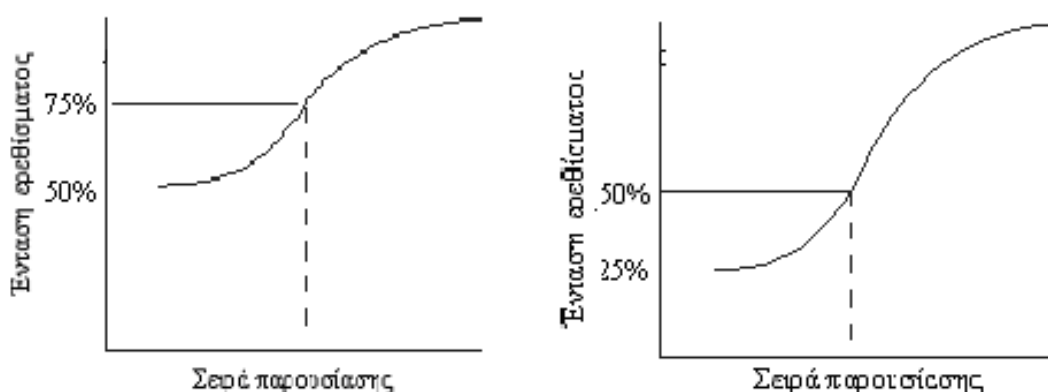
Στην μέθοδο σταθερού ερεθίσματος, το κατώφλι προσδιορίζεται προσεγγιστικά με μια άλλη μέθοδο, καθώς και η φωτεινότητα του ερεθίσματος που θα παρουσιασθεί. Αυτό το ερέθισμα παρουσιάζεται στον παρατηρητή με τυχαίο τρόπο. Η ποσόστωση της αναγνώρισης του ερεθίσματος καθορίζεται σαν συνάρτηση της φωτεινότητας. Το σχήμα 2.1 παρουσιάζει μια τέτοια γραφική παράσταση, που ονομάζεται ψυχομετρική καμπύλη και μοιάζει με S, το κατώφλι ορίζεται σαν το σημείο όπου η αναγνώριση είναι 50% (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 Ψυχομετρική καμπύλη.

Μερικές από τις ψυχοφυσικές διαδικασίες, που χρησιμοποιούνται για να ελαχιστοποιήσουν τα σφάλματα κατά τον προσδιορισμό κατωφλιού, ζητώντας από το υποκείμενο να απαντήσει σε ερωτήσεις, είναι οι παρακάτω:

- α) Διαδικασία ΝΑΙ-ΟΧΙ, ερωτάται ο παρατηρητής για την ανίχνευση ή την μη ανίχνευση του ερεθίσματος. Η σωστή απάντηση μπορεί να κυμαίνεται από 0-100%
- β) Διαδικασία υποχρεωτικής επιλογής, υποχρεώνεται ο παρατηρητής να διαλέξει ανάμεσα από εναλλακτικές επιλογές μια από τις οποίες περιέχει το ερέθισμα. Υπάρχουν οι εξής εξαναγκασμένες εναλλακτικές επιλογές (alternative forced choice =AFC), 2AFC, 4AFC, 6AFC. Κατασκευάζεται η ψυχομετρική καμπύλη και η ποσόστωση για την οποία λαμβάνεται το κατώφλι είναι 50% για την AFC, 75% για την 2AFC και 62.5% για την 4AFC (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Ψυχομετρικές καμπύλες.

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.

2.5.2 Φωτομετρία μαρμαρυγής (Flicker Photometry)

Η πρώτη αναπτυχθείσα μέθοδος και πιθανώς η πιο κοινή. 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 επιλεγεί, 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 .

2.5.3 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 γι αυτό οδηγεί σε δεδομένα με

μεγάλη διασπορά. Αυτή η απόκλιση των δεδομένων, μπορεί να αντιμετωπισθεί με την χρήση μεγάλου αριθμού παρατηρητών και με επανάληψη της κάθε σύγκρισης αρκετές φορές.

2.5.4 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. Οι παρουσιαζόμενες ακτινοβολίες διαφέρουν μόνο κατά μερικά nm. Οπότε τα χρώματα που παρουσιάζονται είναι σχεδόν ίδια. Έτσι ο παρατηρητής μπορεί να συγκεντρωθεί στην σύγκριση φωτεινοτήτων, χωρίς η διαφορά των χρωμάτων να δυσκολεύει το εγχείρημα. Οι αντίστοιχες φωτεινές ροές 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 κοντύτερα.

2.5.5 Ελαχιστοποίηση διαχωριστικού ορίου (Minimally Distinct Border)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται την παρουσίαση ενός περίπου διμερούς πεδίου σε αντιπαράθεση. Το μισό πεδίο περιέχει μια ακτινοβολία αναφοράς και το άλλο μισό φως μεταβλητού μήκους κύματος. Η προσπάθεια 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.

2.5.6 Οπτική οξύτητα (Visual Acuity)

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

Η μέτρηση επιτυγχάνεται¹¹ με την αναγνώριση ιδιαίτερων 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. 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.



Σχήμα 2.3 Σχήματα Snellen.

Η οπτική οξύτητα (OO) με την ορολογία του Snellen ορίζεται ως: 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 Καθορισμός αποστάσεων και οπτικών πεδίων.

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.

2.5.7 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.

2.5.8 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.

2.6 Φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού

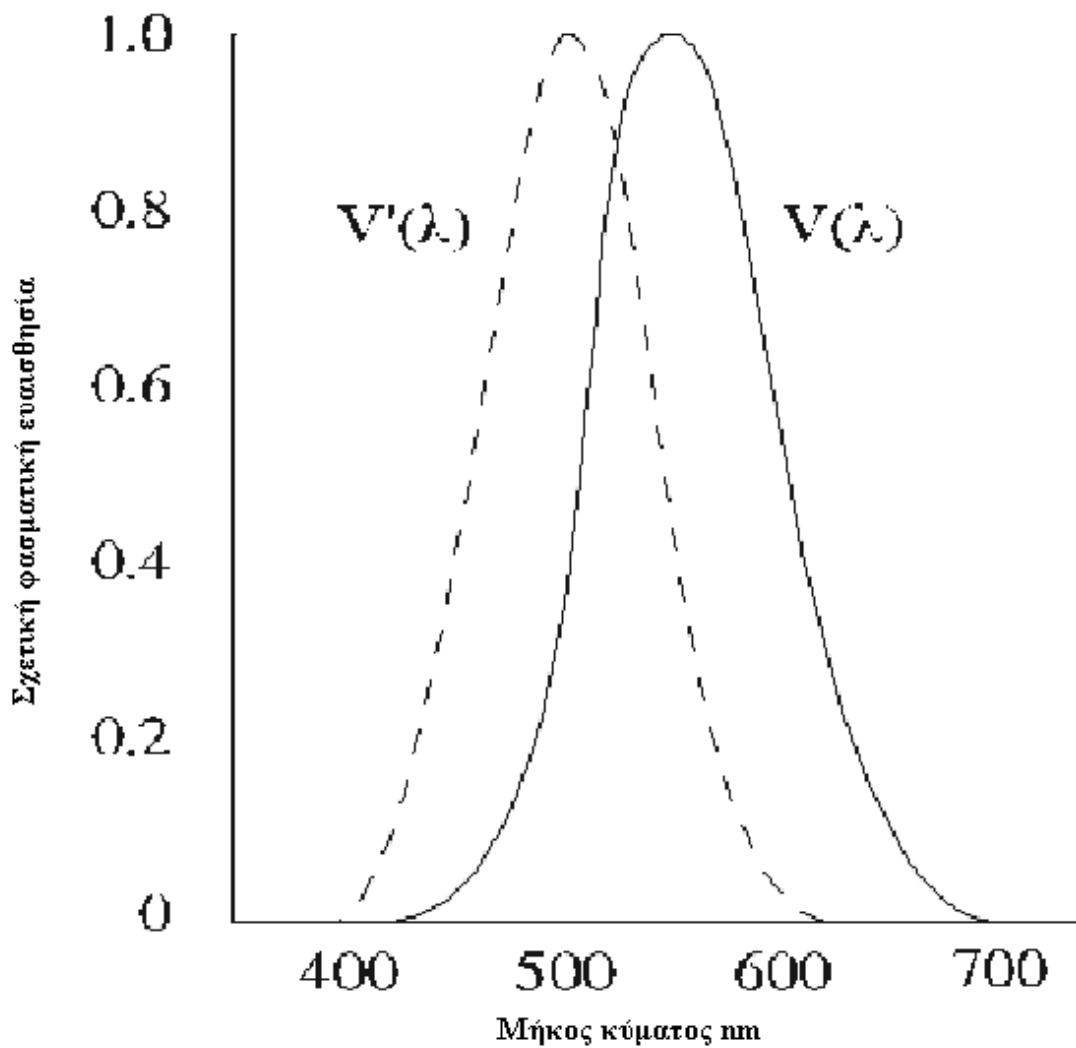
Την εξάρτηση της οπτικής ανταπόκρισης του ανθρώπινου οφθαλμού από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας, ονομάζουμε φασματική ευαισθησία. Η κύρια παράμετρος που επηρεάζει την φασματική ευαισθησία είναι η λαμπρότητα. Ονομάζουμε σχετική φασματική ευαισθησία¹² του ανθρώπινου οφθαλμού την κανονικοποιημένη φασματική ευαισθησία. Αυτή ορίζεται ως εξής :

"Η σχετική φασματική ευαισθησία του οφθαλμού (για μια μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος λ) είναι ο λόγος της 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".

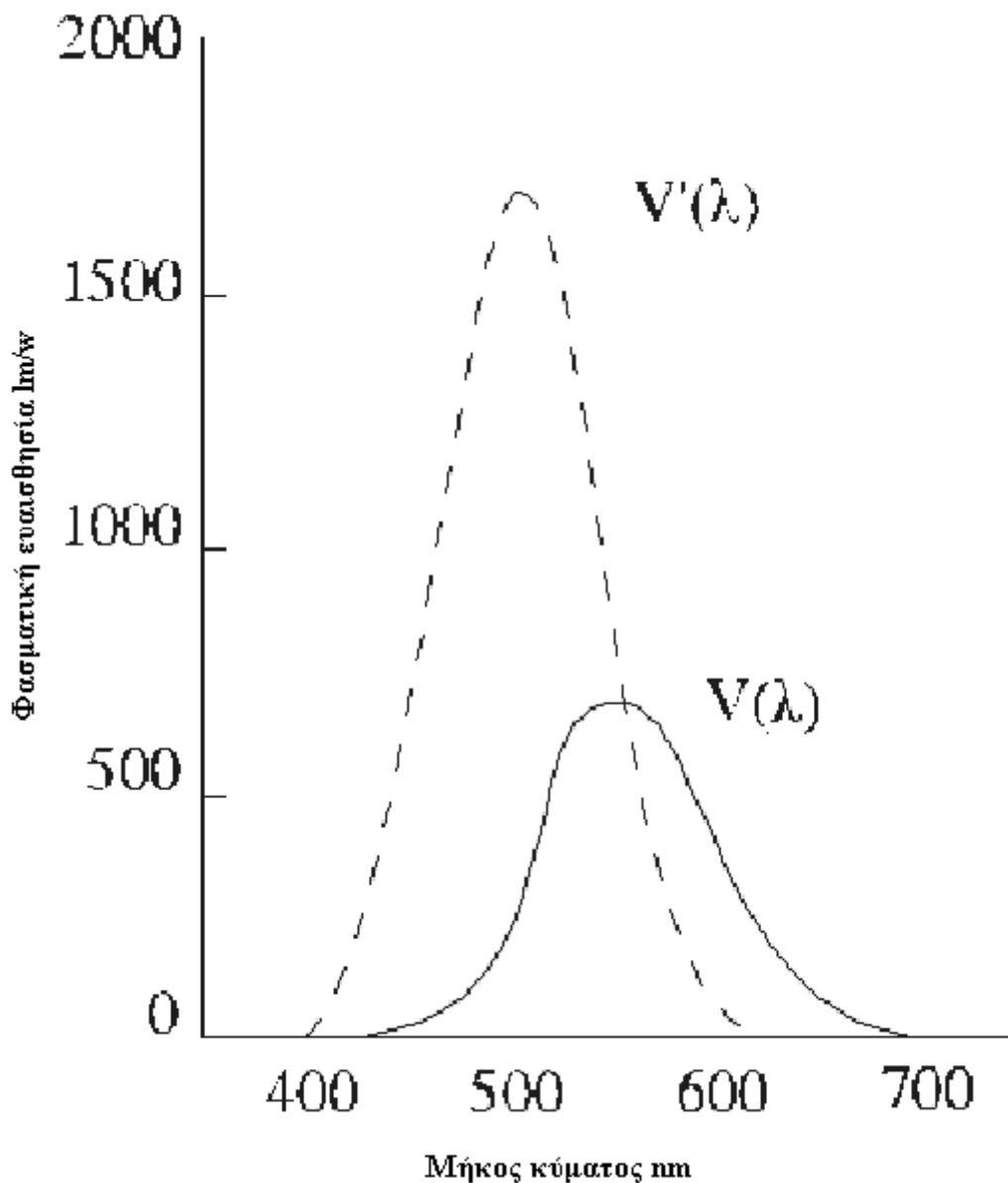
Τα πειραματικά δεδομένα, που απαιτούνται για να κατασκευαστεί η καμπύλη της σχετικής φασματικής ευαισθησίας εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους. Οι κυριότερες από αυτές είναι η επιλογή του παρατηρητή, η κατάσταση προσαρμογής του ματιού, το γωνιακό άνοιγμα της δέσμης, καθώς και η γωνιακή της θέση, η μέθοδος 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 C.I.E. εισήγαγε δυο συναρτήσεις: την $V(\lambda)$ για την φωτοπική και την $V'(\lambda)$ για την σκοτοπική όραση (σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Σχετικές φασματικές ευαισθησίες του ανθρώπινου οφθαλμού για την φωτοπική και σκοτοπική όραση.



Σχήμα.2.6 Φασματικές ευαισθησίες για την φωτοπική και σκοτοπική όραση.

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 C.I.E. το 1970 και από την C.I.P.M. το 1972¹³. 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, 2 έως 3 μοίρες, 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 CIE το 1951¹⁴ και από την CIPM το 1972. 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 1949¹⁵ και του Wald το 1945¹⁶. Οι δύο σειρές μετρήσεων έχουν γίνει με ριζικά διαφορετικούς τρόπους. Ο Crawford χρησιμοποίησε ταύτιση φωτεινότητας σε διμερές πεδίο 20° λαμπρότητας περίπου $30\mu\text{cd/m}^2$. Ο Wald αναφέρεται στα κατώφλια όρασης για ένα μικρό στόχο διαμέτρου 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 φωτεινή ροή και η λαμπρότητα μιας φωτεινής πηγής ορίζονται για την φωτοπική ή σκοτοπική περιοχή ως εξής:

Φωτοπική όραση

$$\Phi_v = Km \int_{360}^{830} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

$$L_v = Km \int_{360}^{830} L_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

όπου K_m είναι η μέγιστη φασματική ευαισθησία για την φωτοπική όραση και

Η φασματική ευαισθησία θα δίνεται από την σχέση:

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

$$\Phi'_v = K'_m \int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda$$

$$L'_v = Km \int_{380}^{780} L_{e,\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda$$

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

Η φασματική ευαισθησία θα δίνεται από την σχέση:

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

Από το σχήμα 2.6 προκύπτει ότι:

$$K_{(\lambda)} = K'_{(\lambda)} = 683 \text{ lm/W}$$

όταν το μήκος κύματος είναι 555.016 nm ή $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$.

Αυτό αποτελεί και την γενικότερη απαίτηση ενός συνεπούς φωτομετρικού συστήματος. Δηλαδή στα 555.016 nm η φασματική απόδοση του ανθρώπινου οφθαλμού να είναι 683 lm/W , λόγω του ορισμού της cd .

2.7 Προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την χρήση των $V(\lambda)$ και $V'(\lambda)$ ¹⁷

Τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την χρήση των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού είναι πολλά και οφείλονται σε πολλούς παράγοντες. 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' ότι 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 γίνουν 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.

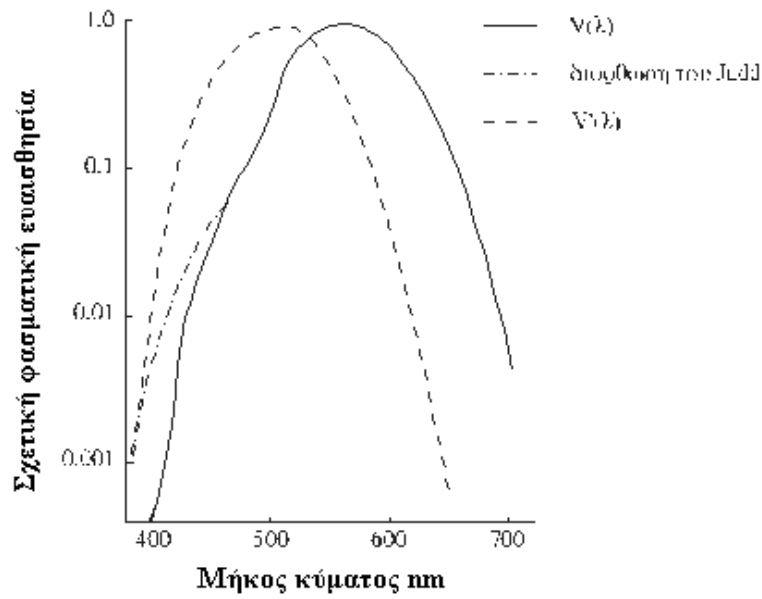
5. Η $V(\lambda)$ είναι ακριβής για ακτινοβολίες σχεδόν λευκές. Αν το φως δεν είναι σχεδόν λευκό, τότε η χρησιμοποίησή της καταλήγει σε λανθασμένα αποτελέσματα, λόγω της μη προσθετικότητας των χρωμάτων.

2.8 Διόρθωση Judd-Woss

Η καμπύλη $V(\lambda)$ δεν είναι εντελώς ακριβής¹⁸, ακόμα και για τις συνθήκες για τις οποίες κατασκευάστηκε. Στα άκρα του ορατού φάσματος, η φασματική ευαισθησία είναι μεγαλύτερη.

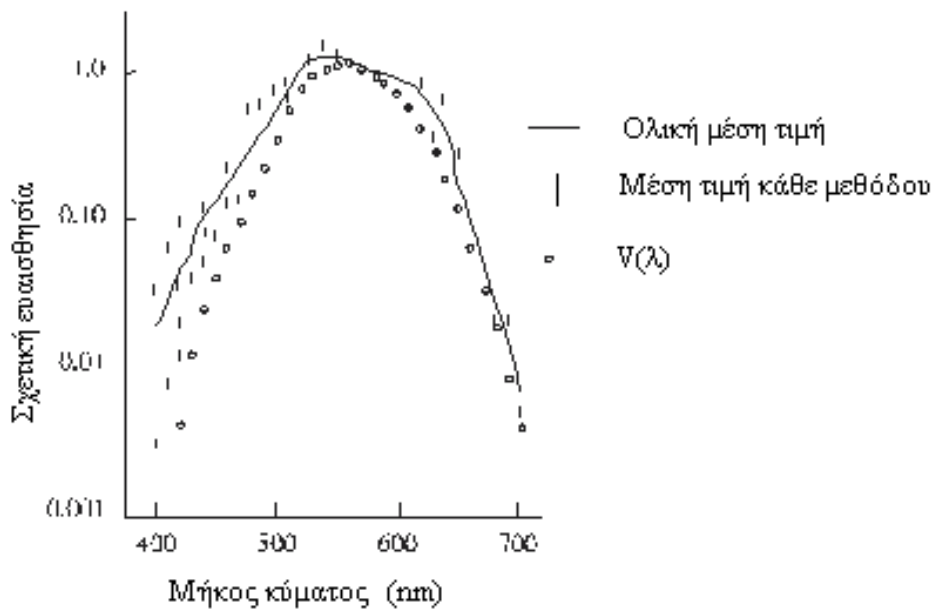
Ο Judd το 1951¹⁹ πρότεινε μια θεμελιώδη επανεξέταση της $V(\lambda)$, με σκοπό να βελτιώσει την συνάρτηση στα μικρά μήκη κύματος. Διατήρησε τις τιμές της συνάρτησης για μήκη κύματος μεγαλύτερα από τα 460nm και αύξησε τις τιμές στα μικρότερα. Ο Voss το 1978²⁰ έκανε περαιτέρω διορθώσεις.

Οι διορθώσεις αυτές έγιναν αποδεκτές από την διεθνή επιτροπή φωτισμού και έτσι κατασκευάστηκε η Judd-Voss 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.

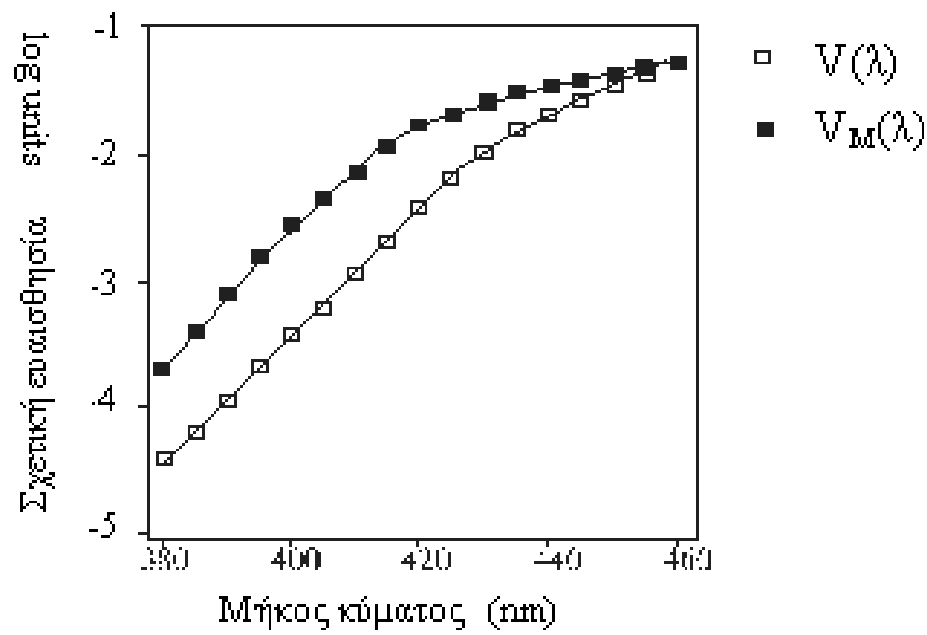


Σχήμα 2.7 Καμπύλες φασματικής ευαισθησίας.

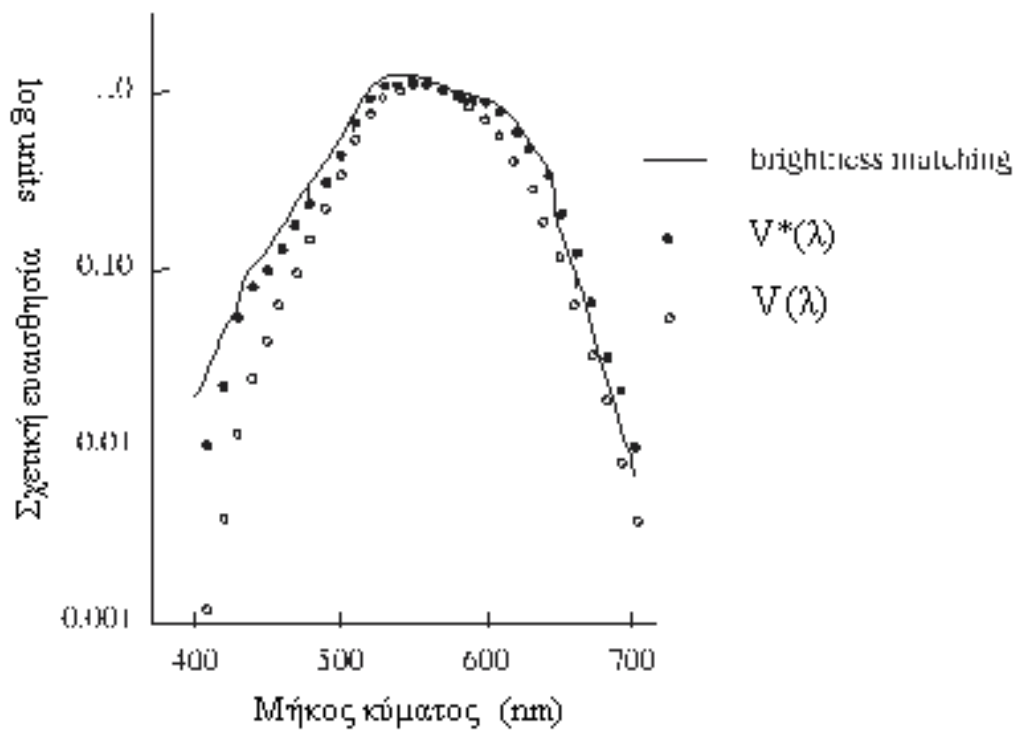
Τα παρακάτω σχήματα 2.8, 2.9 και 2.10²¹ δείχνουν την εξάρτηση της καμπύλης φασματικής ευαισθησίας από την ακολουθούμενη πειραματική μέθοδο.



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



Σχήμα 2.9 Σύγκριση $V(\lambda)$ με την τροποποιημένη $V_M(\lambda)$.



Σχήμα 2.10 Σύγκριση πειραματικών μεθόδων.

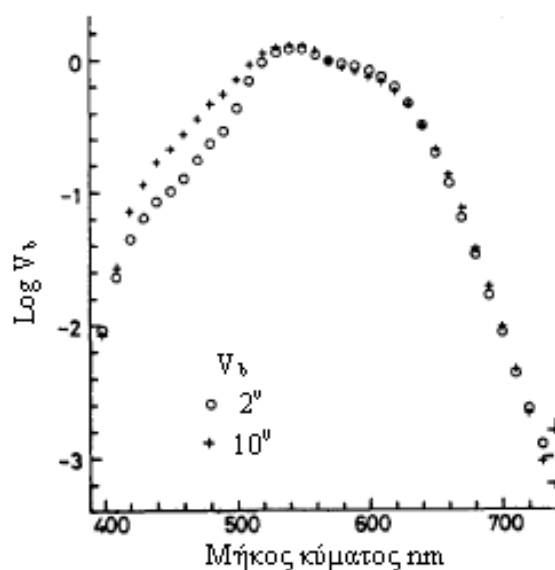
2.9 Άλλες καμπύλες σχετικής φασματικής ευαισθησίας

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 μεγάλες τιμές εύρους του οπτικού πεδίου. Οι περιορισμοί που υπόκειται η χρήση της είναι ίδιοι με αυτούς της $V_b(\lambda)$. Στο σχήμα 2.11 παριστάνονται οι δύο αυτές καμπύλες.



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

Το 1964 η CIE²² εισήγαγε ένα χρωματομετρικό σύστημα ευρέως πεδίου. Στο σύστημα αυτό η $Y_{10}(\lambda)$ κατασκευάστηκε με την χρήση μετρήσεων λαμπρότητας. Αυτή η συνάρτηση μπορεί να θεωρηθεί συμπληρωματική της $V(\lambda)$ κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες, δηλαδή για εύρη πεδίου μεγαλύτερα από 4^0 και για φωτοπικά επίπεδα λαμπρότητας.

Πρέπει βέβαια να υπογραμμίσουμε ότι και αυτή η συνάρτηση έχει τα ίδια εγγενή προβλήματα με την $V(\lambda)$. Επίσης, αν η λαμπρότητα υπολογισθεί με την βοήθεια της $Y_{10}(\lambda)$, η φωτεινότητα δεν θα μπορεί να υπολογισθεί με ακρίβεια.

3. Η καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας στη φωτοπική όραση

3.1. Εισαγωγή

Σε αυτήν την ενότητα θα αναλυθούν οι έρευνες των W.Coblentz και W.Emerson, των K.Gibson και E.Tyndall και του L.Thomson, στις οποίες βασίστηκε η CIE για να προτείνει την $V(\lambda)$. Θα γίνει περιγραφή της μεθόδου και της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε έρευνα, των συνθηκών υπό τις οποίες διεξήχθη και τέλος θα πραγματοποιηθεί μια σύγκριση μεταξύ των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας που προέκυψαν από αυτές τις έρευνες και της $V(\lambda)$.

3.2 Coblentz - Emerson²³

3.2.1 Εισαγωγή

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με βασικό στόχο να διαχωριστούν οι έννοιες «φως» και «ενέργεια ακτινοβολίας», δηλαδή η σχετική ορατότητα ακτινοβολίας στα διάφορα τμήματα του φάσματος. Επειδή σε προηγούμενες έρευνες υπήρξαν αρκετές διαφωνίες σχετικά με τις μετρήσεις της ακτινοβολίας, στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός από το Διεθνές γραφείο μέτρων και σταθμών και έλαβαν μέρος πολλοί έμπειροι ερευνητές. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η φωτομετρία μαρμαρυγής ενώ δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη σχετική ευαισθησία του οφθαλμού στα διάφορα μήκη κύματος, χωρίς όμως να γίνει ανάλυση της χρωματικής αντίληψης

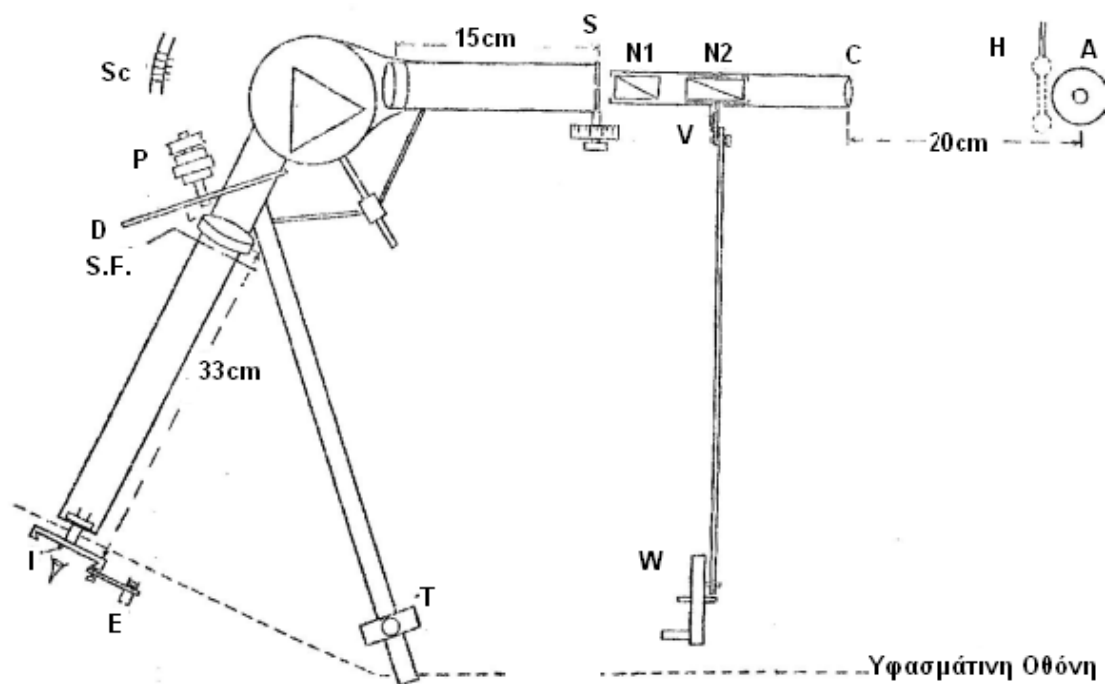
3.2.2 Διάταξη

Οι φακοί και το φασματόμετρο ρυθμίστηκαν κατάλληλα ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο παρασιτικός φωτισμός. Το πρίσμα της διάταξης ήταν κατασκευασμένο από κρύσταλλο ο οποίος έδιδε φάσμα πλάτους 14mm ανάμεσα στα 0.667nm και στα 0.447nm. Οι επιφάνειες είχαν γυαλιστεί ώστε να μειωθεί και εκεί ο

παράσιτος φωτισμός. Ως πηγές λευκού φωτός χρησιμοποιήθηκαν λαμπτήρες βολφραμίου 7,848Cd, 15,696Cd και 37,2Cd που λειτουργούσαν στα 1.2W/Cd. Στις περισσότερες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν λαμπτήρες των 7,848Cd ενώ ανά τακτά διαστήματα μετρούνταν η ισχύς τους χρησιμοποιώντας ένα τμήμα του φάσματος ως αναφορά. Φυσικά, σημαντικότερο ρόλο έπαιζε το σταθερό ρεύμα από το οποίο διαρρέονταν η λυχνία και όχι τόσο η ισχύς. Για τη φασματική ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκε η κυλινδρική φλόγα ακετυλενίου A, με υψηλή και ταυτόχρονα σταθερή ένταση, της οποίας ο προσδιορισμός ήταν αρκετά εύκολος. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί λυχνία βολφραμίου, που καθιστούσε δυσκολότερο τον προσδιορισμό της ενέργειας και απαιτούσε συχνότερη σταθεροποίηση ως προς την ισχύ της.

Η ενέργεια στη συγκεκριμένη διάταξη προσδιορίζονταν ως εξής: Η φλόγα τοποθετούνταν στο σημείο S, ενώ το συνολικό φάσμα μετρούνταν με μια θερμοστήλη τοποθετημένη στο σημείο I. Έτσι υπολογίζονταν η το ποσό της ενέργειας που εξερχόταν από τα πρίσματα και που συνεπώς κατέληγε στο μάτι. Όπου κρίνονταν απαραίτητο, πραγματοποιούνταν μικρές διορθώσεις, καθώς εμφανίζονταν απώλειες οφειλόμενες κυρίως σε ανακλάσεις στα πρίσματα Nicol και στους φακούς.

Το πεδίο 2° του φωτόμετρου ρυθμίστηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο παράσιτος φωτισμός που προέρχονταν από τους φακούς και τα πρίσματα.



Σχήμα 3.1 – Διάταξη για τις μετρήσεις της ορατότητας της ακτινοβολίας

3.2.3 Μέθοδος παρατήρησης

Εφαρμόστηκε η μέθοδος της μαρμαρυγής ως εξής: Ο παρατηρητής περιέστρεφε τα πρίσματα Nicol και ρύθμιζε την ταχύτητα του κινητήρα του τομέα ώστε να μην παρουσιάζεται μαρμαρυγή. Σε κάθε μέτρηση καταγράφονταν οι τιμές του φασματοφωτόμετρου και του φωτόμετρου. Για να μην παρουσιαστούν διαφορές στον τρόπο μέτρησης, ο δίσκος D είχε τοποθετηθεί οριζόντια στο πεδίο. Καθ' αυτόν τον τρόπο, το μισό πεδίο φωτιζόταν από την πρότυπη λυχνία T, ενώ το άλλο μισό φωτιζόταν με φως συγκεκριμένου χρώματος.

3.2.4 Αποτελέσματα

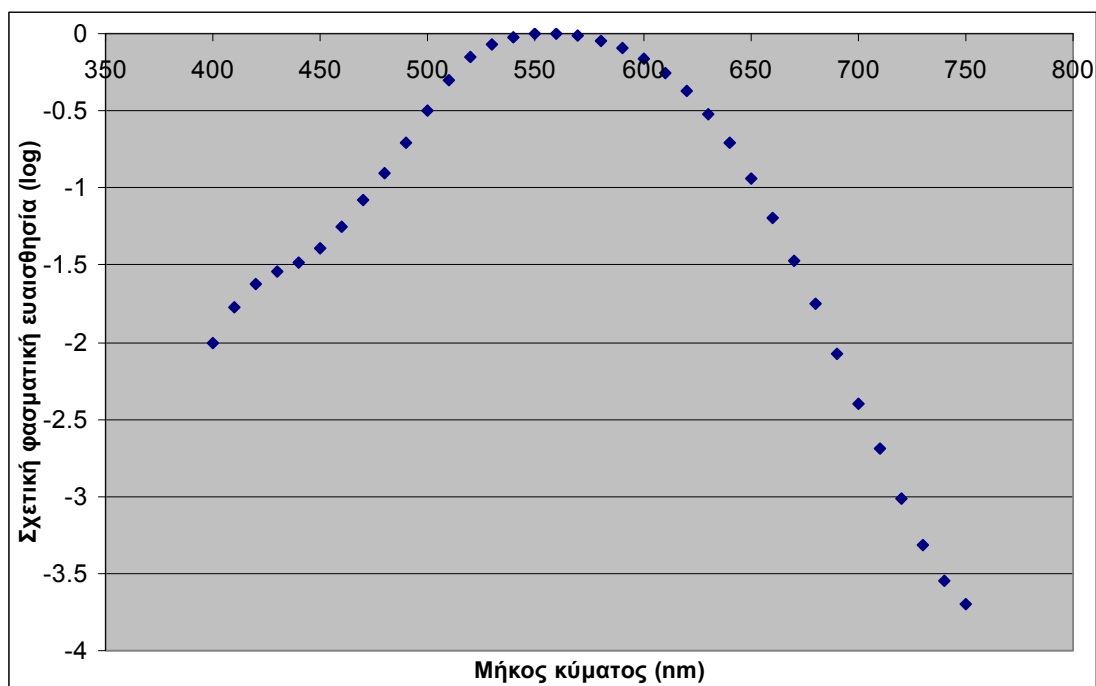
Οι καμπύλες φασματικής ευαισθησίας όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις στο συγκεκριμένο πείραμα, χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- Καμπύλες μεγάλου πλάτους με μέγιστη μετατόπιση προς το κόκκινο
- Καμπύλες μικρού πλάτους με οξύ μέγιστο στο πράσινο
- Καμπύλες με μέγιστη μετατόπιση προς το μοβ,
- Μια κατηγορία καμπύλων μεγάλου πλάτους που προέρχεται από συνδυασμό των παραπάνω κατηγοριών.
- Μια κατηγορία που συνδυάζει μια μέση ευαισθησία στο κίτρινο και το κόκκινο, αλλά παρουσιάζει μικρή ευαισθησία στο μπλε.
- Τέλος, καμπύλες με μια μέση ευαισθησία στο μπλε, αλλά μικρότερη ευαισθησία στο κίτρινο ή στο κόκκινο, ή σε ολόκληρο το φάσμα.

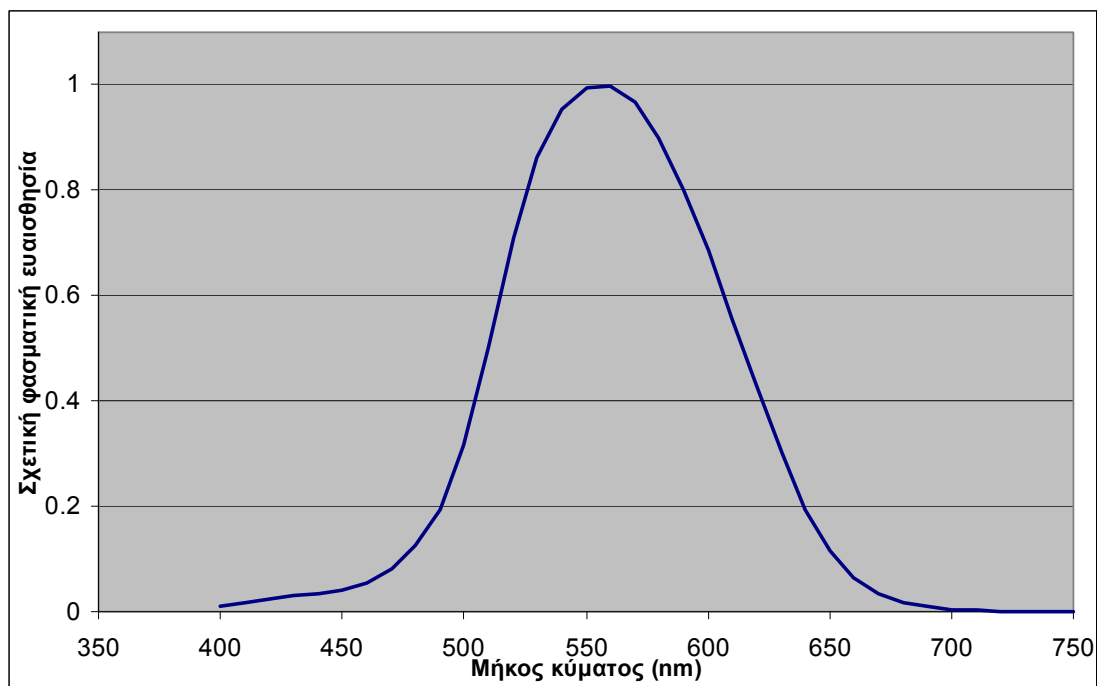
Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων για τους 125 παρατηρητές παρατίθεται στον πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1 - Coblantz - Emerson - Σχετική φασματική ευαισθησία

Μήκος κύματος (nm)	Ευαισθησία	Ευαισθησία (log)	Μήκος κύματος (nm)	Ευαισθησία	Ευαισθησία (log)
400	0.01	-2	580	0.898	-0.04672
410	0.017	-1.76955	590	0.8	-0.09691
420	0.024	-1.61979	600	0.687	-0.16304
430	0.029	-1.5376	610	0.557	-0.25414
440	0.033	-1.48149	620	0.427	-0.36957
450	0.041	-1.38722	630	0.302	-0.51999
460	0.056	-1.25181	640	0.194	-0.7122
470	0.083	-1.08092	650	0.115	-0.9393
480	0.125	-0.90309	660	0.0645	-1.19044
490	0.194	-0.7122	670	0.0338	-1.47108
500	0.316	-0.50031	680	0.0178	-1.74958
510	0.503	-0.29843	690	0.0085	-2.07058
520	0.71	-0.14874	700	0.004	-2.39794
530	0.862	-0.06449	710	0.00203	-2.6925
540	0.954	-0.02045	720	0.00097	-3.01323
550	0.994	-0.00261	730	0.00048	-3.31876
560	0.998	-0.00087	740	0.00028	-3.55284
570	0.968	-0.01412	750	0.0002	-3.69897



Σχήμα 3.2 - Coblantz - Emerson - Σχετική φασματική ευαισθησία (log)



Σχήμα 3.3 - Coblentz - Emerson - Σχετική φασματική ευαισθησία

3.3 Gibson & Tyndall²⁴

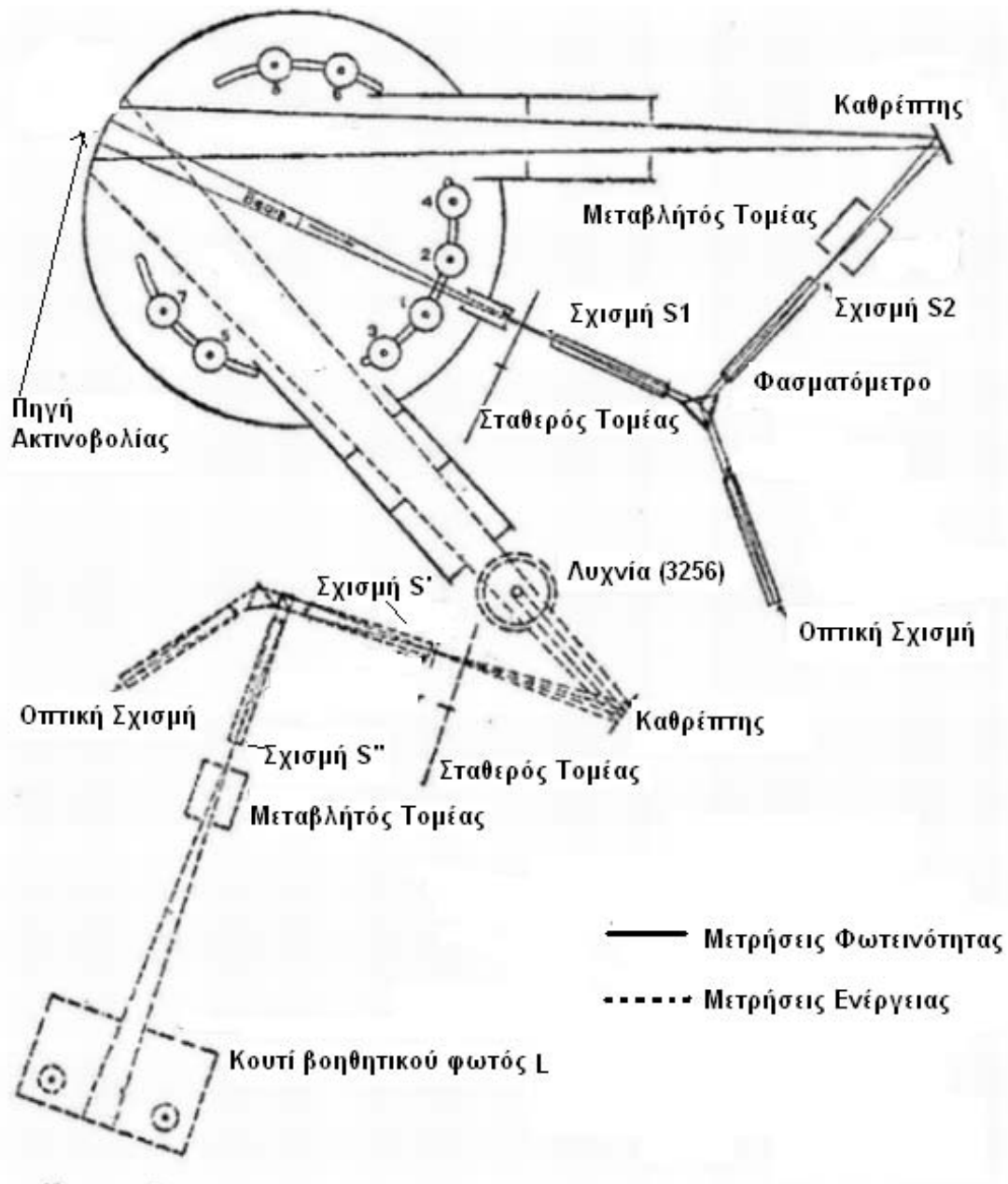
3.3.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί η έρευνα των K.Gibson και T.Tyndall, η οποία βασίστηκε στην step by step μέθοδο και όχι στην πιο διαδεδομένη μέθοδο της μαρμαρυγής ή της equality-of-brightness, όπως συνηθίζονταν από άλλους ερευνητές. Αυτό έγινε διότι παρουσιάζονταν σημαντικές διαφορές στις μετρήσεις άλλων ερευνητών, αλλά και επειδή δεν ήταν εύκολα συγκρίσιμες οι τιμές που είχαν προκύψει με διαφορετικές μεθόδους παρατήρησης από άλλα πειράματα.

3.3.2 Διάταξη

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι συνεχείς γραμμές αντιπροσωπεύουν τις μετρήσεις φωτεινότητας, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν την ενέργεια της ακτινοβολίας. Η φωτεινότητα μετρήθηκε με το φασματόμετρο Base, ενώ η ενέργεια με το ραδιόμετρο Lummmmer-Brodhum. Το φως προερχόταν από διάχυση στο εσωτερικό τοίχωμα του κουτιού L και οι διαφορές στο φωτομετρικό πεδίο του κάθε οργάνου μετρήθηκαν με τον μεταβλητό τομέα που αποτελούνταν από δύο

γυάλινους περιστρεφόμενους ρόμβους και από ένα ενδιάμεσο διάφραγμα με ρυθμιζόμενη γωνία. Συνεπώς, η ενέργεια της πηγής, η εκπομπή του φασματομέτρου και ο προσδιορισμός του παράπλευρου φωτός γινόταν μέσω αυτού του τομέα.



Σχήμα 3.4 – Διάταξη των Gibson & Tyndall για μετρήσεις ενέργειας και φωτεινότητας

3.3.3 Ενεργειακές μετρήσεις

Γενικά, για την μέτρηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας χρησιμοποιούταν μια πρότυπη λυχνία πυρακτώσεως αερίου (gas-filled) 500W που λειτουργούσε υπό τάση 118V, φωτεινή απόδοση 15.75 lm/W και σχετική φασματική ενέργεια η οποία

είχε προσδιοριστεί ραδιομετρικά το 1917. Η θερμοκρασία χρώματος της λυχνίας ήταν 2848K. Ως συμπληρωματικές πρότυπες λυχνίες χρησιμοποιήθηκαν άλλες τέσσερις ίδιου τύπου, με αντίστοιχα προσδιορισμένες τάσεις λειτουργίας και ενέργειες.

Η ακτινοβολούμενη ενέργεια που προερχόταν από το βοηθητικό κουτί L, μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ως αναφορά μία από τις παραπάνω λυχνίες.

Εφόσον ήταν πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε πόση ενέργεια εξέρχεται από την οπτική σχισμή του φασματομέτρου, οι τιμές της σχετικής ενέργειας που εξερχόταν από το εσωτερικό του κουτιού έπρεπε να πολλαπλασιασθεί σε κάθε μήκος κύματος με dI/ds και με τη φασματική εκπομπή του οργάνου. Το αποτέλεσμα ήταν μια θερμοκρασία χρώματος στους 2077K, τιμή που πλησιάζει αρκετά αυτήν ενός λαμπτήρα άνθρακα.

3.3.4 Μέθοδος παρατήρησης

Σε αντίθεση με τις άλλες έρευνες, εδώ εφαρμόστηκε η βήμα-προς βήμα ταύτιση φωτεινότητας. Αρχικά, έγινε ο προσδιορισμός του βήματος ελαχιστοποιώντας τις διαφορές στις χρωματικές αποχρώσεις καθώς και τα σφάλματα κατά την παρατήρηση και τους υπολογισμούς. Λόγω της υψηλής ευαισθησίας που παρουσιάζει το ανθρώπινο μάτι με μικρή μεταβολή του μήκους κύματος, ιδιαίτερα στο διάστημα 490-580 nm, ακόμα και σφάλματα της τάξης του 1nm είναι αντιληπτά. Τελικά, η τιμή του βήματος που λήφθηκε ήταν 0.375nm.

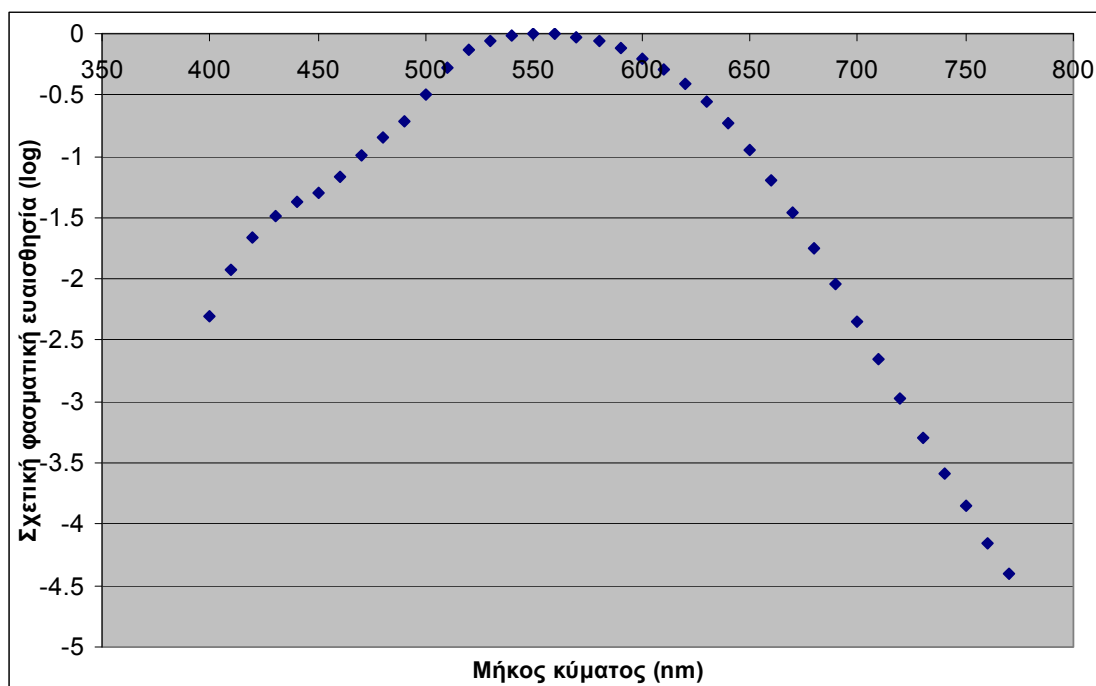
Η διαδικασία των μετρήσεων χωρίστηκε σε δύο μέρη, το πρώτο περιλάμβανε μετρήσεις από 510 ως 660nm που ήταν και η «κεντρική περιοχή», ενώ το δεύτερο από 510 nm ως 430 nm και από 660 nm ως 740 nm, που ήταν οι «περιοχές του τέλους». Κάθε πλήρης σειρά μετρήσεων γινόταν δύο φορές, η μία με σταδιακή αύξηση του μήκους κύματος και η άλλη με σταδιακή μείωσή του.

3.3.5 Αποτελέσματα

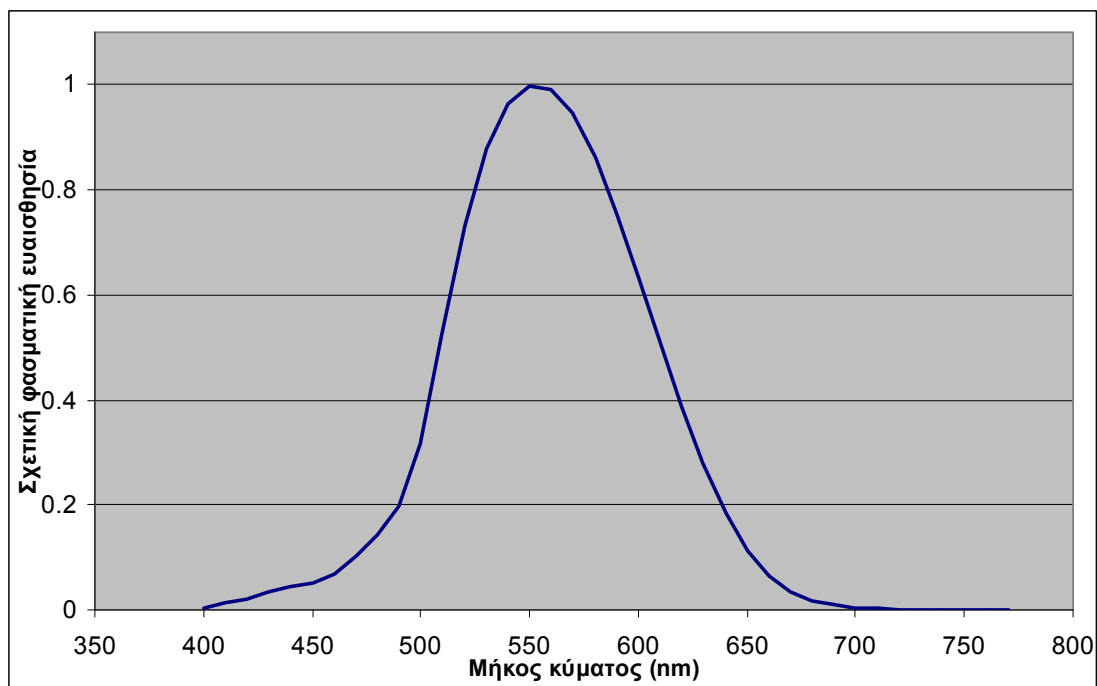
Οι τιμές που παρατίθενται στον Πίνακα, αποτελούν τον μέσο όρο των τιμών που αντιστοιχούν σε παρατηρητές οι οποίοι δεν παρουσίασαν μεγάλες διακυμάνσεις ως προς την ευαισθησία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, πολλαπλασιασμένων επί ένα συντελεστή βαρύτητας ίσο με δύο και των τιμών των παρατηρητών στους οποίους παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες διαφορές στην ευαισθησία από μέρα σε μέρα πολλαπλασιασμένων επί ένα συντελεστή βαρύτητας ίσο με ένα.

Πίνακας 3.2 - Gibson & Tyndall - Σχετική φασματική ευαισθησία

Μήκος κύματος (nm)	Ευαισθησία	Ευαισθησία (log)	Μήκος κύματος (nm)	Ευαισθησία	Ευαισθησία (log)
400	0.005	-2.301	590	0.754	-0.123
410	0.012	-1.921	600	0.634	-0.198
420	0.022	-1.658	610	0.511	-0.292
430	0.033	-1.481	620	0.389	-0.41
440	0.043	-1.367	630	0.279	-0.554
450	0.051	-1.292	640	0.184	-0.735
460	0.069	-1.161	650	0.113	-0.949
470	0.103	-0.987	660	0.064	-1.192
480	0.143	-0.845	670	0.035	-1.457
490	0.196	-0.708	680	0.018	-1.75
500	0.318	-0.498	690	0.009	-2.036
510	0.523	-0.281	700	0.005	-2.347
520	0.732	-0.135	710	0.002	-2.658
530	0.878	-0.057	720	0.001	-2.967
540	0.964	-0.016	730	5E-04	-3.292
550	0.998	-9E-04	740	3E-04	-3.585
560	0.991	-0.004	750	1E-04	-3.854
570	0.947	-0.024	760	7E-05	-4.155
580	0.863	-0.064	770	4E-05	-4.398



Σχήμα 3.5 - Gibson & Tyndall - Σχετική φασματική ευαισθησία (log)



Σχήμα 3.6 - Gibson & Tyndall – Σχετική φασματική ευαισθησία

3.4 L.C.Thomson²⁵

3.3.1. Εισαγωγή

Οι ανωμαλίες που παρατηρήθηκαν στο σχήμα της φωτοπικής καμπύλης ευαισθησίας όπως είχε προκύψει από άλλους ερευνητές, καθώς και στις αντίστοιχες καμπύλες των Gibson και Tyndall (1923-24) και πιο συγκεκριμένα, οι ακμές στα 440 nm και στα 470 nm, οδήγησαν σε μια ακόμη προσέγγιση της καμπύλης της φωτοπικής όρασης.

3.3.2 Μέθοδος

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι η μέθοδος της μαρμαρυγής (flicker). Από 490 έως 680 nm, η λαμπρότητα ήταν 82 cd/m^2 . Στα μικρά μήκη κύματος (410-470nm) έγινε ταύτιση φωτεινότητας με μέτρο σύγκρισης τα 440 nm και λαμπρότητα $0,205 \text{ cd/m}^2$. Αντίστοιχα και στα μεγάλα μήκη κύματος (670-700nm), αλλά με σύγκριση τα 670nm και λαμπρότητα $18,7 \text{ cd/m}^2$.

3.3.3 Διάταξη

Οι μετρήσεις έγιναν με το χρωματόμετρο (colorimeter) του Wright, σε τετράγωνο πεδίο το οποίο σχημάτιζε γωνία $1^{\circ}20'$ με τον οφθαλμό του παρατηρητή. Το τετράγωνο ήταν διαχωρισμένο οριζόντια σε δύο ίσα τμήματα: το υπό εξέταση άνω τμήμα και το κάτω τμήμα για την σύγκριση. Το κάθε τμήμα τροφοδοτούνταν αυτόνομα από μονοχρωματικό ή λευκό φως οποιασδήποτε έντασης. Το υπόλοιπο πεδίο δεν φωτιζόταν και η παρατήρηση του άνω τμήματος γινόταν μέσω τεχνητής κόρης. Το λευκό φως προερχόταν από μια λάμπα βολφραμίου. Γενικά, η διάταξη έμοιαζε πολύ με αυτήν του Wright (1946) με την προσθήκη χρωματικών φακών

3.3.4 Φυσικές μετρήσεις

Το μήκος κύματος του μονοχρωματικού φωτός που περνούσε από την κόρη εξόδου του χρωματόμετρου, προσδιοριζόταν με μια λυχνία βολταϊκού τόξου υδραργύρου και φλόγα λιθίου (lithium flame)

Η ένταση του μονοχρωματικού φωτός ρυθμιζόταν με ένα φυσικό πρίσμα καθώς και με κάποια φίλτρα, ενώ για την ρύθμιση αυτών χρησιμοποιήθηκε ένα φωτοκύτταρο R.C.A 931a. Η ευαισθησία του φωτοκυτταρου σε κάθε μήκος κύματος, είχε προσδιορισθεί στο Εθνικό Φυσικό Εργαστήριο (N.P.L.). Θεωρώντας ως αναφορά τα 520nm, με τη βοήθεια του λόγου μήκους κύματος προς ένταση, υπολογίστηκε ακριβώς το επίπεδο της έντασης. Ανάλογα υπολογίστηκε και η ενέργεια σε κάθε μήκος κύματος.

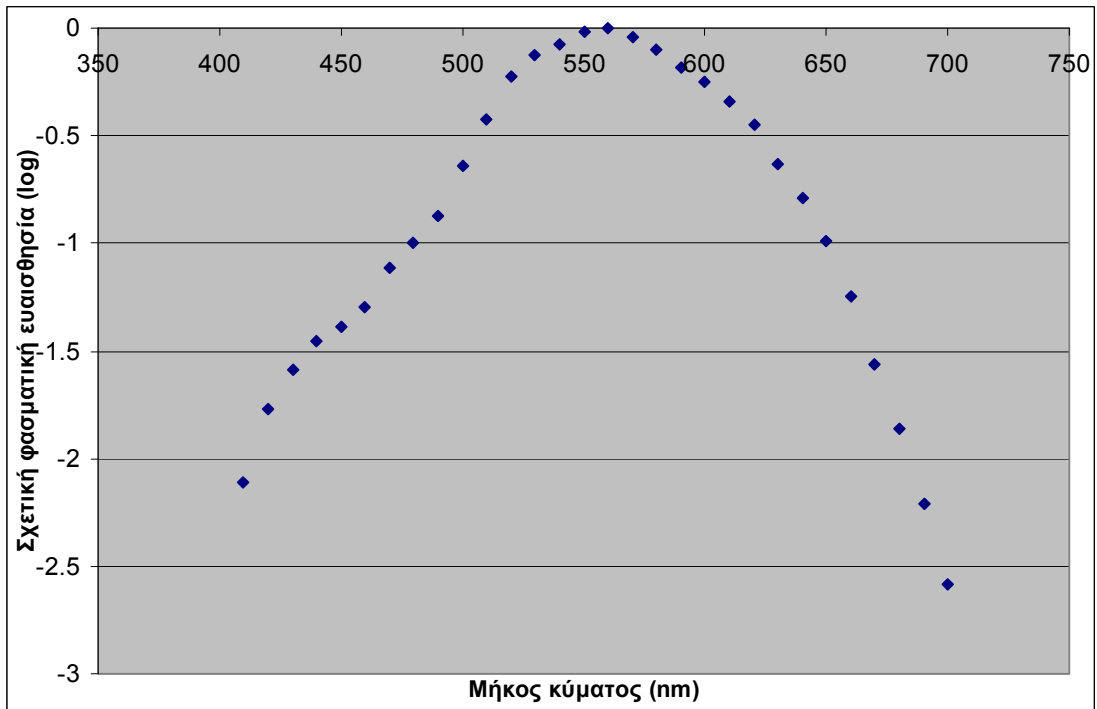
Η φασματική ακτινοβολία στα 520nm που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά ταυτίστηκε με τη μέθοδο της μαρμαρυγής με λευκό φως συγκεκριμένης έντασης.

3.3.5 Αποτελέσματα

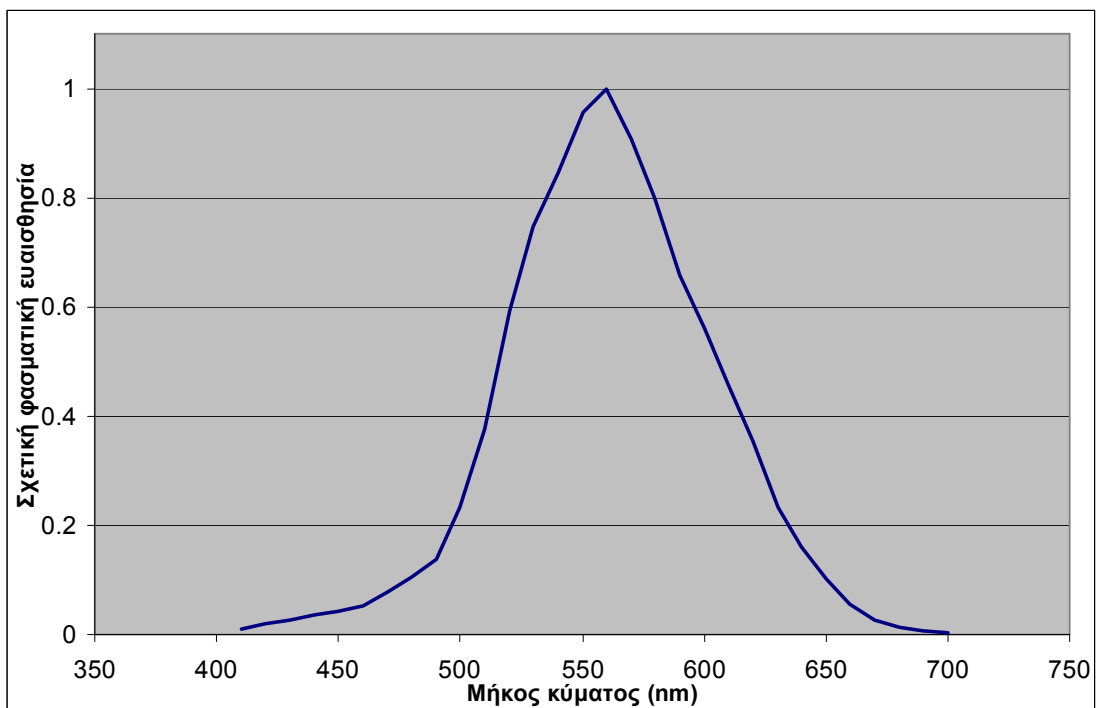
Στον πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και για τους δύο παρατηρητές L.C.T και W.D.W σε λογαριθμική και σε κανονική μορφή, οι μέσοι όροι και πληροφορίες για την φωτεινότητα υπό την οποία διεξήχθη κάθε μέτρηση. Η κάθε τιμή αποτελεί τον μέσο όρο από τις τρεις μετρήσεις που γίνονταν σε κάθε μήκος κύματος. Είναι προφανές ότι στα 440 και στα 470nm εμφανίζονται κάποιες ανωμαλίες και πιο συγκεκριμένα, μια τοπική αύξηση στη σχετική ευαισθησία.

Πίνακας 3.3 - Thomson - Σχετική φασματική ευαισθησία

Μήκος κύματος (nm)	L.C.T		W.D.W.		M.O.	M.O. (log)
	0.21 cd/m ²	8.5 cd/m ²	0.21 cd/m ²	8.5 cd/m ²		
410	-0.35		0.122		0.004467	-2.114
420	0.067		0.389		0.011668	-1.772
430	0.302		0.52		0.020045	-1.589
440	0.414		0.679		0.025942	-1.4535
450	0.495		0.725	0.729	0.031261	-1.39
460	0.602	0.611	0.812	0.808	0.039994	-1.293
470	0.779	0.77	22 cd/m²	0.995	0.060117	-1.113
480	82 cd/m²	0.899	1.112	1.123	0.07925	-0.9945
490	1.023	1.039	1.237	1.225	0.105439	-0.87
500	1.29	1.273	1.429		0.194984	-0.6405
510	1.526		1.621		0.335738	-0.4265
520	1.756		1.79		0.570164	-0.227
530	1.866		1.881		0.734514	-0.1265
540	1.913		1.939		0.818465	-0.074
550	1.972		1.988		0.937562	-0.02
560	2		2		1	0
570	1.951		1.965		0.893305	-0.042
580	1.89		1.913		0.776247	-0.0985
590	1.822		1.815		0.663743	-0.1815
600	1.745		1.749		0.555904	-0.253
610	1.663		1.659		0.460257	-0.339
620	1.552		1.546		0.356451	-0.451
630	1.377		1.355		0.238232	-0.634
640	1.209		1.204		0.161808	-0.7935
650	1.032		0.982	18.73 c/m²	0.107647	-0.993
660	0.753	17.86 cd/m²	0.747	0.733	0.056624	-1.25
670	0.465	0.462	0.418	0.432	0.029174	-1.5585
680	0.159	0.162		0.114	0.014421	-1.8635
690		-1.837		-1.743	0.006871	-2.21
700		1.461		-1.373	0.002891	-2.583



Σχήμα 3.7 – Thomson - Σχετική φασματική ευαισθησία (log)

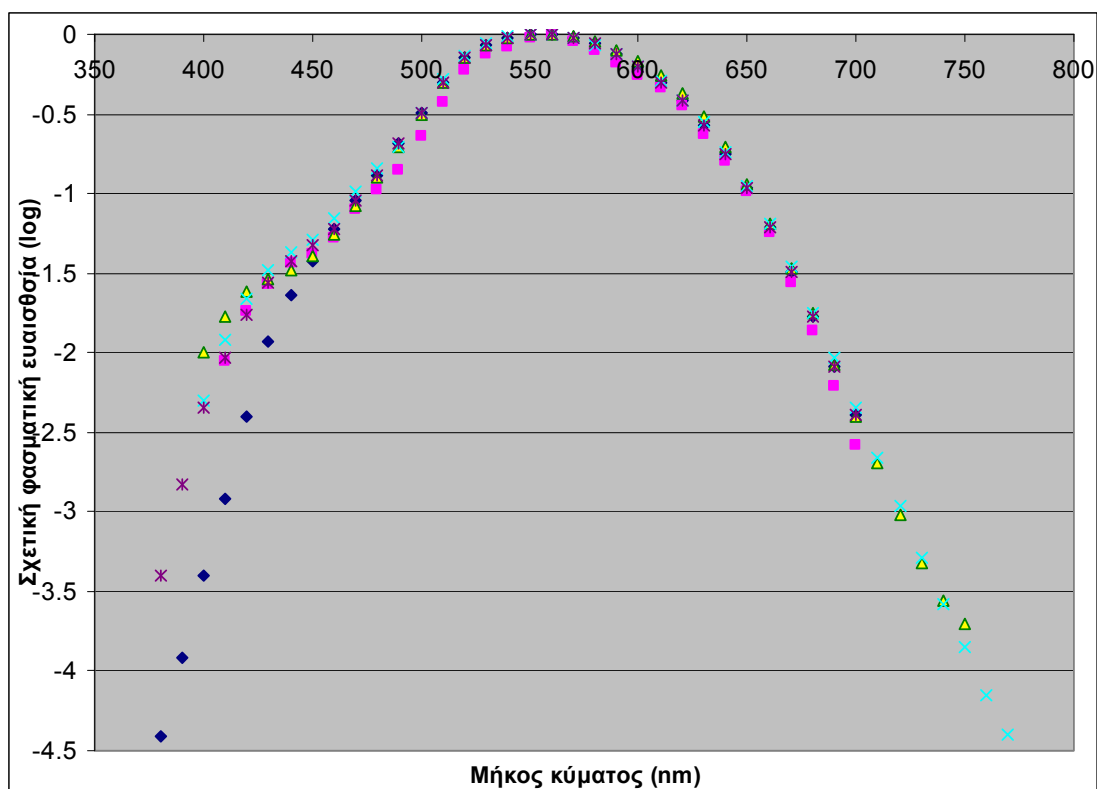


Σχήμα 3.8 – Thomson - Σχετική φασματική ευαισθησία

3.4. Σύγκριση των αποτελεσμάτων και ποσοστιαίες αποκλίσεις

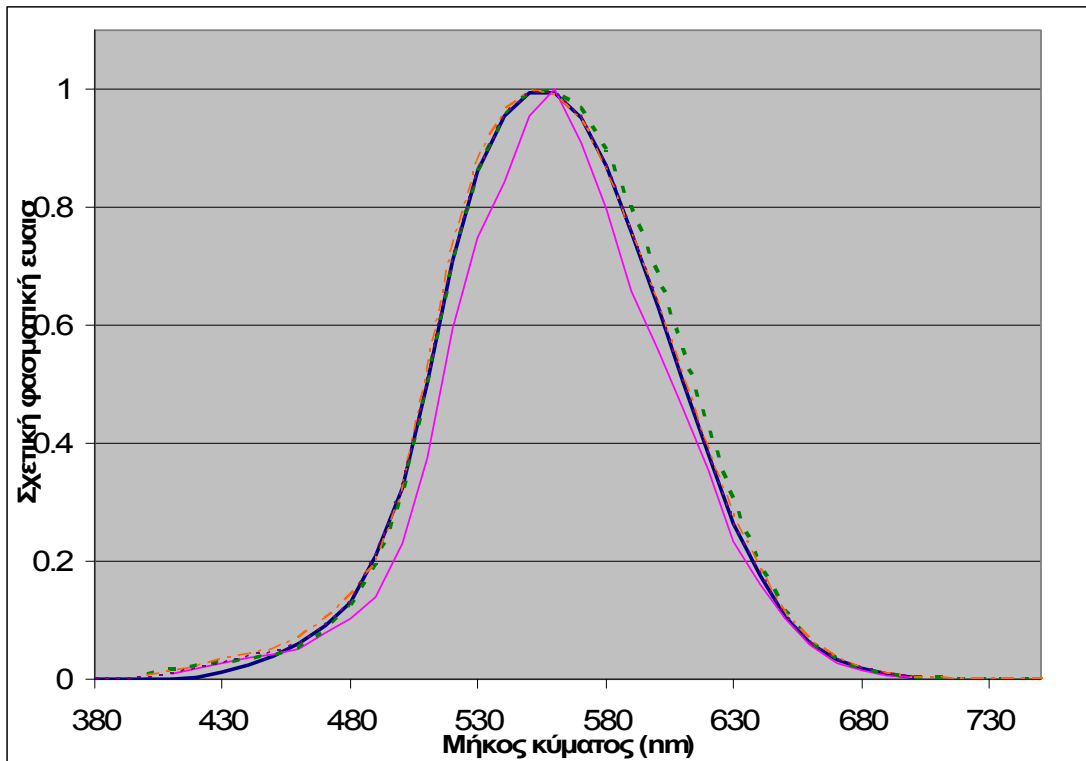
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του Emerson με αυτά των Gibson & Tyndall, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Παρουσιάζεται διαφορά στο μήκος κύματος της μέγιστης ορατότητας, η οποία είναι 557 nm σύμφωνα με τον Emerson και 560 nm σύμφωνα με τους Gibson & Tyndall.
- Στην όψη του μέγιστου που πλησιάζει το κόκκινο, οι μετρήσεις που έγιναν με τη μέθοδο της μαρμαρυγής, παρουσίαζαν τιμές υψηλότερες από εκείνες που πραγματοποιήθηκαν με την βήμα προς βήμα μέθοδο, περίπου μέχρι τα 640nm.
- Μετά τα 650nm, τα αποτελέσματα των ερευνητών δεν διαφέρουν ιδιαίτερα, ειδικά αν ληφθούν υπόψη οι δυσκολίες στις μετρήσεις σε εκείνη την περιοχή.
- Στην όψη του μέγιστου που πλησιάζει στο μπλε, οι δυο καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν μέχρι τα 490nm.
- Η ανωμαλία που παρουσιάζει η «βήμα προς βήμα» καμπύλη στα 480nm έχει ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό των καμπυλών μετά το συγκεκριμένο μήκος κύματος.

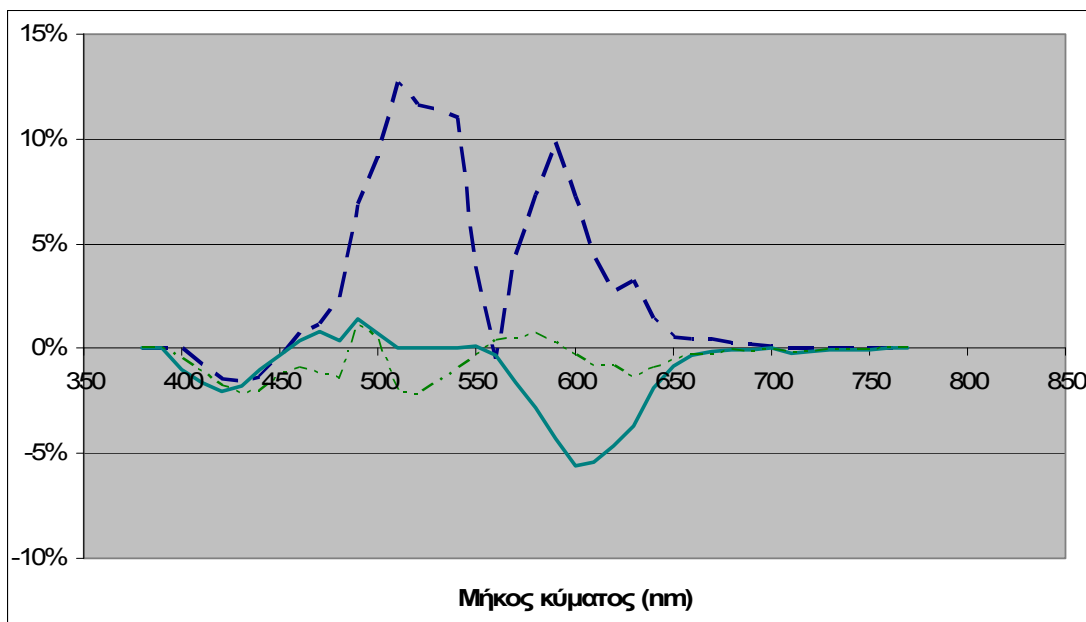


Σχήμα 3.9 – Σύγκριση καμπυλών φασματικής ευαισθησίας τη φωτοπική όραση (log)

◆ V(λ) ■ Thomson ▲ Coblentz-Emerson × Gibson-Tyndall * Judd (V_m)



Σχήμα 3.10 - Σύγκριση καμπυλών φασματικής ευαισθησίας τη φωτοπική όραση
 — $V(\lambda)$ — Thomson — Coblentz-Emerson
 - - - Gibson-Tyndall ····· Judd's 1951 correction



Σχήμα 3.11 – Ποσοστιαίες αποκλίσεις καμπυλών φασματικής ευαισθησίας από την $V(\lambda)$
 - - - $V(\lambda)$ - Thomson — $V(\lambda)$ - Coblentz-Emerson - - - $V(\lambda)$ - Gibson-Tyndall

4. Η καμπύλη σχετικής φασματικής ευαισθησίας ταύτισης φωτεινότητας ($V_b(\lambda)$)

4.1 Εισαγωγή

Η διαφορά στα μικρά και στα μεγάλα μήκη κύματος που παρατηρήθηκε ανάμεσα στην $V(\lambda)$ της CIE και της καμπύλης που προκύπτει από τη μέθοδο ετεροχρωματικής ταύτισης φωτεινότητας, οδήγησε στον προσδιορισμό μιας επίσημα αποδεκτής καμπύλης ευαισθησίας. Έτσι, μετά από μετρήσεις που διήρκεσαν αρκετά χρόνια και με τη συμβολή πολλών ερευνητών, προέκυψε η καμπύλη V_b , η οποία και έγινε αποδεκτή από την CIE.

Ανεξάρτητα από το μέγεθος του πεδίου, στα πειράματα υπήρχαν αυτό χωριζόταν σε δύο τμήματα: Το πρώτο τμήμα αποτελούσε το ερέθισμα αναφοράς και ενώ στο δεύτερο πραγματοποιούνταν η ταύτιση σε κάθε μήκος κύματος. Όταν το εύρος του πεδίου ήταν μεγάλο χρησιμοποιήθηκε διμερές πεδίο, ενώ όταν το εύρος ήταν πολύ μικρό, όπως για παράδειγμα μια σημειακή πηγή, χρησιμοποιήθηκαν δύο ξεχωριστά πεδία.

Συνήθως, η ακτινοβολία του ερεθίσματος δοκιμής μεταβάλλεται και η φωτεινότητά του εξισώνεται με αυτήν της αναφοράς. Η φασματική ευαισθησία του ερεθίσματος είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ακτινοβολία στο σημείο της ταύτισης.

Η χρήση σημείου παρατήρησης κατά τις μετρήσεις είναι προαιρετική. Η φασματική ευαισθησία δεν επηρεάζεται αν ο παρατηρητής κοιτάξει και σε άλλα σημεία του πεδίου ή στο κεντρικό του τμήμα. Αλλαγή στη φασματική ευαισθησία παρατηρείται όταν γίνει έντονη και παρατεταμένη παρατήρηση στο σημείο του ερεθίσματος, η οποία γίνεται ακόμα πιο έντονη σε περιπτώσεις με σημειακές πηγές. Κατά τα πειράματα, η ακτινοβολία του ερεθίσματος ήταν συνεχόμενη ενώ άλλες φορές πραγματοποιούνταν με τη μορφή ακαριαίας λάμψης διάρκειας περίπου ενός δευτερολέπτου.

Η V_b καμπύλη που συμβολίζεται $V_{b,2}(\lambda)$ και $V_{b,10}(\lambda)$ για πεδία 2° και 10° αντίστοιχα δεν έχει ισχύ για πηγές με σύνθετο φάσμα με σκοπό τον προσδιορισμό της

φασματικής ευαισθησίας, όπως γίνεται με την $V(\lambda)$, καθώς για διαφορετικά μήκη κύματος δεν ισχύει η προσθετικότητα.

4.2 Ikeda, Yaguchi, Sagawa²⁶

4.2.1 Εισαγωγή

Η έρευνα που ακολουθεί δεν συμπεριλαμβάνει πειραματική διαδικασία για τη λήψη δεδομένων. Αντίθετα, χρησιμοποιεί δεδομένα τα οποία προέκυψαν από σημαντικό αριθμό πειραμάτων, που είχαν εκτελεστεί στο παρελθόν και είχαν όλα εκτελεστεί κρατώντας σταθερές τις παρακάτω τέσσερις μεταβλητές:

- Το μέγεθος του ερεθίσματος
- Η σχετική φωτεινότητα
- Το βήμα, κατά το οποίο μεταβάλλεται το μήκος κύματος της ακτινοβολίας
- Οι ανεξάρτητοι παρατηρητές.

4.2.2. Μέθοδος

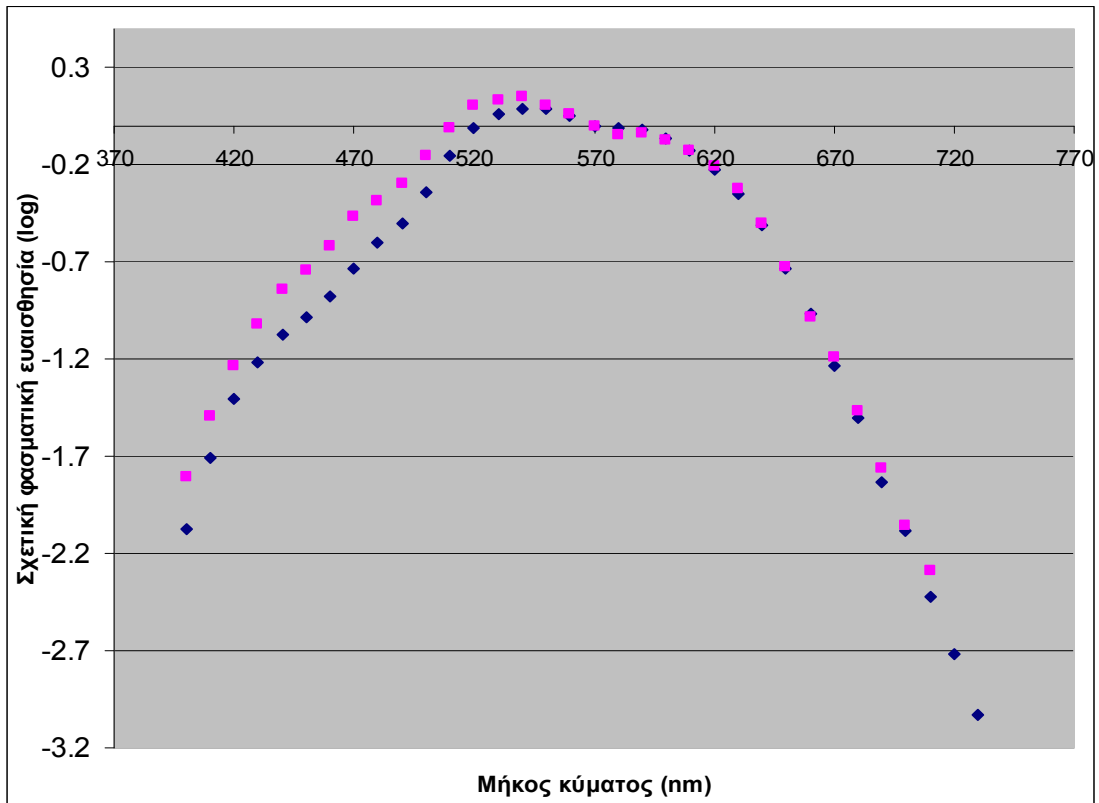
Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο επίπεδο των 100 Td και επιλέχθηκε αυτό διότι μικρές αποκλίσεις από τη συγκεκριμένη τιμή δεν προκαλούν ιδιαίτερες αλλαγές στην καμπύλη ευαισθησίας^{27, 28}. Οι περισσότερες μετρήσεις λήφθηκαν σε διαφορετικό μήκος κύματος με βήμα 10 nm, ώστε να υπάρχει περισσότερη αξιοπιστία στα αποτελέσματα. Σε περιπτώσεις που δεν υπήρχε τιμή ανά 10 nm, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής. Για το πεδίο των 2° συμπεριλήφθησαν μετρήσεις από 37 παρατηρητές, ενώ για τις 8°, συνολικά 9 παρατηρητές.

4.2.3. Αποτελέσματα

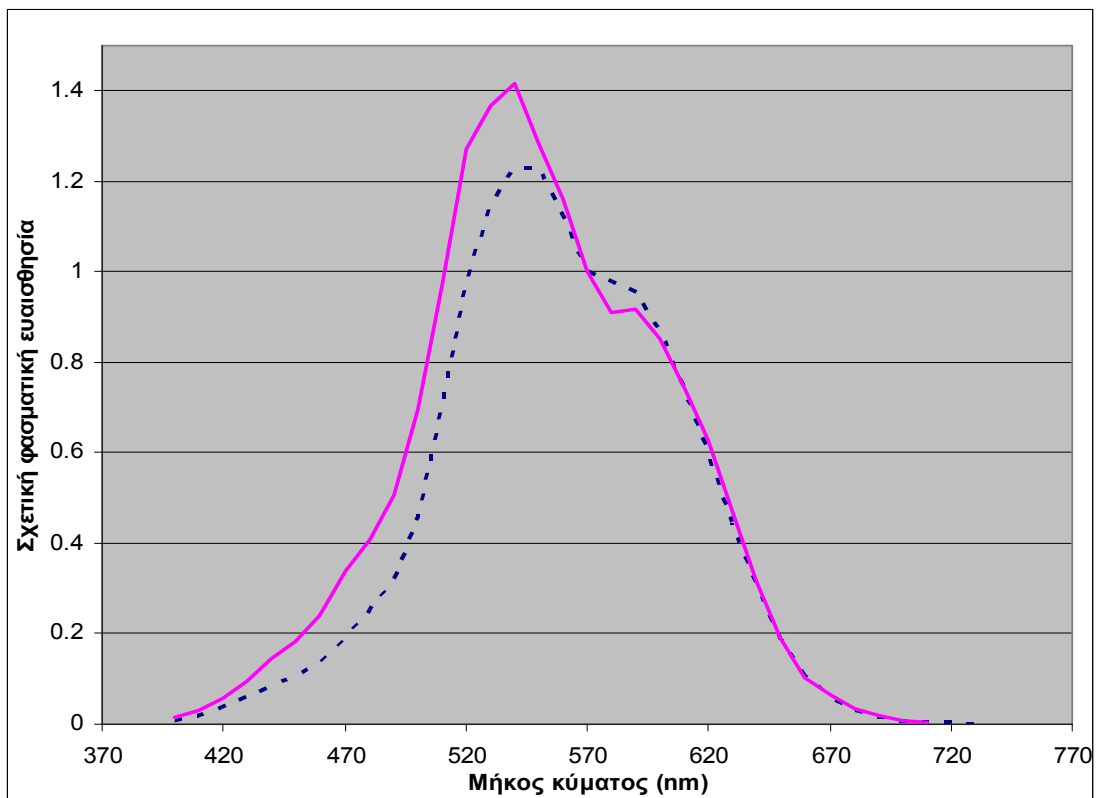
Μετά από μελέτη των μετρήσεων, προέκυψε ότι δεν τηρούνταν οι προϋποθέσεις των τεσσάρων μεταβλητών, συνεπώς, από τα αποτελέσματα για το πεδίο των 2° εξαιρέθηκαν τα δεδομένα αρκετών ερευνητών. Οι τελικές τιμές προκύπτουν από τον υπολογισμό του γεωμετρικού και όχι του αριθμητικού μέσου, ενώ η κανονικοποίηση γίνεται στα 570nm. Για τις 10° δεν έγινε ιδιαίτερη ανάλυση καθώς ο μικρός αριθμός των παρατηρητών δεν επέτρεπε εξαίρεση δεδομένων.

Πίνακας 4.1 - Ikeda, Yaguchi, Sagawa

λ (nm)	Σχετική φασματική ευαισθησία			
	Πεδίο 2°		Πεδίο 10°	
	Log Vb	Vb	Log Vb	Vb
400	-2.07	0.009	-1.805	0.016
410	-1.71	0.019	-1.492	0.032
420	-1.4	0.040	-1.237	0.058
430	-1.22	0.060	-1.02	0.095
440	-1.07	0.085	-0.84	0.145
450	-0.98	0.105	-0.74	0.182
460	-0.88	0.132	-0.617	0.242
470	-0.73	0.186	-0.469	0.340
480	-0.6	0.251	-0.389	0.408
490	-0.5	0.316	-0.294	0.508
500	-0.34	0.457	-0.156	0.698
510	-0.15	0.708	-0.0128	0.971
520	-0.01	0.977	0.1037	1.270
530	0.06	1.148	0.1353	1.366
540	0.09	1.230	0.151	1.416
550	0.09	1.230	0.1081	1.283
560	0.05	1.122	0.0654	1.163
570	0	1.000	0	1.000
580	-0.01	0.977	-0.0418	0.908
590	-0.02	0.955	-0.0365	0.919
600	-0.06	0.871	-0.0686	0.854
610	-0.13	0.741	-0.1273	0.746
620	-0.22	0.603	-0.202	0.628
630	-0.35	0.447	-0.3245	0.474
640	-0.51	0.309	-0.5	0.316
650	-0.73	0.186	-0.7235	0.189
660	-0.97	0.107	-0.984	0.104
670	-1.23	0.059	-1.1862	0.065
680	-1.5	0.032	-1.4628	0.034
690	-1.83	0.015	-1.7605	0.017
700	-2.08	0.008	-2.053	0.009
710	-2.42	0.004	-2.2923	0.005
720	-2.72	0.002		
730	-3.03	0.001		



Σχήμα 4.1 - Ikeda, Yaguchi, Sagawa – Σχετική φασματική ευαισθησία (log)



Σχήμα 4.2 - Ikeda, Yaguchi, Sagawa – Σχετική φασματική ευαισθησία

4.3 D.A.Palmer²⁹

4.3.1 Διάταξη

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε περιλάμβανε ένα δικάναλο φωτόμετρο με Maxwellian πεδίο 10° που προσέγγιζε εκείνο του Stiles^{30,31}, σε οριζόντιο ημισφαίριο με περιφέρεια που πλησίαζε τις 14°. Η περιφέρεια και το μισό τμήμα του πεδίου φωτιζόταν από μια λάμπα πυρακτώσεως με νήμα βολφραμίου τροφοδοτούμενη από συνεχή τάση με θερμοκρασία χρώματος 2043 K. Ανάλογα με τις απαιτήσεις, η θερμοκρασία ανέβαινε στους 3800 K. Η άλλη πηγή ακτινοβολίας βρισκόταν είτε πάνω είτε κάτω από το οριζόντιο διαχωριστικό, στο άλλο τμήμα του πεδίου. Επίσης, όταν οι συνθήκες το επέβαλλαν, χρησιμοποιούταν μια ακόμη πηγή ακτινοβολίας ως αναφορά στα 2043 K. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εξέπεμπε ο μονοχρωμάτορας αυξανόταν σταδιακά από 408 nm έως 741 nm.³² Η πηγή ήταν επίσης μια λάμπα βολφραμίου, ή όταν κρινόταν απαραίτητο, χρησιμοποιούνταν στη θέση της μια λυχνία βολταϊκού τόξου ξένων. Η υπό εξέταση ακτινοβολία, είτε μονοχρωματική, είτε στους 2043K μετρούνταν με τη βοήθεια ενός πρίσματος ουδέτερης έντασης. Η Maxwellian κόρη είχε διαστάσεις 2.1x1.9 mm και προβάλλονταν στην φυσική κόρη η οποία στηριζόταν στον σταθερό άξονα μέσω του μετώπου και των δοντιών. Αυτό εκμηδένιζε την πιθανότητα της εγκάρσιας χρωματικής απόκλισης στο μάτι.

Μετά από κάθε ταύτιση, ο παρατηρητής απομακρυνόταν ώστε να μετρηθεί η φωτεινότητα με ένα φωτοπολλαπλασιαστή τύπου EMI 9558 με γραμμική συμπεριφορά αρκετά ικανοποιητική.

4.3.2 Ρυθμίσεις συσκευών

Η σχετική φασματική ευαισθησία του φωτοπολλαπλασιαστή, είχε προσδιοριστεί σε σύγκριση με έναν αντίστοιχο στο Εθνικό Φυσικό Εργαστήριο (NPL), ενώ μετά το τέλος της έρευνας συγκρίθηκε με μια δίοδο σιλικόνης του National Bureau of Standards. Ο μονοχρωμάτορας είχε γραμμική κλίμακα μικρόμετρου και είχε ρυθμιστεί σύμφωνα με τις ενδείξεις μιας λάμπας Υδραργύρου-Καδμίου με ακρίβεια τάξεως $\pm 1\text{nm}$. Η σχετική φασματική ενέργεια της λάμπας βολφραμίου προσδιοριζόταν σύμφωνα με μια πρότυπη λάμπα από το Εθνικό Φυσικό Εργαστήριο της Ιαπωνίας. Για τον προσδιορισμό της ενέργειας ακτινοβολίας σε

τακτά διαστήματα του φάσματος χρησιμοποιήθηκε φωτόμετρο και ο μονοχρωμάτορας. Οι λυχνίες αναφοράς ρυθμίστηκαν και διατηρήθηκαν σε τέτοια τάση και ένταση ώστε η ενέργεια που παρήγαγαν να αντιστοιχεί στην ενέργεια μιας λυχνίας πυρακτώσεως με αντιστοιχία χρωματικής θερμοκρασίας της τάξης $2043 \pm 10\text{K}$.³³ Η έξοδος του φωτοπολλαπλασιαστή μετρήθηκε με τη βοήθεια του ψηφιακού βολτομέτρου.

Η σχετική ευαισθησία της ακτινοβολίας αναφοράς ρυθμίστηκε στην απαιτούμενη τιμή με ταύτιση του φωτισμού της Maxwellian κόρης της οποίας ήταν γνωστή η επιφάνεια, με το φωτισμό μιας οθόνης MgO ιδίων διαστάσεων που παρατηρούνταν μέσω ενός μεγεθυντικού φακού και ίδιας λαμπρότητας με την πρότυπη λυχνία. Η ένταση της Maxwellian κόρης σε μCd ήταν το γινόμενο της λαμπρότητας σε Cd επί το αντίστροφο της επιφάνειας σε mm^2 . Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί αριθμητικά στο σχετικό φωτισμό του πεδίου σε Td. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν κάποια φίλτρα ουδέτερης ακτινοβολίας και φίλτρα για κάποιες ειδικότερες ρυθμίσεις με στόχο τη μείωση των σφαλμάτων που ήταν της τάξεως $\pm 10\%$.

4.3.3. Μέθοδος

Ο παρατηρητής κλήθηκε να κάνει ταύτιση της ακτινοβολίας αναφοράς με την υπό εξέταση ακτινοβολία ρυθμίζοντας κατάλληλα την φωτεινότητα, αγνοώντας τις χρωματικές διαφορές και εστιάζοντας στη διαφορά φωτεινότητας. Ανά διαστήματα γινόταν έλεγχος της ακτινοβολίας αναφοράς και σαν τελική τιμή λήφθηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων. Επίσης, στην αρχή και στο τέλος κάθε δοκιμής ελεγχόταν η ακτινοβολία σε κάθε άκρο του πεδίου όπου και εκεί λήφθηκε υπόψη ο μέσος όρος. Στα άκρα του φάσματος, μειώθηκε το επίπεδο φωτισμού, ανάλογα με την ευαισθησία του κάθε παρατηρητή.

4.3.4. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως ο λογάριθμος του αντιστρόφου της έντασης ακτινοβολίας (W/sr) που χρειάζεται για να ταυτιστεί με το λευκό φως αναφοράς των 1000 Td. Στα σημεία που χρησιμοποιήθηκε χαμηλότερος φωτισμός, έγινε κανονικοποίηση στα 1000 Td. Τα αποτελέσματα διακρίνονται ως εξής:

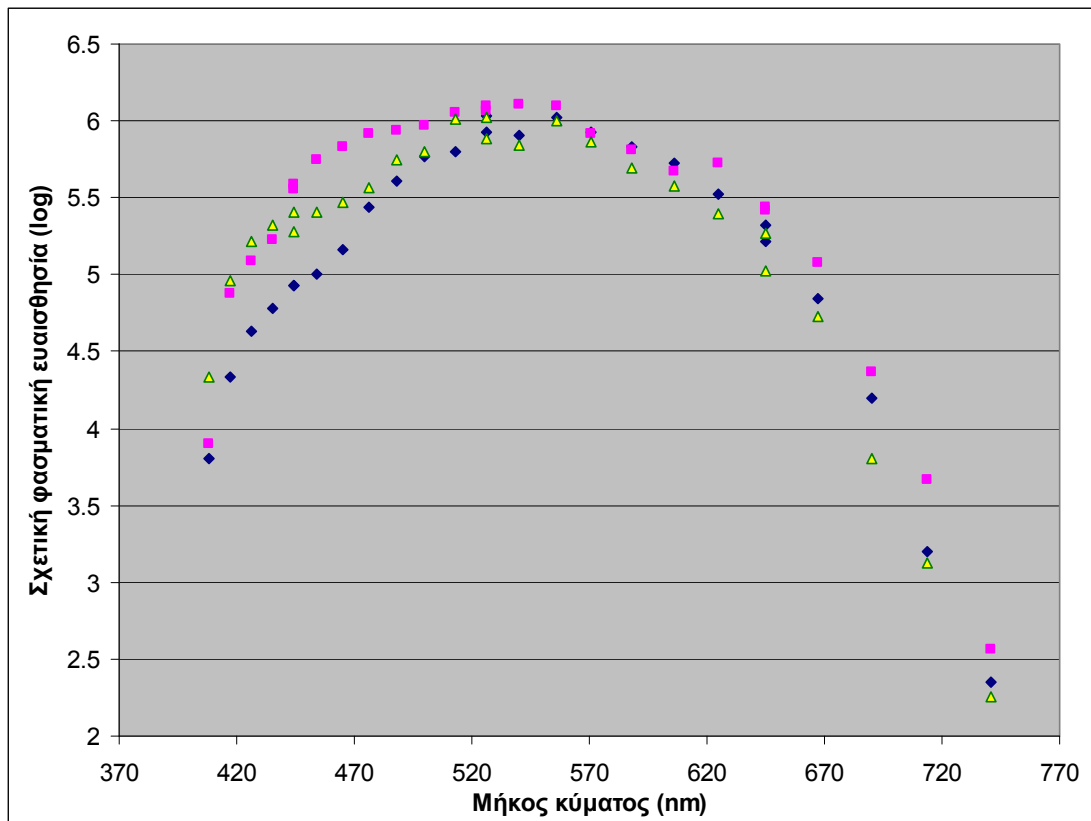
- Η καμπύλη που αντιστοιχεί στην 1^η κατηγορία παρουσιάζει μία μόνο κορυφή περίπου στα 555 nm.

- Η καμπύλη που αντιστοιχεί στη 2^η κατηγορία εμφανίζει κορυφές στα 550 και στα 640 nm περίπου.
- Η 3^η κατηγορία μοιάζει πλησιάζει την μορφή της πρώτης στα μεγάλα μήκη κύματος αλλά εμφανίζει κάμψη στα 440 nm και κορυφή στα 550.

Η κατανομή έγινε κατά τέτοιο τρόπο ώστε η κάθε τιμή να προσεγγίζει κάποιο συγκεκριμένο φωτεινό ερεθισμό. Στον Πίνακα 4 παρατίθενται οι τιμές όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις χωρίς να έχουν δεχθεί κάποια ιδιαίτερη μαθηματική επεξεργασία. Στον Πίνακα 5, οι τιμές προκύπτουν από το μέσο όρο των τριών κατηγοριών, τροποποιημένες με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής και κανονικοποιημένες στα 570nm.

Πίνακας 4.2 – Palmer - Σχετική φασματική ευαισθησία

λ (nm)	Σχετική φασματική ευαισθησία (log)		
	Κατηγορία 1	Κατηγορία 2	Κατηγορία 3
408	3.800	3.903	4.331
417	4.334	4.875	4.958
426	4.633	5.090	5.213
435	4.780	5.226	5.323
444	4.925	5.558	5.405
444	4.931	5.583	5.278
454	5.000	5.749	5.408
465	5.165	5.831	5.473
476	5.439	5.913	5.570
488	5.604	5.934	5.743
500	5.763	5.965	5.800
513	5.798	6.059	6.008
526	5.926	6.100	5.885
526	6.034	6.066	6.028
540	5.902	6.108	5.843
556	6.018	6.100	6.003
571	5.925	5.921	5.865
588	5.832	5.809	5.695
606	5.728	5.670	5.575
625	5.528	5.728	5.400
645	5.220	5.416	5.025
645	5.325	5.439	5.265
667	4.840	5.074	4.730
690	4.195	4.366	3.805
714	3.196	3.664	3.123
741	2.355	2.558	2.253



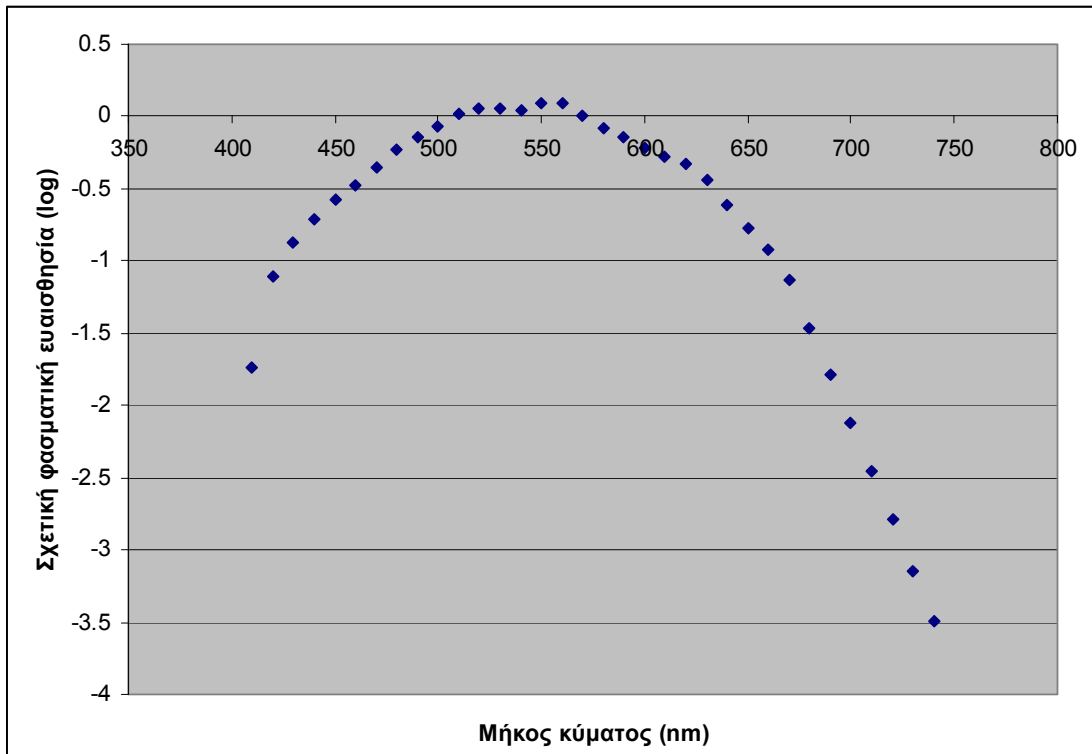
Σχήμα 4.3 – Palmer – Σχετική φασματική ευαισθησία (log)

◆ Κατηγορία 1 ■ Κατηγορία 2 ▲ Κατηγορία 3

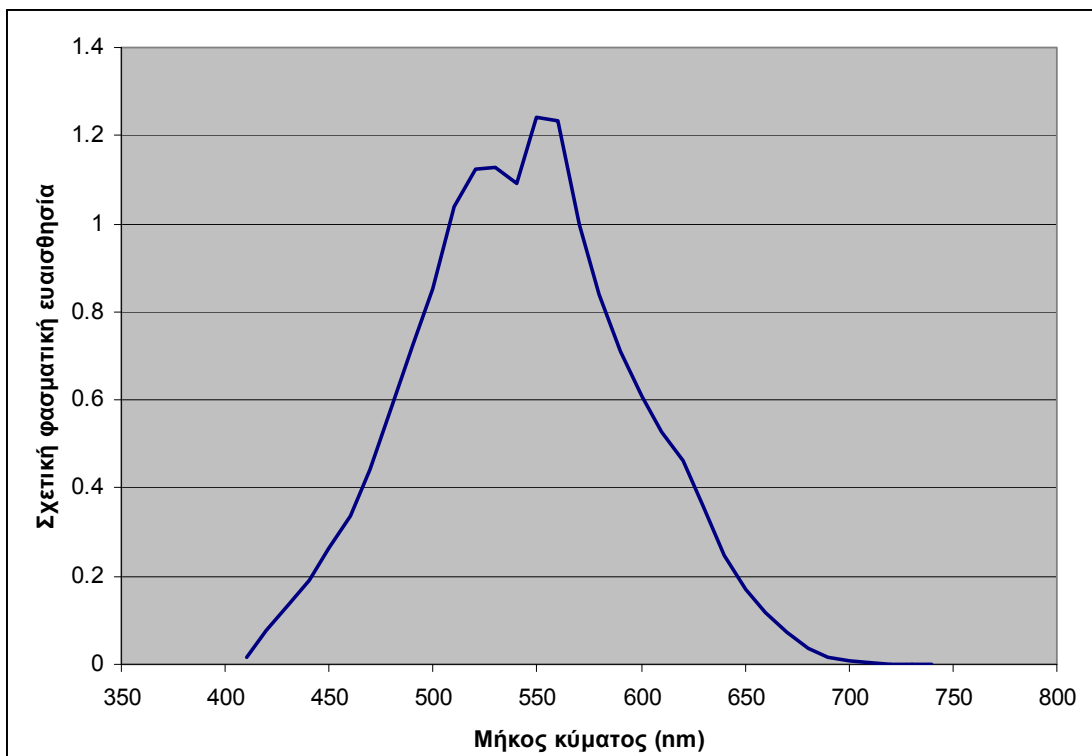
Η προσθετικότητα είναι κάτι πολύ βασικό στη φωτομετρία, αφού βασικός σκοπός της καμπύλης φασματικής ευαισθησίας είναι να προσδιοριστεί η λαμπρότητα σύμφωνα με τον νόμο του Abney. Όμως η μέθοδος της άμεσης ετεροχρωματικής ταύτισης φωτεινότητας παρουσιάζει αδυναμία σ' αυτόν τον τομέα. Αντίθετα, από τις μετρήσεις που έγιναν, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η καμπύλη που προκύπτει με την μέθοδο του κατωφλίου η οποία είναι προσθετική, προσεγγίζει αρκετά εκείνη της άμεσης ετεροχρωματικής ταύτισης φωτεινότητας, καθώς και την καμπύλη της CIE.

Πίνακας 4.3 - Κανονικοποιημένες τιμές

Μήκος κύματος (nm)	Σχετική φασματική ευαισθησία (log)	Σχετική φασματική ευαισθησία
410	-1.744	0.018
420	-1.105	0.078
430	-0.876	0.133
440	-0.718	0.192
450	-0.576	0.265
460	-0.471	0.338
470	-0.355	0.442
480	-0.232	0.586
490	-0.139	0.726
500	-0.07	0.85
510	0.016	1.038
520	0.05	1.123
530	0.052	1.127
540	0.038	1.091
550	0.094	1.241
560	0.091	1.233
570	0	1
580	-0.075	0.841
590	-0.148	0.712
600	-0.215	0.61
610	-0.278	0.528
620	-0.333	0.464
630	-0.444	0.36
640	-0.61	0.246
650	-0.77	0.17
660	-0.924	0.119
670	-1.131	0.074
680	-1.461	0.035
690	-1.791	0.016
700	-2.122	0.008
710	-2.453	0.004
720	-2.794	0.002
730	-3.142	7E-04
740	-3.489	3E-04



Σχήμα 4.4 – Palmer – Σχετική φασματική ευαισθησία (log) - Κανονικοποιημένες τιμές



Σχήμα 4.5 – Palmer – Σχετική φασματική ευαισθησία - Κανονικοποιημένες τιμές

4.4 Sagawa – Takeichi³⁴

4.4.1. Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο πείραμα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο της ετεροχρωματικής ταύτισης φωτεινότητας σε εννιά επίπεδα φωτισμού, από 100 έως 0,1 Td και λήφθηκαν μετρήσεις από δώδεκα παρατηρητές. Τα αποτελέσματα που θα παρατεθούν, περιλαμβάνουν τα τρία πρώτα επίπεδα φωτισμού, 100, 32 και 10 Td που αφορούν στη φωτοπική περιοχή.

4.4.2. Διάταξη

Χρησιμοποιήθηκε ένα δικάναλο Maxwellian σύστημα με μια λάμπα ξέnon ως πηγή ακτινοβολίας, σε πεδίο 10. Ως αναφορά, χρησιμοποιήθηκε το λευκό φως που προερχόταν από την λάμπα ενώ για την ταύτιση χρησιμοποιήθηκε μονοχρωματική ακτινοβολία της οποίας το μήκος κύματος αυξανόταν σταδιακά από 400 nm έως 700 nm με βήμα 10 nm. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ένα μονοχρωμάτορας φράγματος με δύο φίλτρα αποκοπής, ένα φίλτρο τύπου Wratten 47A για μήκος κύματος 400 nm ως 440 nm και ένα sharp-cut φίλτρο 670 nm για μήκος κύματος από 670 nm ως 700 nm ώστε να εξαλειφθεί η περιττή ακτινοβολία. Η ενέργεια της ακτινοβολίας μεταβαλλόταν μέσω ουδέτερων (neutral filters) φίλτρων και κυκλικών πρισμάτων, που ελέγχονταν από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το κεφάλι του παρατηρητή σταθεροποιούνταν μέσω μιας ξύλινης σανίδας.

4.4.3. Ρυθμίσεις

Η σχετική φασματική ενέργεια του ερεθίσματος που χρησιμοποιήθηκε για την ταύτιση μετρούνταν μέσω μιας φωτοδιόδου σιλικόνης και ενός φωτοπολλαπλασιαστή, ενώ μέσω της τελευταίας συσκευής μετρήθηκε και η αντίστοιχη ενέργεια της ακτινοβολίας αναφοράς. Οι συσκευές αυτές ήταν ρυθμισμένες στο Ηλεκτροτεχνικό Εργαστήριο στην Ιαπωνία. Η σχετική λαμπρότητα της ακτινοβολίας αναφοράς καθορίζονταν από την φωτεινότητα σε συγκεκριμένη απόσταση από την τεχνητή κόρη. Η ποσότητα της ακτινοβολίας που διαπερνούσε τα φυσικά φίλτρα και τα πρίσματα ρυθμίστηκε στο οπτικό σύστημα. Η ρύθμιση του μήκους κύματος του μονοχρωμάτορα (monochromator) επιτεύχθηκε με υπολογισμό της ενέργειας στα 435,8 nm και στα 546,1 nm μιας λάμπας υδραργύρου.

4.4.4. Διαδικασία

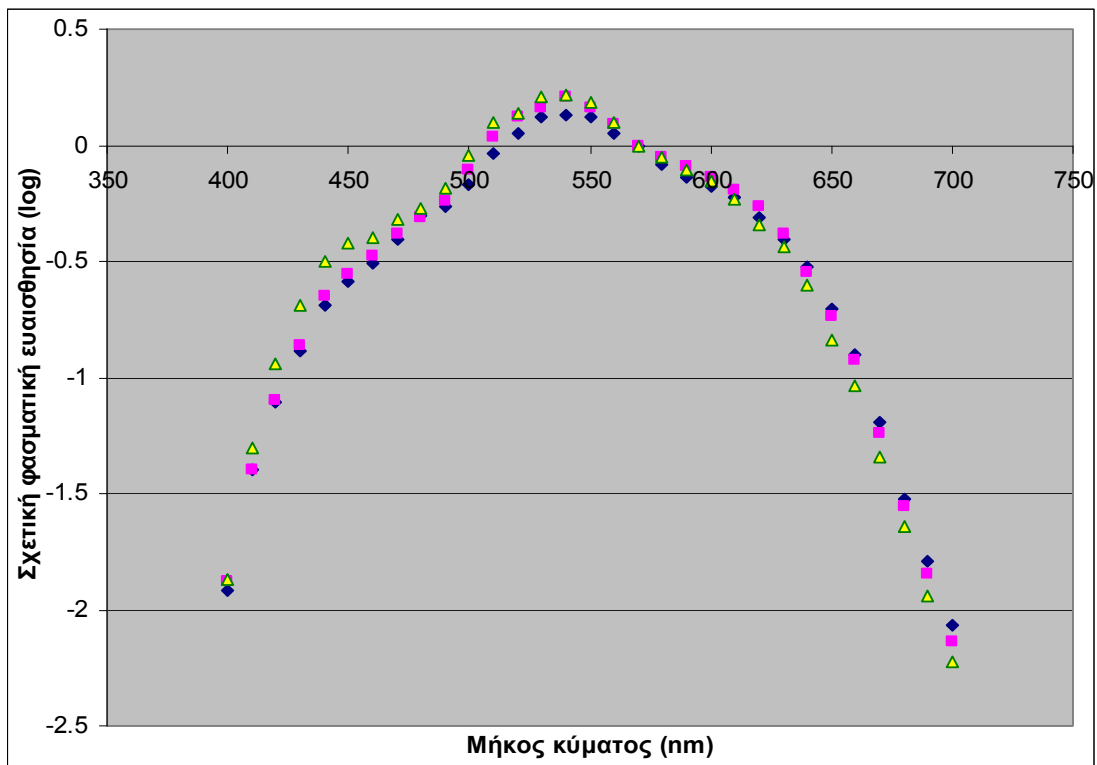
Σε κάθε επίπεδο φωτισμού πραγματοποιήθηκαν τέσσερις μετρήσεις για κάθε παρατηρητή σε κάθε μήκος κύματος, εκ των οποίων λήφθηκε υπόψη για τα αποτελέσματα ο γεωμετρικός μέσος.

4.4.5. Αποτελέσματα

Η καμπύλη που προκύπτει πλησιάζει αρκετά την V_{b2} που προτάθηκε από την CIE³⁵ και τους Ikeda et al.³⁶ εκτός από τα μικρά μήκη κύματος όπου η χρωστική

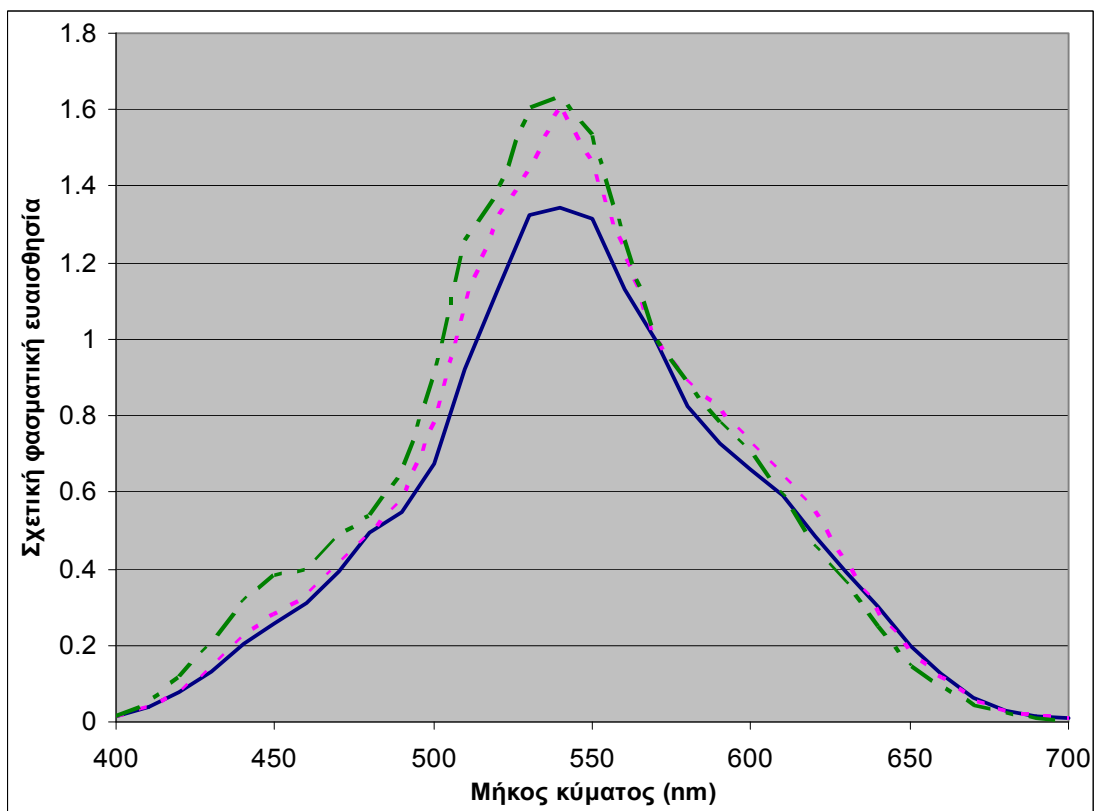
Πίνακας 4.4 - Sagawa – Takeichi

Μήκος κύματος (nm)	Επίπεδο φωτισμού					
	100 Td	32 Td	10 Td	100 Td	32 Td	10 Td
	Σχετική φασματική ευαισθησία (log)			Σχετική φασματική ευαισθησία		
400	-1.916	-1.876	-1.87	0.012	0.013	0.013
410	-1.395	-1.4	-1.303	0.040	0.040	0.050
420	-1.105	-1.1	-0.939	0.079	0.079	0.115
430	-0.882	-0.865	-0.692	0.131	0.136	0.203
440	-0.692	-0.649	-0.5	0.203	0.224	0.316
450	-0.59	-0.553	-0.419	0.257	0.280	0.381
460	-0.507	-0.479	-0.398	0.311	0.332	0.400
470	-0.408	-0.385	-0.315	0.391	0.412	0.484
480	-0.304	-0.311	-0.269	0.497	0.489	0.538
490	-0.26	-0.238	-0.187	0.550	0.578	0.650
500	-0.17	-0.107	-0.043	0.676	0.782	0.906
510	-0.036	0.038	0.1	0.920	1.091	1.259
520	0.051	0.119	0.139	1.125	1.315	1.377
530	0.122	0.158	0.206	1.324	1.439	1.607
540	0.128	0.207	0.214	1.343	1.611	1.637
550	0.119	0.163	0.185	1.315	1.455	1.531
560	0.053	0.089	0.1	1.130	1.227	1.259
570	0	0	0	1.000	1.000	1.000
580	-0.083	-0.052	-0.054	0.826	0.887	0.883
590	-0.139	-0.09	-0.107	0.726	0.813	0.782
600	-0.18	-0.134	-0.154	0.661	0.735	0.701
610	-0.228	-0.19	-0.229	0.592	0.646	0.590
620	-0.314	-0.26	-0.342	0.485	0.550	0.455
630	-0.404	-0.38	-0.44	0.394	0.417	0.363
640	-0.525	-0.545	-0.606	0.299	0.285	0.248
650	-0.706	-0.737	-0.835	0.197	0.183	0.146
660	-0.9	-0.928	-1.033	0.126	0.118	0.093
670	-1.193	-1.238	-1.346	0.064	0.058	0.045
680	-1.524	-1.557	-1.643	0.030	0.028	0.023
690	-1.79	-1.848	-1.941	0.016	0.014	0.011
700	-2.066	-2.136	-2.228	0.009	0.007	0.006



Σχήμα 4.6 - Sagawa – Takeichi – Σχετική φασματική ευαισθησία (log)

◆ 100 Td ■ 32 Td ▲ 10 Td



Σχήμα 4.7 - Sagawa – Takeichi – Σχετική φασματική ευαισθησία

— 100 Td - - - 32 Td - - - 10 Td

κηλίδωση (macular pigmentation) εξαρτάται από το μέγεθος του πεδίου. Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για 100, 32 και 10 Td κανονικοποιημένα στα 570 nm, ενώ στα σχήματα 4.6, 4.7 παριστάνονται οι καμπύλες φασματικής ευαισθησίας για τις αντίστοιχες τιμές

4.5 Ikeda, Nakano³⁷

Η έρευνα αυτή περιλαμβάνει μια σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν από διάφορους ερευνητές υπό διαφορετικές συνθήκες, με αποτέλεσμα την εξαγωγή μιας καμπύλης η οποία το 1988 θα υιοθετηθεί και από την CIE.

Στα πειράματα που έγιναν σε πεδίο 2° έλαβαν μέρος 63 άτομα, ενώ σε πεδίο 10° συμμετείχαν 76 άτομα. Εφαρμόστηκε η ετεροχρωματική ταύτιση φωτεινότητας: Η μονοχρωματική ακτινοβολία ρυθμιζόταν κατάλληλα ώστε να γίνει ταύτιση με την ακτινοβολία αναφοράς. Στον Πίνακα 2 φαίνονται αναλυτικά οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξήχθη κάθε πείραμα ξεχωριστά. Στον πίνακα 3 παρατίθενται τα αποτελέσματα και για τις δύο περιπτώσεις. Η 2^η και η 4^η στήλη περιλαμβάνουν τη μέση τιμή σε κάθε μήκος κύματος, η 3^η και η 6^η στήλη το τυπικό σφάλμα σε κάθε μήκος κύματος, ενώ η 4^η και η 7^η στήλη περιλαμβάνουν τον αριθμό των παρατηρητών για κάθε μέτρηση. Η μηδενική τιμή στον πίνακα αντιπροσωπεύει την κανονικοποίηση της καμπύλης που έγινε στα 570 nm. Στις περιπτώσεις όπου οι μειωνόταν ο αριθμός των παρατηρητών, κυρίως δηλαδή σε πολύ μικρό και σε πολύ μεγάλο μήκος κύματος, εφαρμόστηκε η μέθοδος της ταξινόμησης (cascade).

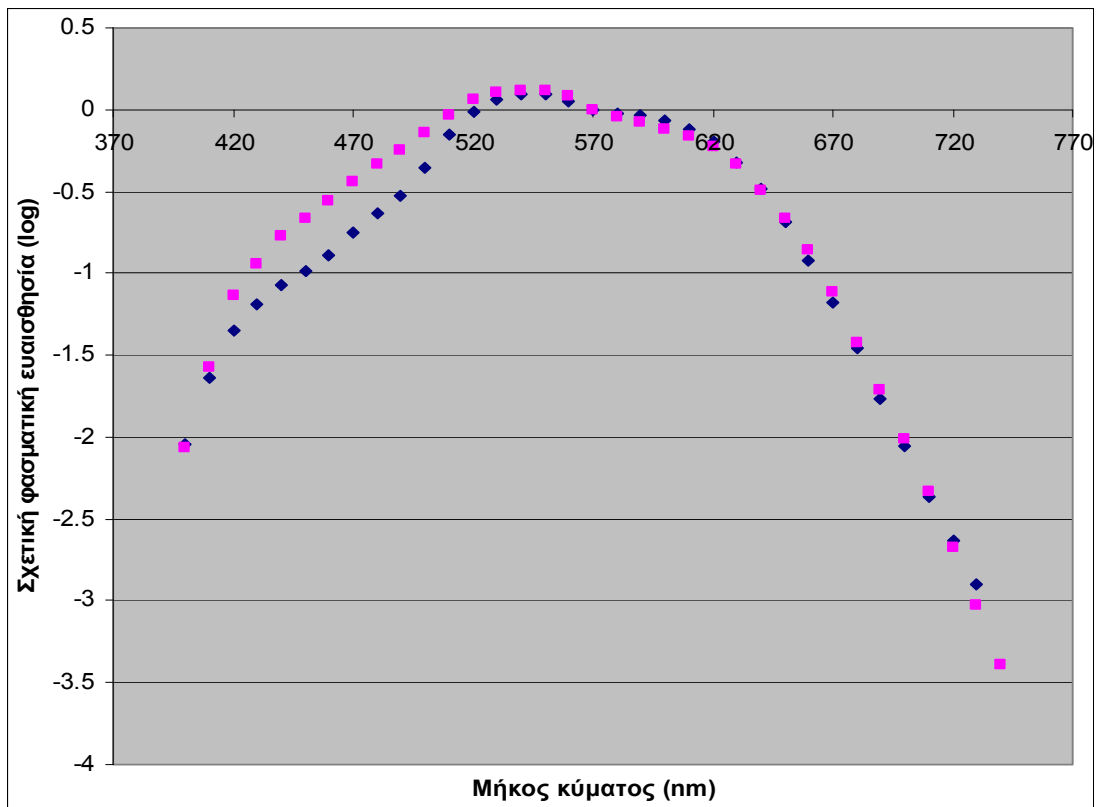
Οι καμπύλες $V_{b,2}(\lambda)$ και $V_{b,10}(\lambda)$ γενικά διαφέρουν ανάλογα με τις πειραματικές συνθήκες. Για παράδειγμα, στα 550 nm και στα 600 nm, συχνά παρατηρείται τάση για διπλή κορυφή (double peak) στην καμπύλη, ειδικά όταν η παρατήρηση περιορίζεται στο 1 sec. Επίσης, εμφανίζονται μεγάλες αποκλίσεις στις μετρήσεις κάθε παρατηρητή, με αποτέλεσμα η μέση τιμή τελικά να προκύπτει από ένα μεγάλο διάστημα τιμών.

Πίνακας 4.5 - Ikeda, Nakano - Πειραματικές συνθήκες για πεδίο 2° και 10°

Πειραματικές συνθήκες για πεδίο 2°									
Ερευνητή	Έτος	Μέγεθος	Επίπεδο φωτισμού (td)	Αναφορά	Διάρκεια	Εύρος του λ	Παρ/ές	Ηλικία	Παρατηρήσεις
Bedford-Wyszecki	1958	1°	50	λευκό	συνεχής	400-700	4	23-31	
Sperling	1958	2°	500	520nm	0.004sec	420-700	6	22-32	
Wagner-Boynton	1972	1°40'	1-572	λευκό	συνεχής	400-670	4	28,30 ?	Χαμηλότερος φωτισμός αμφιβληστροειδούς (Td) στα άκρα του φάσματος
Cornerford-Kaiser	1975	1°	150,225,400	λευκό x=0.34 y=0.34	-	420-700	5	20-40	Διαφορετικό επίπεδο φωτισμού στους διάφορους παρατηρητές
Ikeda-Yaguchi et al	1980	2°	100	Λευκό x=0.32 y=0.33	4sec	420-680	4	22-28	
Uchikawa-Ikeda	1981	2°	76	570nm	110 nsec	410-680	2	24,27	Παρουσία ενεργειακής παραμόρφωσης
Katori-Fuwa	1981	2°	50	λευκό (C)	συνεχής	400-730	6	20-55	
Sagawa	1981	1°	80	Λευκό (4800K)	συνεχής	410-690	1	30	
Hasegawa	1977	2°	170	Λευκό	συνεχής	400-690	3	23-39	
Wu-Piao et al.	1985	2°	20,250	Λευκό (πηγή 2860K)	συνεχής	400-730	16	20-47	20td στα 400,410nm
Ikeda	1985	2°	100	Λευκό x=0.37 y=0.39	1 sec	400-700	12	22-50	Χαμηλότερος φωτισμός αμφιβληστροειδούς (Td) στα άκρα του φάσματος
							Σύνολο: 63		
Πειραματικές συνθήκες για πεδίο 10°									
Ερευνητή	Έτος	Μέγεθος	Επίπεδο φωτισμού (td)	Αναφορά	Διάρκεια	Εύρος του λ	Παρ/ές	Ηλικία	Παρατηρήσεις
Ikeda-Shimozono	1981	10°	100	Λευκό x=0.33 y=0.35	συνεχής	400-700	2	23,26	
Katori-Fuwa	1981	10°	200	λευκό (C)	συνεχής	420-710	4	20-45	
Sagawa	1981	8°	50	λευκό	συνεχής	400-690	1	30	
Kumano-Ikeda	1982	10°	100	λευκό x=0.36 y=0.38	συνεχής	420-680	2	24,29	
Sagawa	1983	10°	100	λευκό	συνεχής	400-700	24	19-26	Παρουσία ενεργειακής παραμόρφωσης
Palmer	1985	10°	10,32,100,320,1000	λευκό (2043K)	συνεχής	410-740	24	17-74	Χαμηλότερος φωτισμός αμφιβληστροειδούς (Td) στα άκρα του φάσματος
Wu-Piao et al.	1985	10°	250	λευκό (2860K)	συνεχής	420-720	7	20-51	Παρουσία χρωματικής θερμοκρασίας στην πηγή
Ikeda	1985	10°	100	λευκό x=0.37 y=0.39	1sec	400-700	12	22-50	Χαμηλότερος φωτισμός αμφιβληστροειδούς (Td) στα άκρα του φάσματος
							Σύνολο: 76		

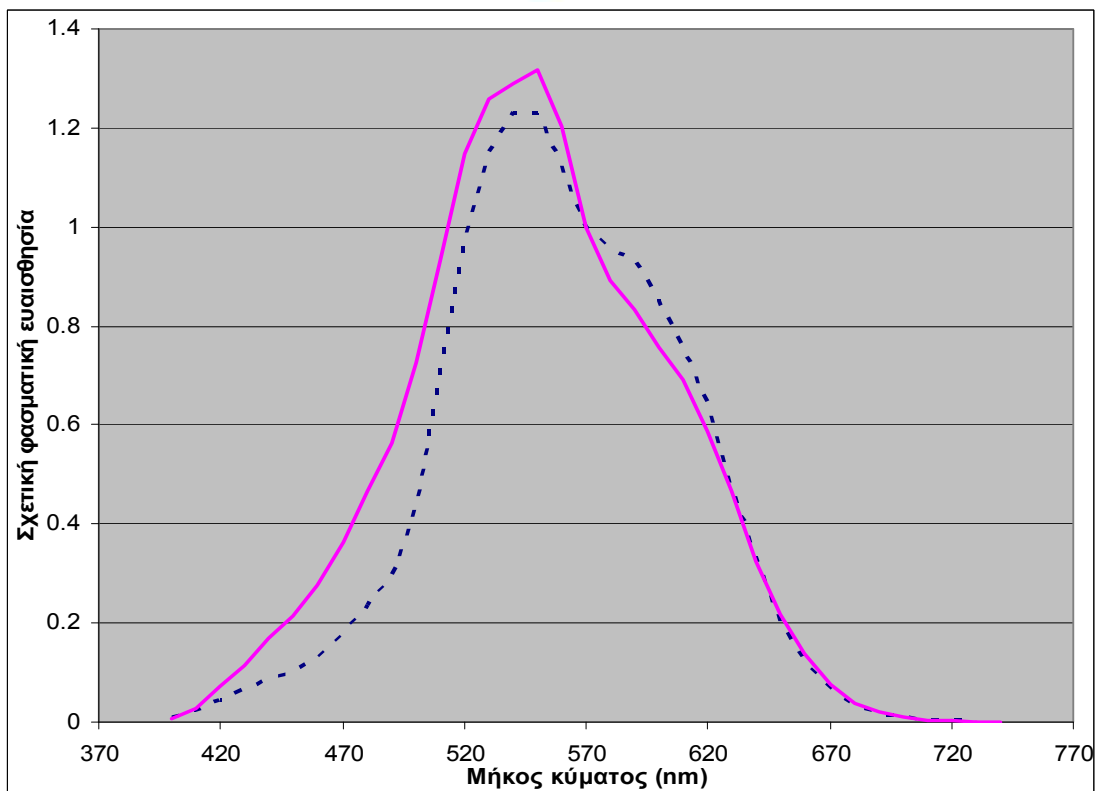
Πίνακας 4.6 – Ikeda, Nakano - Σχετική φασματική ευαισθησία

Μήκος κύματος (nm)	Σχετική φασματική ευαισθησία			
	Πεδίο 2°		Πεδίο 10°	
	Log Vb	Vb	Log Vb	Vb
400	-2.04	0.009	-2.07	0.009
410	-1.64	0.023	-1.57	0.027
420	-1.35	0.045	-1.14	0.072
430	-1.19	0.065	-0.94	0.115
440	-1.07	0.085	-0.77	0.17
450	-0.99	0.102	-0.67	0.214
460	-0.89	0.129	-0.56	0.275
470	-0.75	0.178	-0.44	0.363
480	-0.63	0.234	-0.33	0.468
490	-0.53	0.295	-0.25	0.562
500	-0.36	0.437	-0.14	0.724
510	-0.15	0.708	-0.03	0.933
520	-0.01	0.977	0.06	1.148
530	0.06	1.148	0.1	1.259
540	0.09	1.23	0.11	1.288
550	0.09	1.23	0.12	1.318
560	0.05	1.122	0.08	1.202
570	0	1	0	1
580	-0.02	0.955	-0.05	0.891
590	-0.03	0.933	-0.08	0.832
600	-0.07	0.851	-0.12	0.759
610	-0.12	0.759	-0.16	0.692
620	-0.19	0.646	-0.23	0.589
630	-0.32	0.479	-0.33	0.468
640	-0.48	0.331	-0.49	0.324
650	-0.69	0.204	-0.66	0.219
660	-0.92	0.12	-0.86	0.138
670	-1.18	0.066	-1.11	0.078
680	-1.46	0.035	-1.42	0.038
690	-1.77	0.017	-1.71	0.019
700	-2.05	0.009	-2.01	0.01
710	-2.36	0.004	-2.33	0.005
720	-2.63	0.002	-2.67	0.002
730	-2.9	0.001	-3.03	9E-04
740			-3.39	4E-04



Σχήμα 4.8 - Ikeda, Nakano – Σχετική φασματική ευαισθησία (log)

◆ Log Vb2 ■ Log Vb10



Σχήμα 4.9 - Ikeda, Nakano – Σχετική φασματική ευαισθησία

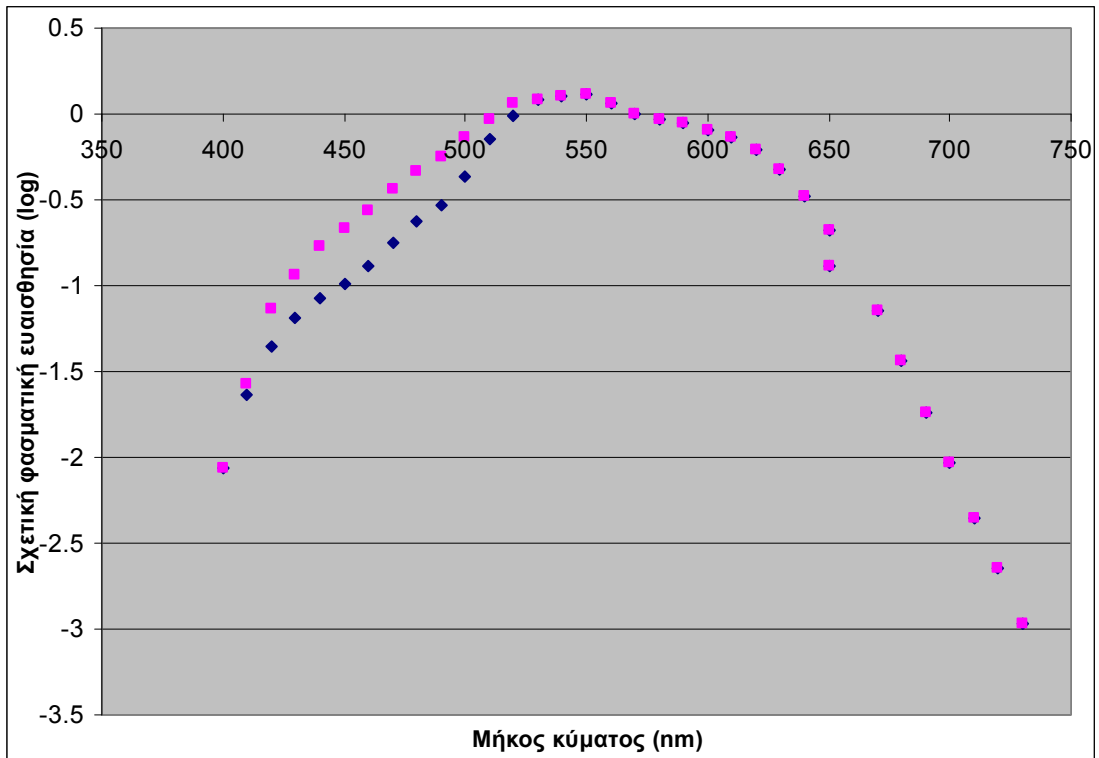
- - - Vb2 — Vb10

4.6. CIE³⁸

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες και οι καμπύλες για πεδία 10° και 2° οι οποίες είναι και επίσημα αποδεκτές από την CIE.

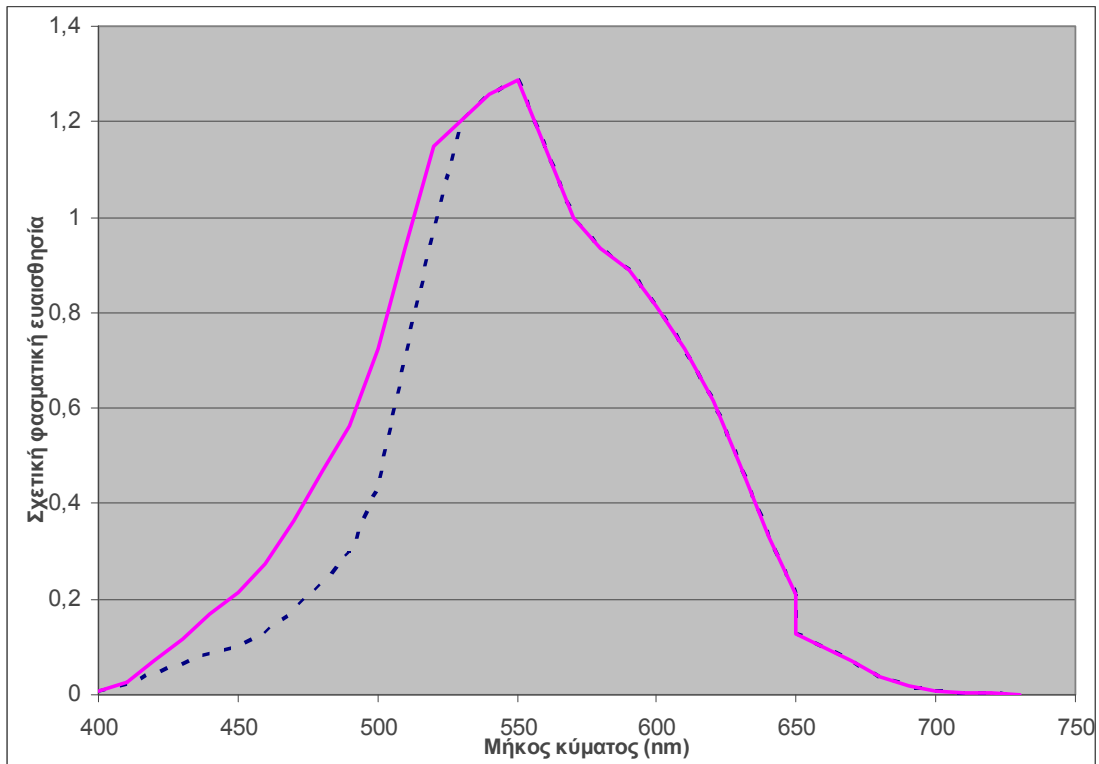
Πίνακας 4.7 - Προτεινόμενες καμπύλες φασματικής ευαισθησίας για 2° και 10°

Μήκος κύματος (nm)	Σχετική φασματική ευαισθησία			
	Πεδίο 2°		Πεδίο 10°	
	Log Vb		Log Vb	
400	-2.06	0.00871	-2.06	0.00871
410	-1.64	0.022909	-1.57	0.026915
420	-1.35	0.044668	-1.14	0.072444
430	-1.19	0.064565	-0.94	0.114815
440	-1.07	0.085114	-0.77	0.169824
450	-0.99	0.102329	-0.67	0.213796
460	-0.89	0.128825	-0.56	0.275423
470	-0.75	0.177828	-0.44	0.363078
480	-0.63	0.234423	-0.33	0.467735
490	-0.53	0.295121	-0.25	0.562341
500	-0.36	0.436516	-0.14	0.724436
510	-0.15	0.707946	-0.03	0.933254
520	-0.01	0.977237	0.06	1.148154
530	0.08	1.202264	0.08	1.202264
540	0.1	1.258925	0.1	1.258925
550	0.11	1.28825	0.11	1.28825
560	0.06	1.148154	0.06	1.148154
570	0	1	0	1
580	-0.03	0.933254	-0.03	0.933254
590	-0.05	0.891251	-0.05	0.891251
600	-0.09	0.812831	-0.09	0.812831
610	-0.14	0.724436	-0.14	0.724436
620	-0.21	0.616595	-0.21	0.616595
630	-0.32	0.47863	-0.32	0.47863
640	-0.48	0.331131	-0.48	0.331131
650	-0.68	0.20893	-0.68	0.20893
650	-0.89	0.128825	-0.89	0.128825
670	-1.15	0.070795	-1.15	0.070795
680	-1.44	0.036308	-1.44	0.036308
690	-1.74	0.018197	-1.74	0.018197
700	-2.03	0.009333	-2.03	0.009333
710	-2.35	0.004467	-2.35	0.004467
720	-2.65	0.002239	-2.65	0.002239
730	-2.97	0.001072	-2.97	0.001072



Σχήμα 4.10 - CIE - Προτεινόμενες καμπύλες φασματικής ευαισθησίας για 2° και 10° (log)

◆ Log Vb2 ■ Log Vb10



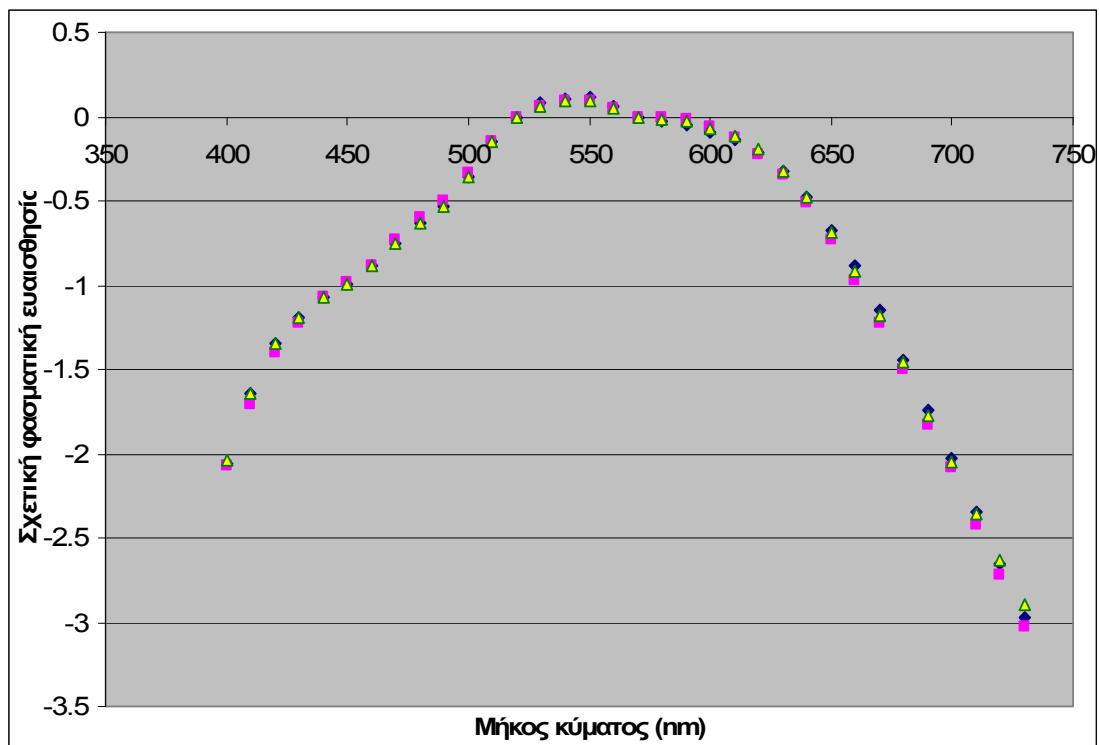
Σχήμα 4.11 - CIE - Προτεινόμενες καμπύλες φασματικής ευαισθησίας για 2° και 10°

- - - Vb2 — Vb10

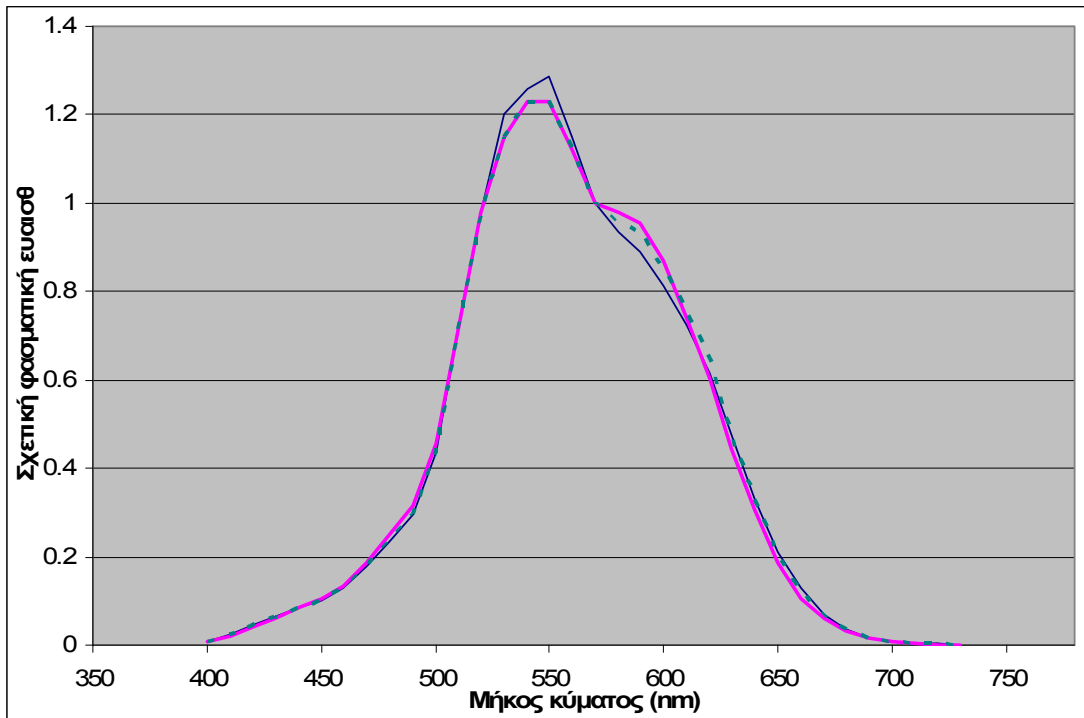
Οι τιμές και για τα δύο πεδία προέκυψαν με κυρίως με βάση τα αποτελέσματα από την έρευνα των Ikeda, Yaguchi και Sagawa, τα οποία δέχτηκαν ελάχιστη επεξεργασία κυρίως στις άκρες του φάσματος.

Όπως φαίνεται και στα σχήματα, διαφορές μεταξύ των καμπυλών του πεδίου 10° και 2°, εμφανίζονται κυρίως σε μήκος κύματος μικρότερου των 540 nm.

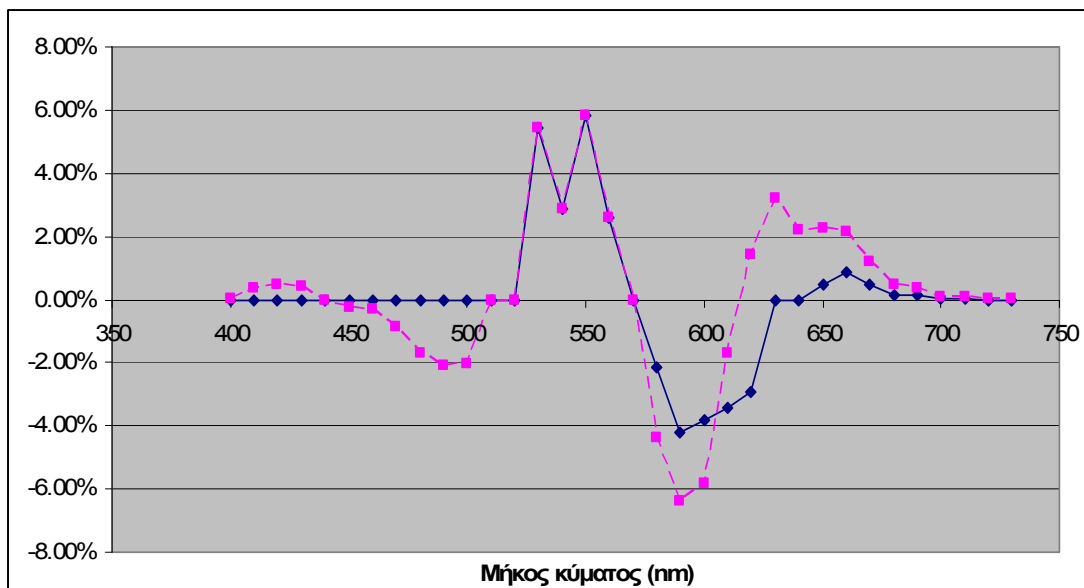
4.7.1 Σύγκριση των καμπυλών Vb2 και αποκλίσεις από της CIE



Σχήμα 4.15 – Σύγκριση καμπυλών φασματικής ευαισθησίας Vb₂ (log)
 ◆ CIE ■ Ikeda-Yaguchi-Sagawa ▲ Ikeda-Nakano

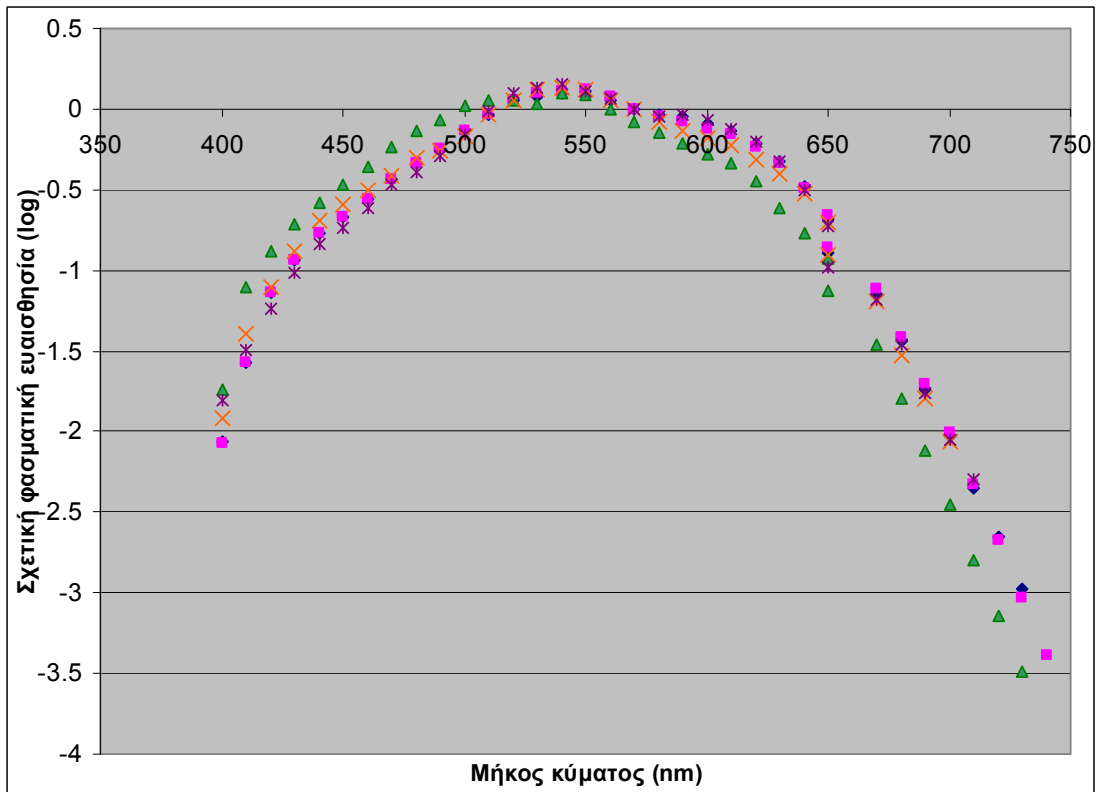


Σχήμα 4.16 – Σύγκριση καμπυλών φασματικής ευαισθησίας Vb2
 — CIE — Ikeda-Yaguchi-Sagawa - - - Ikeda-Nakano

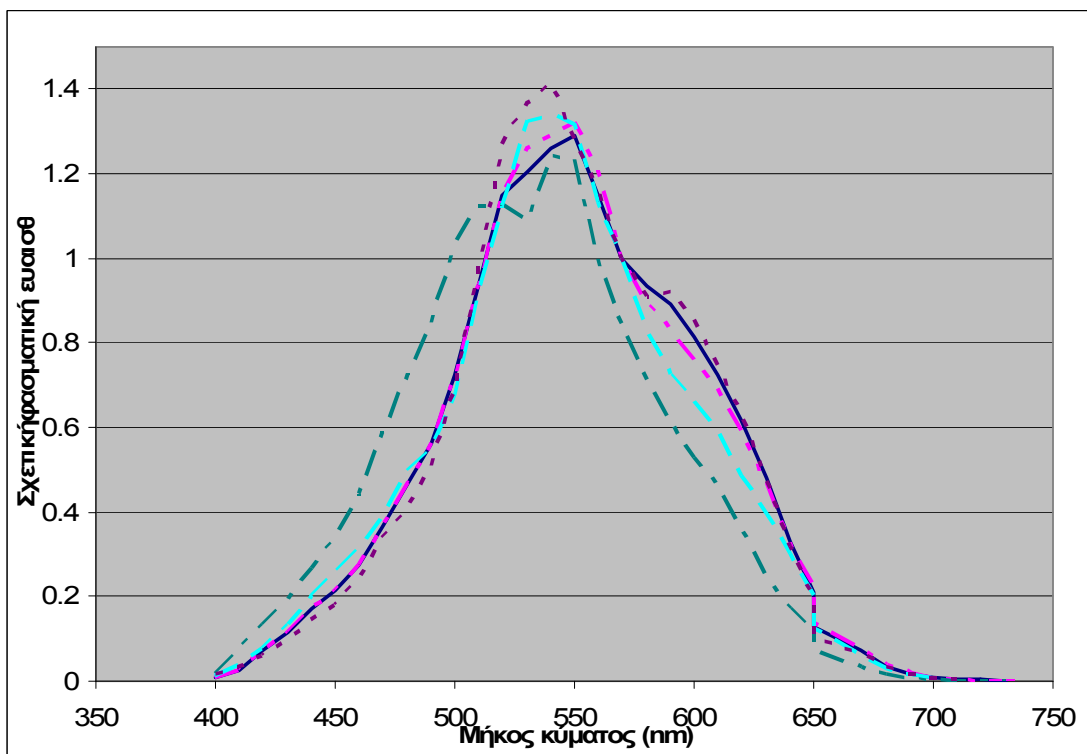


Σχήμα 4.17 – Ποσοστιαίες αποκλίσεις της Vb₂ από τις προτεινόμενες καμπύλες ευαισθησίας της CIE
 —◆— Ikeda-Nakano —■— Ikeda-Yaguchi-Sagawa

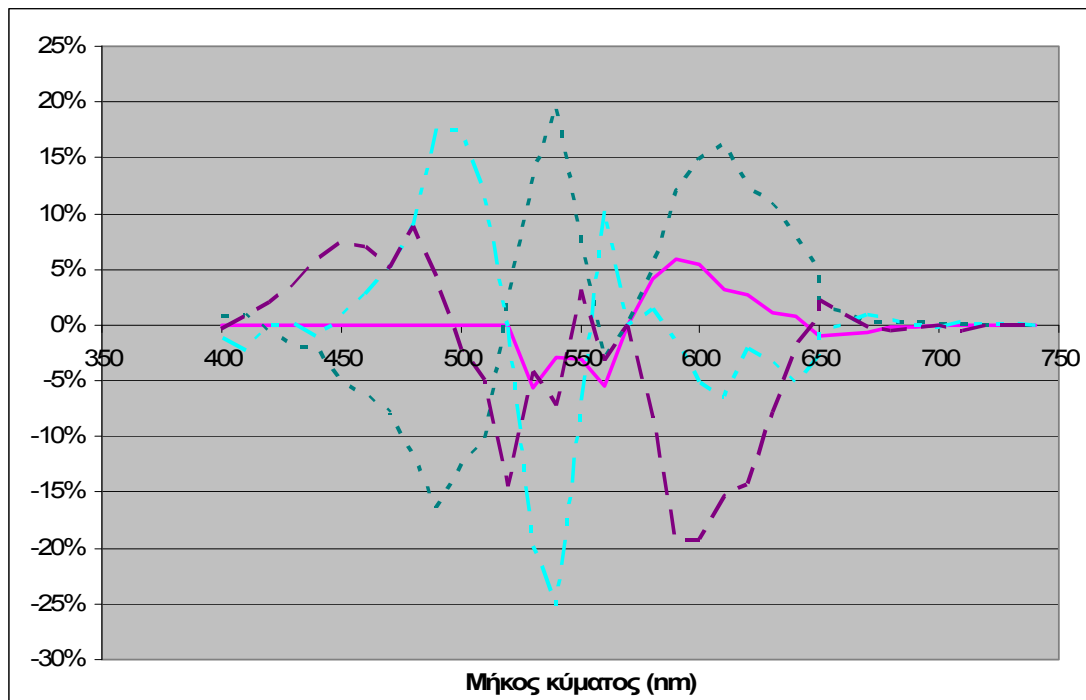
4.7.2. Σύγκριση των καμπυλών Vb10 και αποκλίσεις από της CIE



Σχήμα 4.12 – Σύγκριση καμπυλών φασματικής ευαισθησίας V_{b10} (log)
 ◆ CIE ■ Ikeda-Nakano ▲ Palmer × Sagawa-Takeichi * Ikeda-Yaguchi-Sagawa



Σχήμα 4.13 – Σύγκριση καμπυλών φασματικής ευαισθησίας V_{b10}
 — CIE - - - Ikeda - Nakano - - - Palmer
 - - - Sagawa - Takeichi - - - Ikeda - Yaguchi - Sagawa



Σχήμα 4.14 – Ποσοστιαίες αποκλίσεις της V_{b10} από τις προτεινόμενες καμπύλες ευαισθησίας της CIE

- Vb10 - Ikeda-Nakano
- - - Vb10 - Palmer
- · - · Vb10 - Sagava-Takeichi
- - - Vb10 - Ikeda-Yaguchi-Sagawa

5. Η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας στη σκοτοπική όραση³⁹

5.1. Εισαγωγή

Κατά καιρούς υπήρξαν διάφορες προσεγγίσεις της καμπύλης φασματικής ευαισθησίας στην σκοτοπική περιοχή. Αν και τα αποτελέσματα ήταν γενικά σύμφωνα, υπήρξαν αρκετές διαφορές μεταξύ τους και κατά συνέπεια ο επαναπροσδιορισμός της καμπύλης με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια κρίθηκε απαραίτητος. Σκοπός είναι να υπάρχουν διαθέσιμα αξιόπιστα στοιχεία για τον υπολογισμό της μεταφοράς μέσα από ενεργά φίλτρα, της φαινόμενης φωτεινότητας των χρωματικών πηγών κ.λπ., σε πολύ χαμηλά επίπεδα έντασης.

Στην ενότητα που ακολουθεί θα γίνει ανάλυση του πειράματος του B.H.Crawford. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μια τροποποιημένη μέθοδος της ταύτισης φωτεινότητας σε πολύ χαμηλή φωτεινότητα ($32,25 \cdot 10^{-6}$ cd/m²). Με τη βοήθεια μιας δευτερεύουσας έρευνας, προσεγγίστηκε η απόλυτη σκοτοπική καμπύλη. Μια άλλη έρευνα απέδειξε την επίδραση της ηλικίας στην ορατότητα. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε μια προοδευτική μείωση στην ευαισθησία στα μικρά μήκη κύματος ανάλογα με την αύξηση της ηλικίας. Η επίδραση αυτή γίνεται αρχικά αντιληπτή σε ηλικία περίπου 30 ετών. Τέλος, γίνεται μια λεπτομερής σύγκριση των παρόντων αποτελεσμάτων με εκείνα προηγούμενων ερευνητών και αναλύονται τα αίτια για τις όποιες παρατηρούμενες αποκλίσεις.

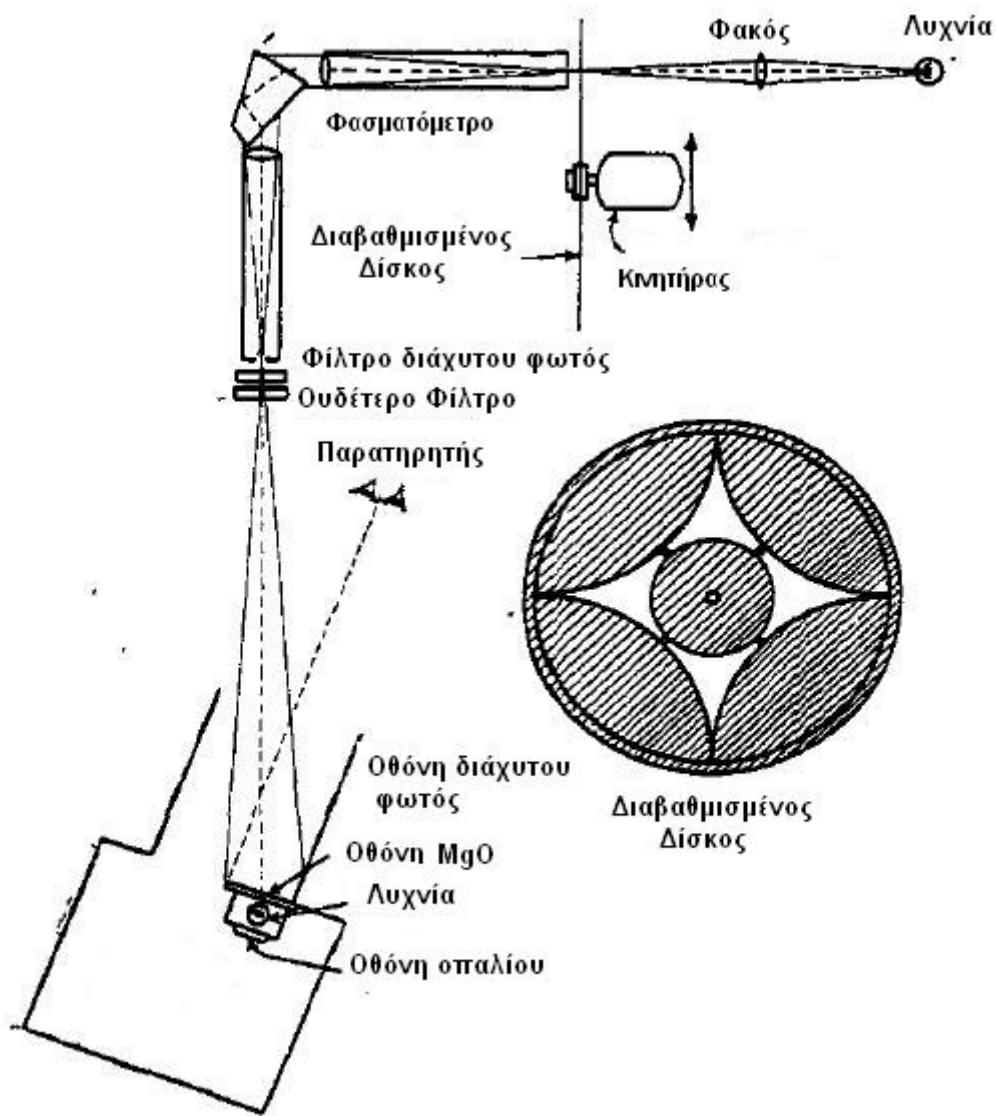
5.2. Γενικοί πειραματικοί όροι και διάταξη συσκευών

5.2.1. Συνθήκες όρασης

Έχοντας ως στόχο την αύξηση της ευαισθησίας καθώς και την επίτευξη όσο το δυνατόν πιο σκοτεινής προσαρμογής, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο φωτομετρικό πεδίο. Η διάμετρος του φωτομετρικού πεδίου σχημάτιζε γωνία 20° με το μάτι και διαιρέθηκε κάθετα σε δύο ίσα μέρη. Το επίπεδο έντασης ήταν $32,25 \cdot 10^{-6}$ cd/m², που ισοδυναμεί με 15 φορές το απόλυτο κατώφλι. Σε αυτές τις συνθήκες όλοι οι παρατηρητές μπορούσαν να κάνουν πραγματικές φωτομετρικές μετρήσεις χωρίς υπερβολική κούραση. Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι η απόλυτη σκοτοπική καμπύλη μπορεί να ληφθεί μόνο με τη μέθοδο του κατωφλίου, εντούτοις,

οι συνθήκες που περιγράφονται παραπάνω δίνουν μια πολύ ακριβή προσέγγιση της. Η προσέγγιση γίνεται ακόμα πιο ακριβής εστιάζοντας την προσοχή στην πάνω άκρη του τομέα καθώς γίνονται οι μετρήσεις. Έτσι, το μεγαλύτερο μέρος του πεδίου πέφτει πάνω στο βοθρίο εξόδου του αμφιβληστροειδή. Η διαφορά μεταξύ της καμπύλης που προέκυψε με τη συγκεκριμένη μέθοδο και της απόλυτης σκοτοπικής καμπύλης που καθορίστηκε με τη μέθοδο του κατωφλίου, μετρήθηκε για έναν μικρό αριθμό παρατηρητών και βρέθηκε αμελητέα εκτός από τα μεγάλα μήκη κύματος, όπου η διαφορά είναι της τάξης του 10%.

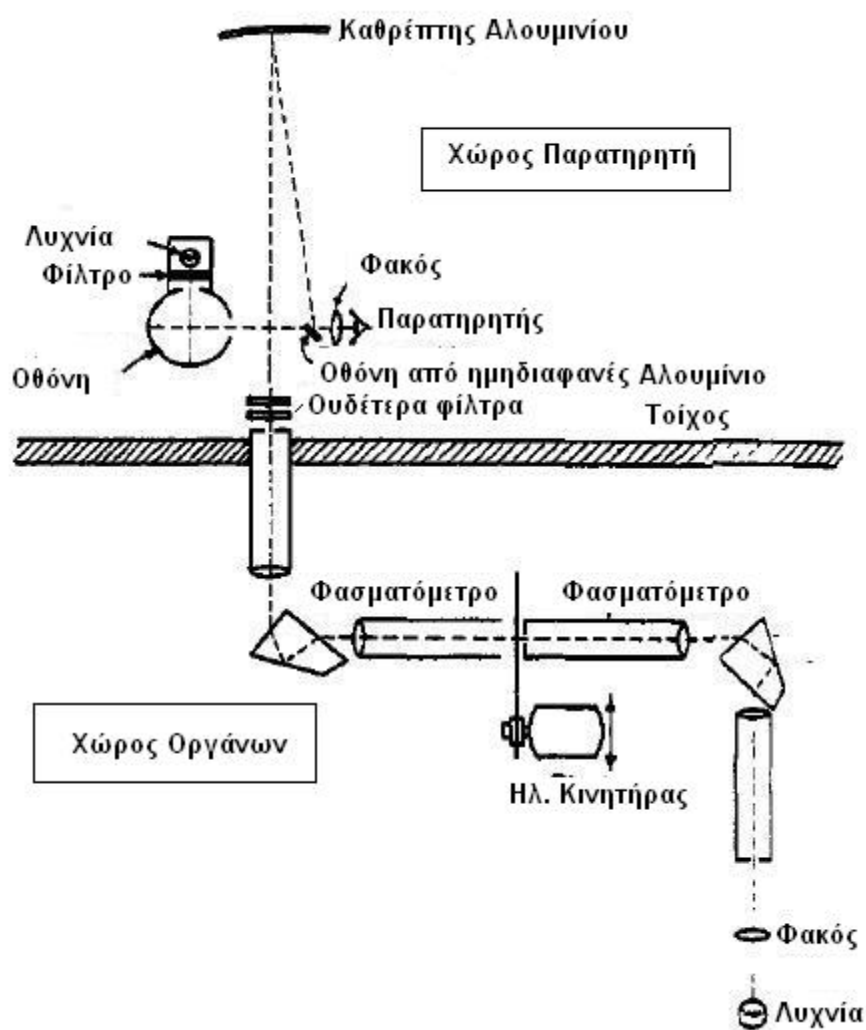
Όλες οι μετρήσεις έγιναν με φυσική κόρη ματιού, είτε εντελώς ανεμπόδιστα κατά τη χρήση διοπτρικής όρασης, είτε μέσω μιας κόρης εξόδου διαμέτρου 10 χιλ. κατά τη χρήση μονοφθαλμικής όρασης.



Σχήμα 5.1 - Πειραματική Διάταξη

5.2.2. Διάταξη

Στα σχήματα 1 και 2 φαίνεται η διάταξη των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν. Η δεύτερη διάταξη των συσκευών χρησιμοποιήθηκε στην κύρια σειρά των μετρήσεων προκειμένου η απόκλιση από την καμπύλη ορατότητας να ελαχιστοποιηθεί, με τις δεδομένες πειραματικές συσκευές, στα πολύ μικρά και στα πολύ μεγάλα μήκη κύματος. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην απομάκρυνση του περιττού φωτός με χρήση ειδικών φίλτρων (Σχήμα 5.1) ή με χρήση διπλού μονοχρωματικού συστήματος (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2 - Πειραματική Διάταξη

Κατά τις μετρήσεις σε χαμηλότερα μήκη κύματος, χρησιμοποιήθηκαν πρίσματα γυαλιού στα φασματόμετρα στη διάταξη II, με σκοπό την αύξηση της διαφάνειας στο ιώδες και στο υπεριώδες. Η χαμηλή σκέδαση είχε ως αποτέλεσμα

αυξημένη ευκρίνεια που αποτέλεσε πλεονέκτημα, καθώς για δεδομένο πλάτος σχισμής διαχεόταν μεγαλύτερη ποσότητα φωτός.

Η ένταση της ακτινοβολίας που εκπεμπόταν από το μονοχρωματικό σύστημα ρυθμίστηκε με ουδέτερα φίλτρα και έναν τομέα δίσκου με διαβαθμισμένο άνοιγμα που μπορούσε να παρεμβάλλεται στη διαδρομή της ακτίνας. Η μορφή του ανοίγματος που χρησιμοποιήθηκε τελικά φαίνεται στο σχ.1. Τα δύο πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, είναι τα εξής:

- Η ακρίβεια, καθώς όλα τα κομμάτια είναι μέρη κυκλικών δίσκων, σχήμα το οποίο μπορεί να κατασκευαστεί με μεγάλη ακρίβεια
- η επιφάνεια του ανοίγματος και η μεταδιδόμενη ακτινοβολία συνδέονται σχεδόν λογαριθμικά.

5.2.3. Φυσικές μετρήσεις.

Η ενέργεια της ακτινοβολίας που μεταδόθηκε από τις συσκευές για τα διαφορετικά μήκη κύματος μετρήθηκε άμεσα με μια θερμοστήλη σε συνδυασμό με έναν ενισχυτή γαλβανομέτρου. Επίσης, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, πραγματοποιούταν βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης της ενέργειας κάθε μήνα. Η μεταβολή της ισχύος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από το λαμπτήρα και το μονοχρωματικό σύστημα μεταβαλλόταν πολύ αργά, γι αυτό και δεν κρίθηκε απαραίτητη πιο συχνή βαθμονόμηση. Οι παράγοντες μεταφοράς των φυσικών φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν, μετρήθηκαν με τη βοήθεια ενός φωτοκύτταρου και ενός ενισχυτή.

5.2.4. Παρατηρητές

Οι προκαταρκτικές δοκιμές που εκτελέστηκαν σε ένα ευρύ φάσμα ηλικίας, με ποικίλους παρατηρητές (άνδρες και γυναίκες), έδειξαν ότι αύξηση της ηλικίας οδηγεί σε μείωση της ευαισθησίας στα μικρά μήκη κύματος (βλ. πίνακα 5.1).

Η μείωση αυτή της ευαισθησίας φαίνεται ότι είναι αμελητέα μέχρι την ηλικία των 30 και έτσι η κύρια σειρά μετρήσεων περιορίστηκε σε παρατηρητές κάτω των 30 ετών. Από τους εικοσιπέντε άνδρες και τις εικοσιπέντε γυναίκες που έλαβαν μέρος, οι περισσότεροι ήταν άπειροι σε φωτομετρικά πειράματα. Σημαντικότερο ρόλο όμως στην ακρίβεια και τη δυνατότητα επανάληψης έπαιξε η ευφυΐα και η συνεργασιμότητα παρά η εμπειρία. Κάθε παρατηρητής προσαρμόστηκε σε σκοτεινό περιβάλλον για μια ώρα πριν ξεκινήσει να παίρνει μετρήσεις, οι οποίες

Πίνακας 5.1 – Σχετική ορατότητα (log)

Μήκος κύματος (nm)	Ηλικίες				
	< 20	21-30	31.4	41.5	>51
	Μέση ηλικία				
	18.6	26.3	37.4	46.2	57.2
410	-1.335	-1.286	-1.382	-1.446	-1.539
420	-10.934	-0.943	-1.009	-1.057	-1.15
440	-10.445	-0.475	-0.519	-0.555	-0.627
460	-10.174	-0.214	-0.238	-0.254	-0.3
480	-10.06	-0.079	-0.082	-0.086	-0.112
500	0.01	-0.008	-0.002	-0.008	-0.011
520	-10.047	-0.024	-0.021	-0.013	-0.015
540	-10.198	-0.18	-0.171	-0.146	-0.158
560	-10.492	-0.47	-0.467	-0.464	-0.46
580	-10.943	-0.944	-0.932	-0.926	-0.92
600	-1.464	-0.465	-1.461	-1.452	-1.453
620	-2.111	-2.097	-2.084	-2.075	-2.079
640	-4.809	-2.785	-2.787	-2.772	-2.753
660	-3.444	-3.433	-3.397	-3.41	-2.381
680	-4.005	-4.03	-4.02	-4.03	-4.028

διήρκεσαν μια ώρα περίπου σύμφωνα με την ταχύτητα του παρατηρητή. Στους παρατηρητές έγινε μια προκαταρκτική δοκιμή και απορρίπτονταν εάν βρίσκονταν περισσότερο από 30% κάτω από τη μέση ευαισθησίας. Μόνο δύο ή τρεις παρατηρητές κρίθηκαν ακατάλληλοι. Τρεις παρατηρητές (άνδρες) παρουσίασαν μερική αχρωματοψία, αλλά αυτό δεν επηρέασε τελικά τη γενική μορφή των σκοτοπικών καμπυλών και συμπεριλήφθησαν στις μετρήσεις.

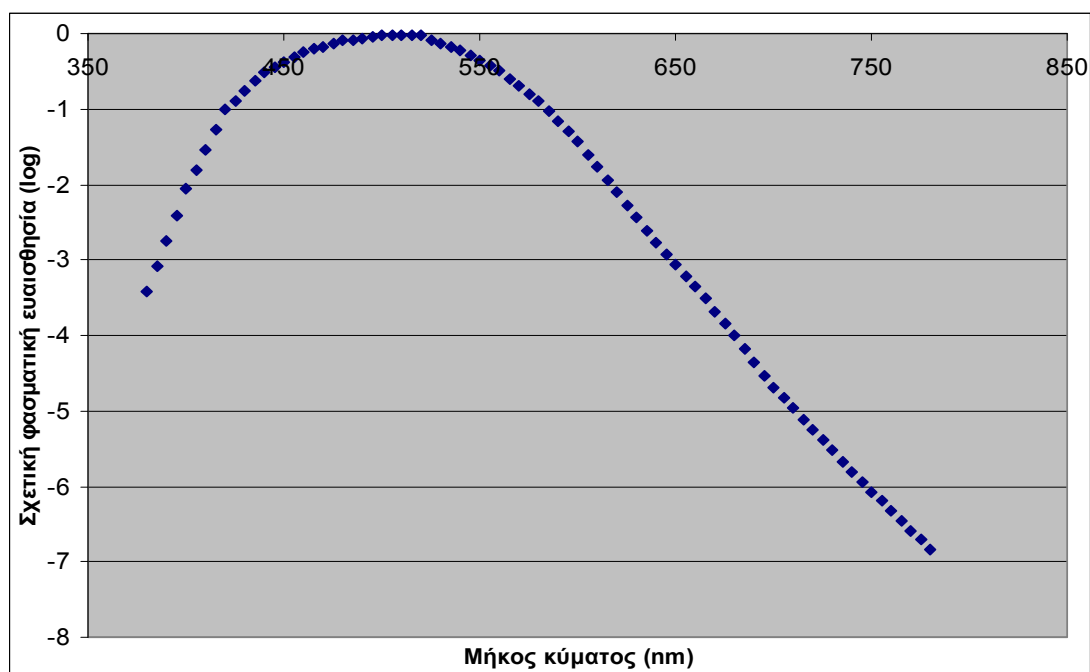
5.2.5. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αναλυτικά για όλους τους παρατηρητές κάτω των 30 αφορούν στη μονοοπτρική όραση. Εξέταση των αρχικών επιμέρους αποτελεσμάτων δείχνει ότι οι σειρές των μετρήσεων παρουσιάζουν αποκλίσεις. Αυτό οφείλεται στην παροδική αλλαγή της μορφής της καμπύλης που πιθανώς προκαλείται από πιθανές αλλαγές στη διατροφή των παρατηρητών. (Γι' αυτό το λόγο, έγιναν πειράματα, στα οποία έξι παρατηρητές επανέλαβαν προσεκτικά τον προσδιορισμό

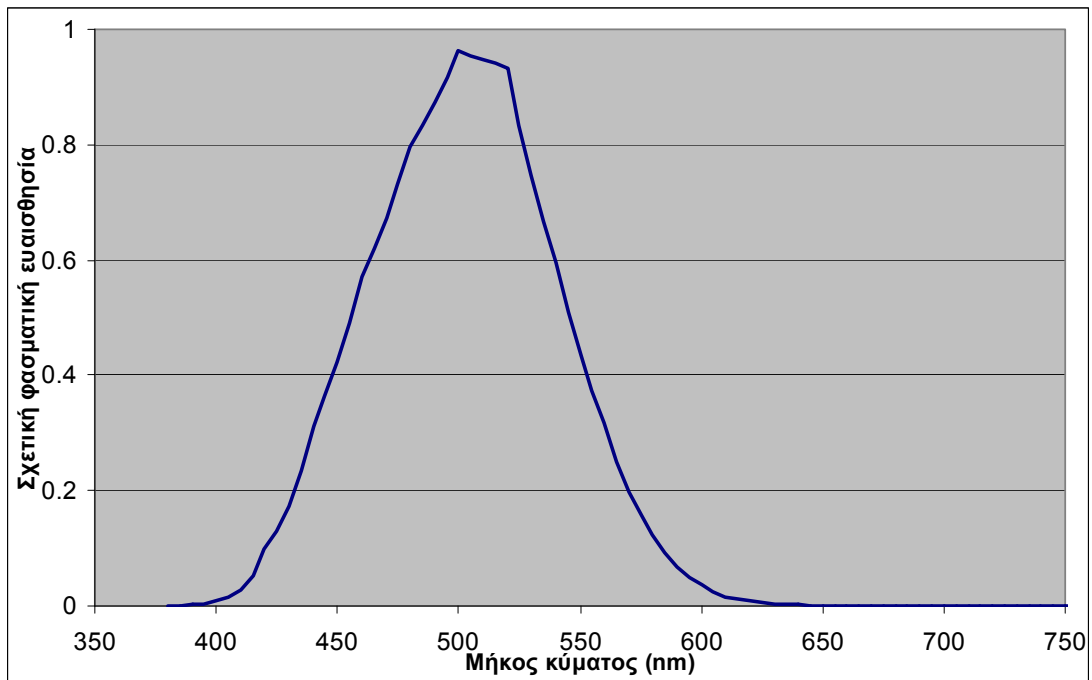
των σκοτοπικών καμπυλών για μία περίοδο δώδεκα μηνών ανά τριμηνιαία διαστήματα.)

Πίνακας 5.2 Μέση σκοτοπική ευαισθησία για 50 παρατηρητές

Μήκος κύματος	Ευαισθησία (log)	Ευαισθησία
380	-3.417	0.000383
400	-2.065	0.00861
420	-1.012	0.097275
440	-0.505	0.312608
460	-0.244	0.570164
480	-0.099	0.796159
500	-0.017	0.961612
520	-0.03	0.933254
540	-0.224	0.597035
560	-0.498	0.317687
580	-0.905	0.124451
600	-1.441	0.036224
620	-2.109	0.00778
640	-2.773	0.001687
660	-3.356	0.000441
680	-4.01	9.77E-05
700	-4.698	2E-05
720	-5.244	5.7E-06
740	-5.81	1.55E-06
760	-6.331	4.67E-07
780	-6.84	1.45E-07



Σχήμα 5.3 B.H.Crawford - Σχετική φασματική ευαισθησία (log)



Σχήμα 5.4 B.H.Crawford - Σχετική φασματική ευαισθησία

5.2.6 Σύγκριση της φωτομετρικής μεθόδου με τη μέθοδο του κατωφλίου

Τα πειράματα έγιναν σε ένα ευρέως φάσματος πεδίο, στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο φωτεινότητας. Για να υπολογιστεί το κατά πόσο η καμπύλη που προσδιορίστηκε, πλησιάζει την απόλυτη σκοτοπική καμπύλη, ορισμένοι παρατηρητές πραγματοποίησαν πειράματα με τη μέθοδο του κατωφλίου υπό τις εξής συνθήκες: κυκλικό πεδίο 10° , με κέντρο 10° κάτω από το σημείο παρατήρησης, με έκθεση διάρκειας ενός δευτερολέπτου κάθε τέσσερα δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 5.3.

Δε φαίνεται να υπάρχει κάποια ουσιώδης διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων και μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέση τιμή για την ευαισθησία που προκύπτει από τον πίνακα 5.3, αντιπροσωπεύει την πλήρη σκοτεινή προσαρμογή του αμφιβληστροειδούς του ματιού σε έναν υψηλό βαθμό προσέγγισης.

Πίνακας 5.3 Σύγκριση της φωτομετρικής μεθόδου με τη μέθοδο του κατωφλίου

Μήκος κύματος (nm)	Μέθοδος κατωφλίου	Φωτομετρική μέθοδος	Δ
400	-2.298	-2.315	-0.017
420	-1.104	-1.039	0.065
440	-0.528	-0.506	0.022
480	-0.104	-0.106	-0.002
500	-0.027	-0.022	0.005
520	0.003	-0.029	-0.032
540	-0.1	-0.225	-0.125
580	-0.896	-0.911	-0.015
620	-2.105	-2.141	-0.036
660	-3.431	-3.399	0.032
700	-4.768	-4.74	0.028
740	-5.89	-5.868	0.022
760	-6.481	-6.402	0.079

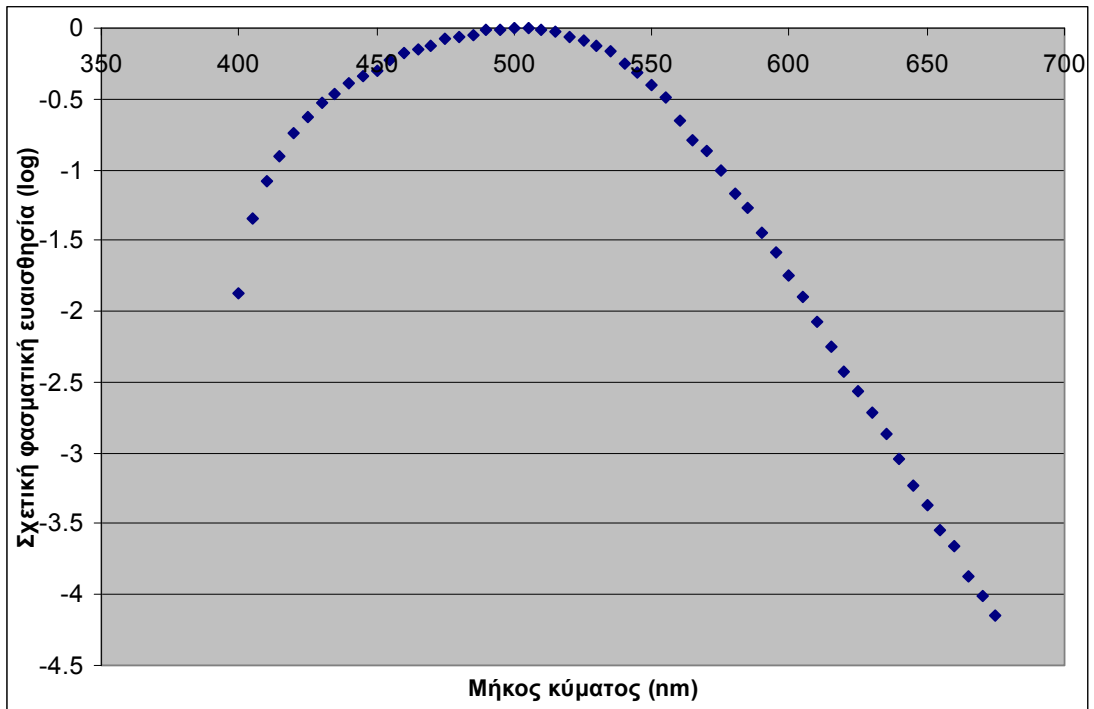
5.2.7 Σύγκριση με τα αποτελέσματα άλλων παρατηρητών

- Luckiesh & Taylor, 1943 (Illum. Eng. (N.Y.), 38, 189)

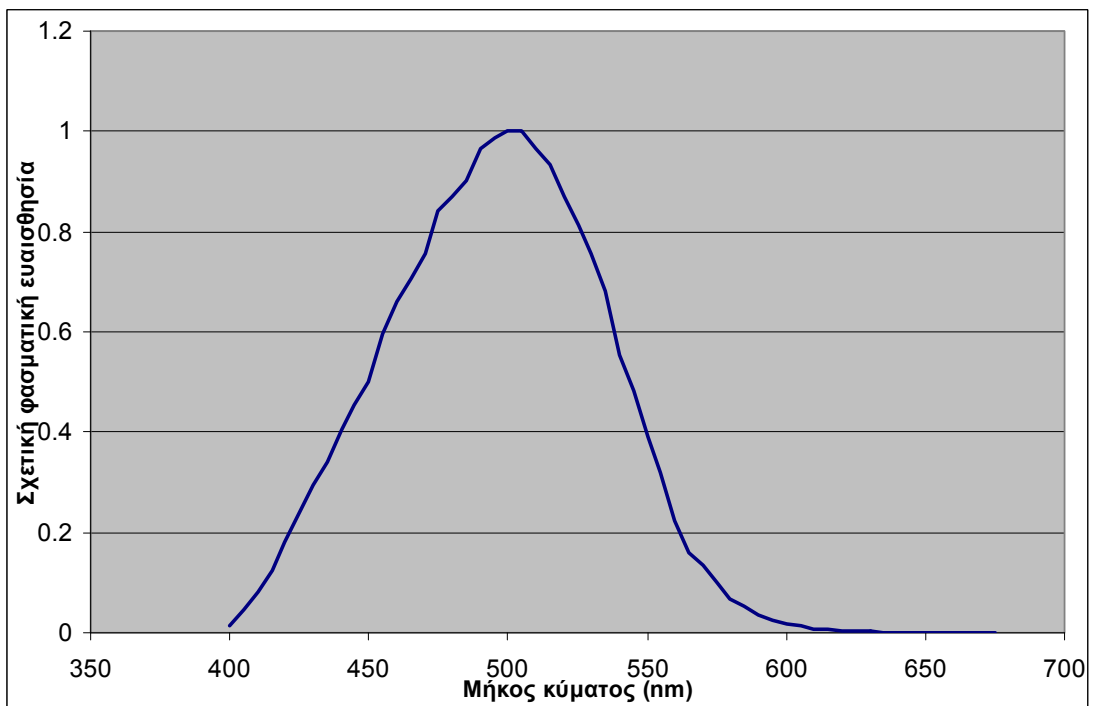
Οι μετρήσεις τους προσεγγίζουν αρκετά τις μετρήσεις που αναλύθηκαν παραπάνω. Δυστυχώς, δεν υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα στοιχεία για τις συνθήκες υπό τις οποίες διεξήχθησαν τα πειράματα. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του κατωφλίου, με πεδίο 2° μόνο, με άμεση προσαρμογή, συνθήκες δηλαδή που ενισχύουν την κωνική όραση. Επίσης, δεν υπάρχουν πληροφορίες για τον αριθμό των παρατηρητών και τις απαραίτητες φυσικές μετρήσεις.

Στο πείραμα αυτό, χρησιμοποιήθηκε μονοχρωματικό φως προερχόμενο από φίλτράρισμα ακτινοβολίας από λυχνία βολταϊκού τόξου υδράργυρου. Η όραση μετρήθηκε ως το αντίστροφο του κατωφλίου σε πεδίο διαμέτρου 1° , 8° πάνω από το σημείο προσαρμογής και με περιοδική έκθεση $1/25$ του δευτερολέπτου. Οι μετρήσεις του κ. Wald περιλαμβάνουν 2 ομάδες παρατηρητών, μία των 22 και μία των 52 ατόμων, με αποτελέσματα τα οποία βρίσκονται σε γενική συμφωνία. Επίσης, τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα σε ένα μεγάλο βαθμό με αυτά του B.H.Crawford, εκτός από τα μικρά μήκη κύματος όπου οι τιμές είναι αρκετά μικρότερες.

Η συγκεκριμένη απόκλιση πιθανώς οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες παρατήρησης καθώς και σε σφάλματα στις ενεργειακές μετρήσεις,

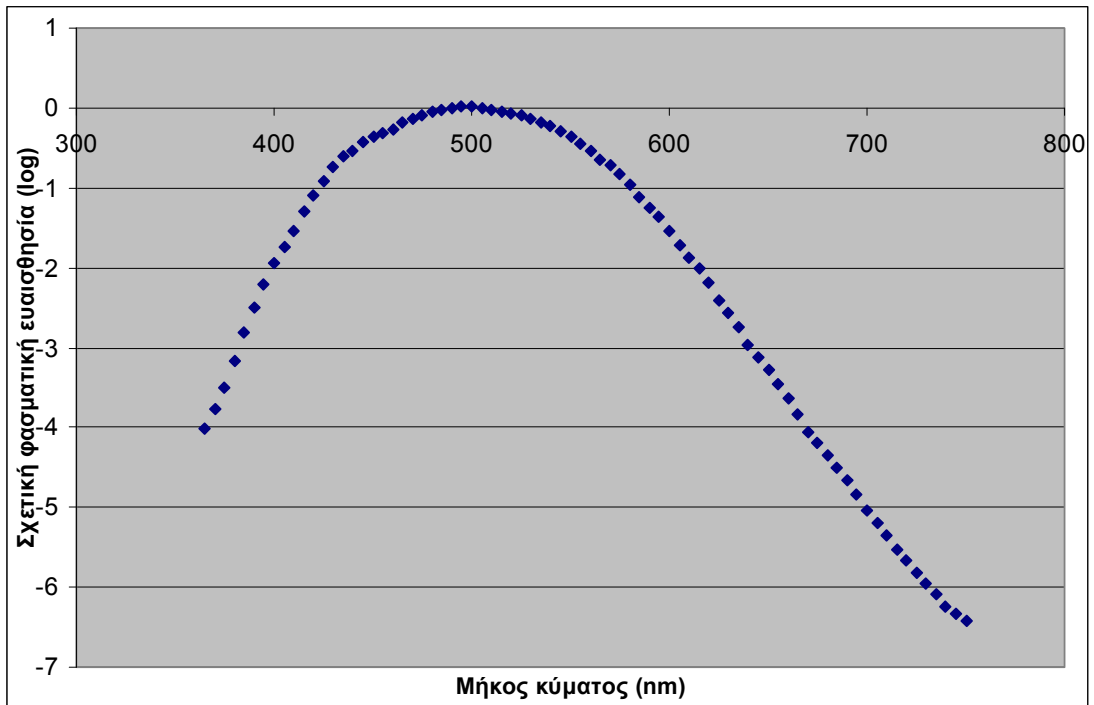


Σχήμα 5.5 - Luckiesh & Taylor - Σχετική φασματική ευαισθησία (log)

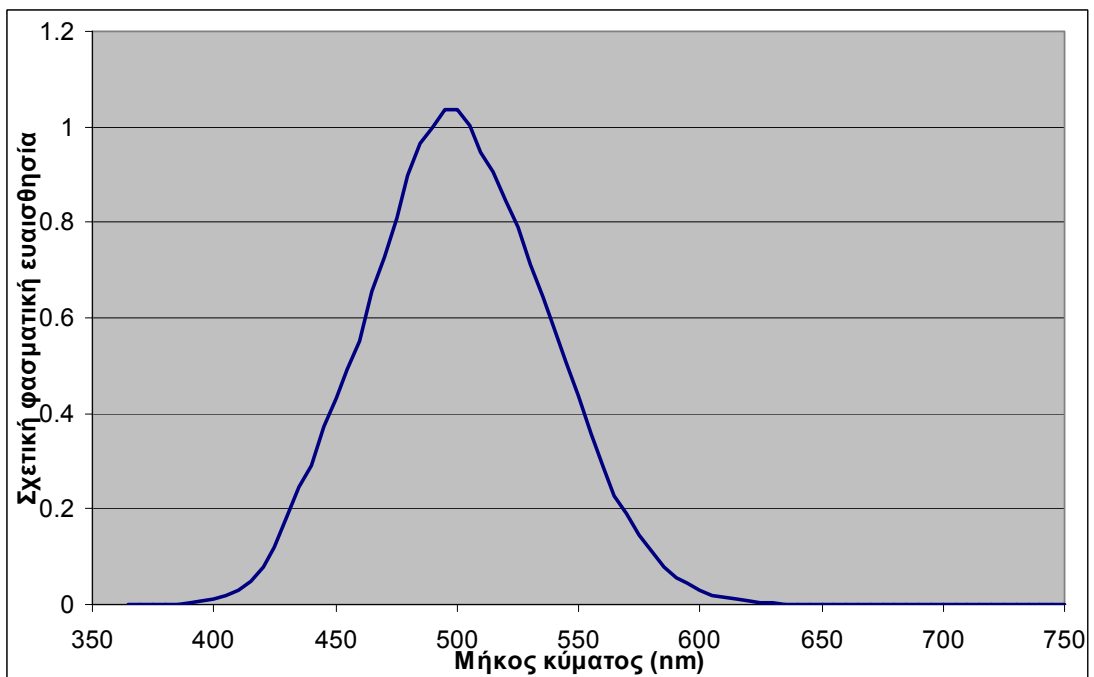


Σχήμα 5.6 - Luckiesh & Taylor - Σχετική φασματική ευαισθησία

- Wald, 1945 (Science, 101, 653-658)



Σχήμα 5.7 - Wald - Σχετική φασματική ευαισθησία (log)



Σχήμα 5.8 - Wald - Σχετική φασματική ευαισθησία

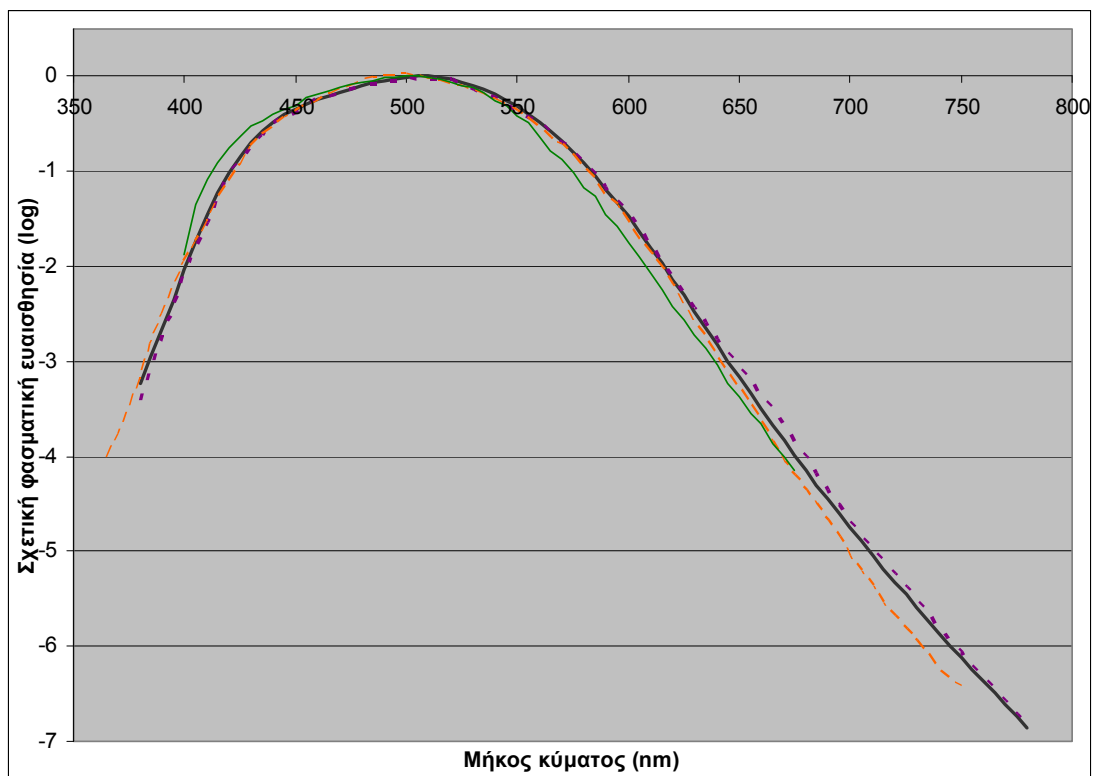
- Flamant & Stilew, 1948 (J.Physiol., 107, 187)

Φαίνεται να υπάρχει πλήρης ταύτιση των αποτελεσμάτων με αυτά που αναλύθηκαν παραπάνω. Δυστυχώς και σε αυτή τη περίπτωση, ο αριθμός των

παρατηρητών είναι πολύ μικρός ώστε να προκύψει μια αξιόπιστη μέση καμπύλη. Παρόλα αυτά, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς χρησιμοποιήθηκε διαφορετική μέθοδος από τις προηγούμενες. Η ορατότητα εδώ καθορίζεται από το αντίστροφο της ακτινοβολίας σε κάθε μήκος κύματος, που χρειάζεται για να αυξήσει το κατώφλι στο πράσινο από τα 490nm σε 10 φορές το απόλυτο κατώφλι.

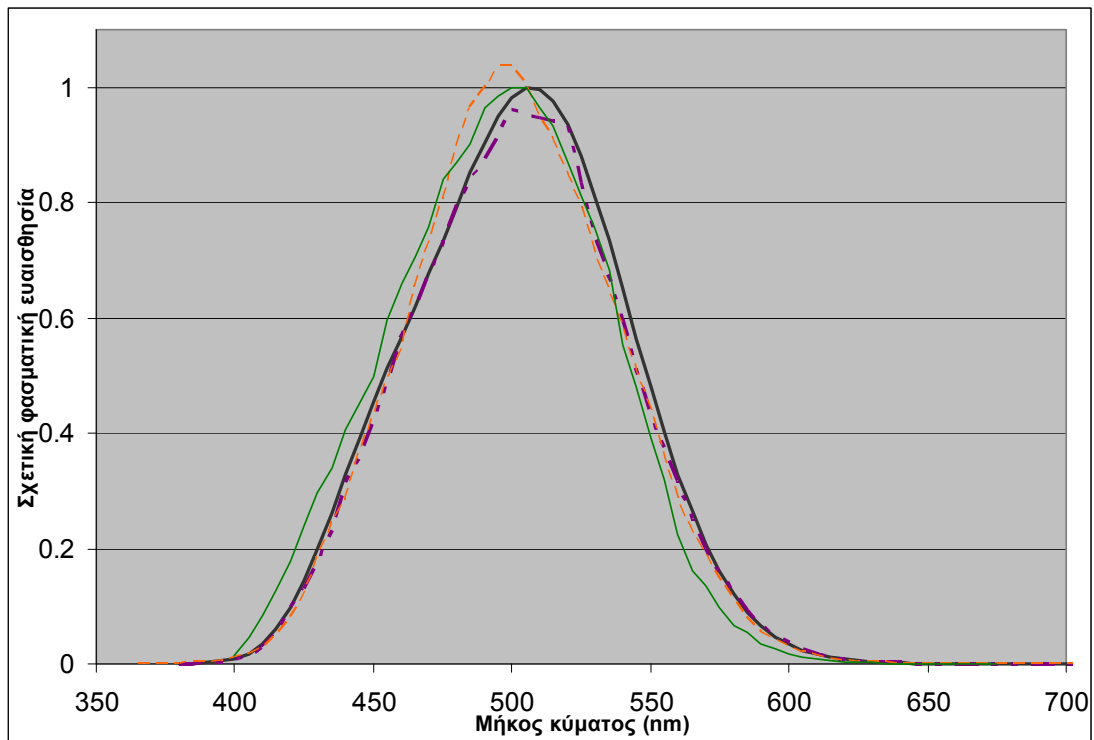
Στα σχήματα 5.9, 5.10 συγκρίνονται γραφικά τα αποτελέσματα των άλλων παρατηρητών με την $V'(\lambda)$, ενώ στο σχήμα 11 παρατίθενται οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των καμπυλών από την $V'(\lambda)$.

5.2.8 Σύγκριση με τις προτεινόμενες καμπύλες της CIE και ποσοστιαίες αποκλίσεις



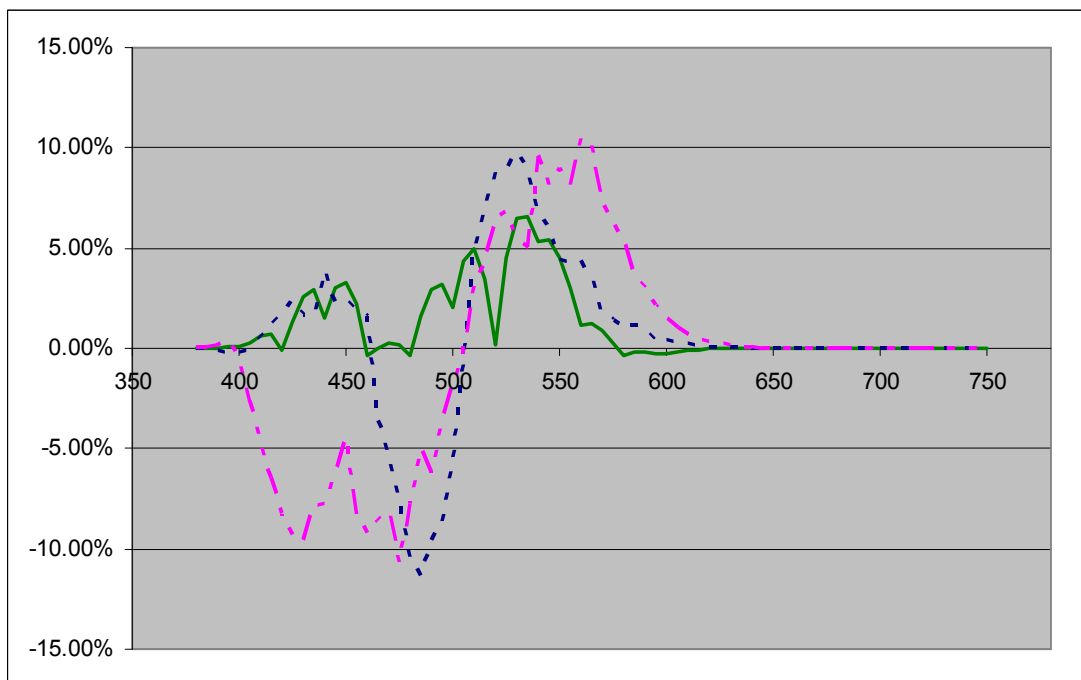
Σχήμα 5.9 – Σύγκριση καμπυλών φασματικής ευαισθησίας στη σκοτοπική όραση (log)

— $V'(\lambda)$ - - - Crawford — Wald — Luckiesh & Taylor



Σχήμα 5.10 – Σύγκριση καμπυλών φασματικής ευαισθησίας στη σκοτοπική όραση

— $V'(\lambda)$ - - - Crawford — Wald — Luckiesh & Taylor



Σχήμα 11 – Αποκλίσεις των καμπυλών φασματικής ευαισθησίας από την $V'(\lambda)$

— V' - Crawford - - - V' - Wald - - - V' - Luckiesh & Taylor

6. Συμπεράσματα – Επισημάνσεις

Πρέπει να επισημανθεί ότι όλες οι πειραματικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των φασματικών καμπύλων ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού, και ειδικότερα των καμπύλων για την φωτοπική και σκοτοπική όραση, είναι ακριβέστερες ακόμα και για την εποχή μας. Δίνουν μεγάλη σημασία στην γεωμετρία των διατάξεων, στους παράσιτους φωτισμούς καθώς και στην αυστηρότητα που καθορίζονται οι φασματικές κατανομές που χρησιμοποιούνται. Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ο μεγάλος αριθμός ατόμων που έλαβαν μέρος σε κάθε πείραμα όπως η μεγάλη χρονική διάρκεια των πειραμάτων.

Δυστυχώς πολλά από αυτά τα χαρακτηριστικά αυτά ελλείπουν από τις σύγχρονες έρευνες, χαρακτηριστικά αναφέρουμε αριθμό ατόμων, μη αυστηρό καθορισμό των φασματικών κατανομών των χρησιμοποιούμενων ακτινοβολιών.

Οι καμπύλες φασματικής ευαισθησίας που υιοθέτησε η CIE αποτελούν ένα συγκερασμό των καμπύλων που κατασκευάστηκαν από τους διάφορους ερευνητές. Όπως φαίνεται από τα σχήματα 3.9, 3.10, 3.11 για τη φωτοπική, 4.12, 4.13, 4.14 για την καμπύλη brightness 2 μοιρών, 4.15, 4.16, 4.17 για την καμπύλη brightness 10 μοιρών και 5.9, 5.10, 5.11 για τη σκοτοπική οι αποκλίσεις μεταξύ των ερευνητών είναι σημαντικές ιδιαίτερα μάλιστα για μικρά μήκη κύματος.

Μικρότερες αποκλίσεις υπάρχουν στη σκοτοπική καμπύλη. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι στη περιοχή αυτή της όρασης ενεργοποιείται ένα μόνο είδος φωτοανιχνευτών. Μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στην φωτοπική καμπύλη και στη καμπύλη brightness 2 μοιρών, ως αιτία μπορεί να θεωρηθεί ότι στη περιοχή αυτή ενεργοποιούνται τρία είδη φωτοανιχνευτών, κονία L, M και S δεδομένου ότι σε 2 μοίρες οπτικό άνοιγμα στον αμφιβληστροειδή δεν υπάρχουν ραβδία. Τέλος οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στη καμπύλη brightness 10 μοιρών. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί στη περίπτωση αυτή συμμετέχουν και τα τέσσερα είδη φωτοανιχνευτών, τα κονία κατά κύριο λόγο αλλά και τα ραβδία μερικώς. Οι αποκλίσεις αυτές τελικά μπορεί να αποδοθούν στις διαφορετικές μεθόδους που ακολουθηθήκαν καθώς και στο ότι ο κάθε άνθρωπος τελικά βλέπει με το δικό του χαρακτηριστικό τρόπο. Αυτό γίνεται εμφανές και στις μετρήσεις του Crawford, της Palmer, αλλά και άλλων ερευνητών, όπου φαίνονται οι αποκλίσεις από παρατηρητή σε παρατηρητή (Παράρτημα).

Τελικά θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι η φωτομετρία στηρίζεται σε μια σύμβαση, τη σύμβαση του τυπικού παρατηρητή. Ως τυπικό παρατηρητή ορίζουμε το παρατηρητή του οποίου οφθαλμός έχει καμπύλη φασματικής ευαισθησίας τις καμπύλες που είναι αποδεκτές από τη CIE. Ένας τέτοιος παρατηρητής μπορεί να μην υπάρχει στη πραγματικότητα, με τη βοήθεια του όμως είναι δυνατή η κατασκευή ενός φωτομετρικού συστήματος το οποίο να επιτρέπει τη κοινή «γλώσσα» ανάμεσα στους φωτομέτρους. Το γεγονός ότι κάθε άνθρωπος «βλέπει» με το δικό του τρόπο και μάλιστα διαφορετικό από αυτό που καθορίζεται από το τυποποιημένο φωτομετρικό σύστημα κάνει αναγκαία τη διάκριση ανάμεσα στην φωτεινή αντίληψη ενός ατόμου και τη φωτομετρική μέτρηση, επιβάλλοντας την διαφορετική αντιμετώπιση τους.

Παράρτημα

Παρακάτω παρατίθενται οι μετρήσεις από τους H. Katori και M.Fuwa⁴⁰ για τις έρευνες των οποίων δεν υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες, καθώς το αντίστοιχο άρθρο ήταν στην Ιαπωνική γλώσσα. Οι καμπύλες είναι κανονικοποιημένες στα 570nm. Αξιοσημείωτη είναι η απόκλιση στην καμπύλη 10 μοιρών με τη μέθοδο ταύτισης φωτεινότητας, που οφείλεται κυρίως στον παρατηρητή MF.

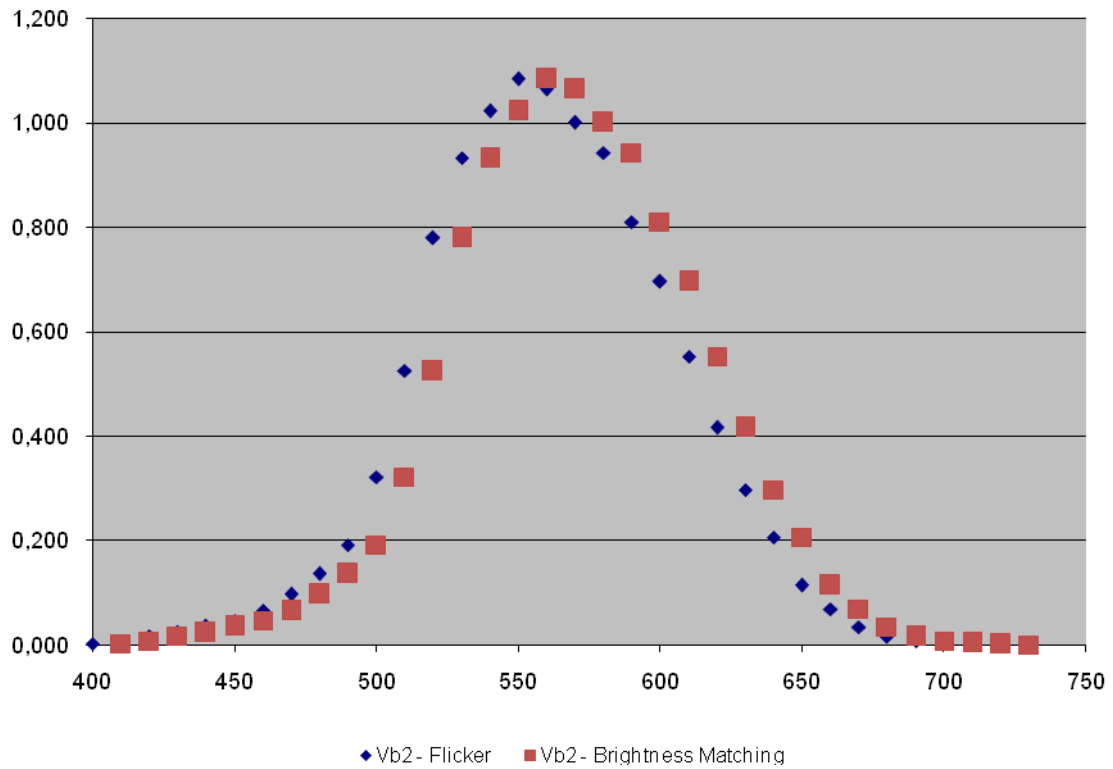
Τέλος, στους πίνακες A.5α, A.5β, A.6α, A.6β παρουσιάζονται οι μετρήσεις του Crawford και της Palmer χωρίς να έχουν δεχθεί οποιαδήποτε επεξεργασία ή κανονικοποίηση, όπου γίνονται επίσης εμφανείς οι διαφορές στην φασματική ευαισθησία μεταξύ των παρατηρητών

Πίνακας Α.1 – Katori - Fuwa - Σχετική Φασματική Ευαισθησία για πεδίο 2° - Flicker Photometry

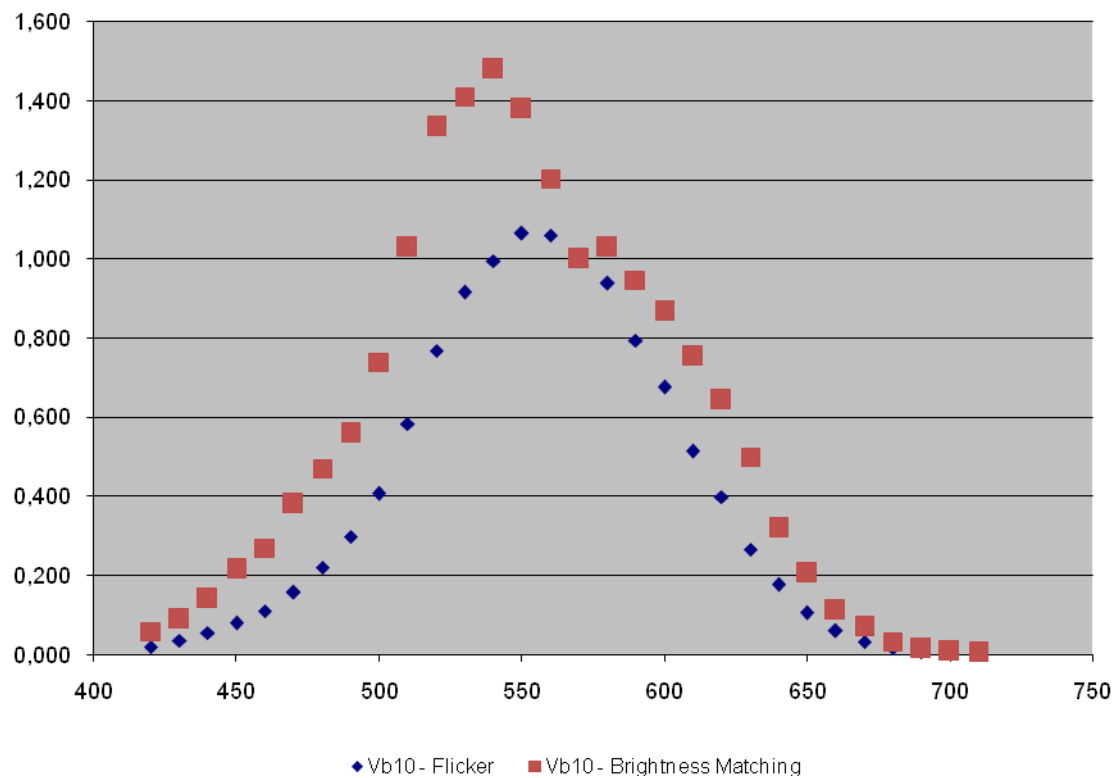
Μήκος Κύματος λ(nm)	Παρατηρητής (Ηλικία)						Μ.Ο.
	ΚΜ(20)	Τ S (20)	Υ S (36)	ΜF(39)	ΚΚ(45)	ΗΚ(55)	
400	0,006			0,002		0,004	0,004
410	0,017	0,013	0,006	0,006	0,002	0,007	0,009
420	0,037	0,029	0,014	0,010	0,005	0,014	0,018
430	0,046	0,039	0,017	0,013	0,009	0,021	0,024
440	0,057	0,069	0,020	0,025	0,014	0,034	0,037
450	0,079	0,083	0,029	0,032	0,020	0,044	0,048
460	0,104	0,109	0,043	0,044	0,035	0,064	0,066
470	0,154	0,142	0,063	0,071	0,059	0,094	0,097
480	0,211	0,180	0,099	0,099	0,081	0,151	0,137
490	0,277	0,277	0,137	0,149	0,120	0,193	0,192
500	0,478	0,424	0,253	0,219	0,234	0,325	0,322
510	0,604	0,618	0,505	0,433	0,466	0,523	0,525
520	0,924	0,854	0,722	0,687	0,680	0,813	0,780
530	0,967	0,968	0,943	0,923	0,891	0,901	0,932
540	1,101	1,040	1,033	1,025	0,979	0,955	1,022
550	1,101	1,082	1,107	1,105	1,097	1,006	1,083
560	1,005	1,065	1,114	1,062	1,076	1,063	1,064
570	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
580	0,905	0,931	0,949	0,985	0,900	0,984	0,942
590	0,780	0,800	0,821	0,803	0,798	0,861	0,811
600	0,664	0,669	0,683	0,723	0,720	0,719	0,696
610	0,534	0,501	0,578	0,536	0,575	0,594	0,553
620	0,407	0,387	0,406	0,411	0,437	0,450	0,416
630	0,276	0,274	0,331	0,285	0,292	0,329	0,298
640	0,205	0,185	0,225	0,202	0,215	0,208	0,207
650	0,117	0,109	0,111	0,108	0,111	0,135	0,115
660	0,065	0,060	0,077	0,063	0,071	0,084	0,070
670	0,033	0,040	0,034	0,035	0,032	0,038	0,035
680	0,017	0,015	0,019	0,016	0,019	0,018	0,017
690	0,009	0,008	0,008	0,008	0,009	0,009	0,008
700	0,005	0,004	0,005	0,004	0,004	0,005	0,005
710	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
720	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
730	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000

Πίνακας Α.2– Katori - Fuwa - Σχετική Φασματική Ευαισθησία για πεδίο 2° -
Hheterochromatic Brightness Matching

Μήκος Κύματος	Παρατηρητής					(Ηλικία)	
	ΚΜ(20)	Τ S (20)	Υ S (36)	ΜF(39)	ΚΚ(45)	ΗΚ(55)	Μ.Ο.
400	0,009			0,005		0,008	0,007
410	0,028	0,017	0,011	0,019	0,003	0,015	0,015
420	0,057	0,045	0,026	0,041	0,008	0,028	0,034
430	0,095	0,065	0,036	0,068	0,019	3.522E-2 1	0,053
440	0,116	0,101	0,039	0,115	0,032	0,070	0,079
450	0,123	0,140	0,066	0,132	0,047	0,085	0,099
460	0,182	0,170	0,070	0,260	0,063	0,123	0,144
470	0,235	0,242	0,109	0,348	0,113	0,180	0,204
480	0,308	0,306	0,187	0,467	0,148	0,248	0,277
490	0,373	0,410	0,196	0,583	0,195	0,350	0,351
500	0,731	0,570	0,330	0,600	0,400	0,467	0,516
510	0,954	0,832	0,705	1,181	0,790	0,863	0,887
520	1,228	1,040	0,946	1,482	1,039	1,135	1,145
530	1,484	1,305	1,274	2,005	1,371	1,163	1,434
540	1,546	1,326	1,353	1,755	1,297	1,166	1,407
550	1,529	1,209	1,493	1,464	1,335	1,240	1,378
560	1,249	1,106	1,151	1,284	1,227	1,051	1,178
570	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
580	1,031	0,967	0,856	0,887	0,979	0,919	0,940
590	1,006	0,823	0,900	0,801	0,878	0,911	0,887
600	0,973	0,819	0,697	0,740	0,800	0,778	0,801
610	0,778	0,683	0,569	0,584	0,753	0,638	0,667
620	0,648	0,581	0,354	0,530	0,611	0,549	0,546
630	0,565	0,486	0,280	0,334	0,397	0,434	0,416
640	0,372	0,347	0,179	0,243	0,270	0,247	0,276
650	0,214	0,175	0,104	0,126	0,149	0,181	0,158
660	0,111	0,105	0,072	0,090	0,101	0,099	0,096
670	0,054	0,062	0,036	0,050	0,040	0,036	0,046
680	0,034	0,024	0,014	0,024	0,029	0,021	0,024
690	0,012	0,011	0,007	0,010	0,015	0,011	0,011
700	0,007	0,007	0,004	0,005	0,008	0,008	0,006
710	0,003	0,003	0,001	0,003	0,003	0,003	0,003
720	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
730	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001



Σχήμα Α.1 – Katori - Fuwa - Σχετική Φασματική Ευαισθησία για πεδίο 2°



Σχήμα Α.2 - Katori - Fuwa - Σχετική Φασματική Ευαισθησία για πεδίο 10°

Πίνακας Α.3 – Katori - Fuwa - Σχετική Φασματική Ευαισθησία για πεδίο 10° - Flicker Photometry

Μήκος Κύματος λ(nm)	Παρατηρητής (Ηλικία)				Μ.Ο.
	ΚΜ(20)	Τ S (20)	Μ F (39)	ΚΚ(45)	
420	0,024	0,026	0,017	0,009	0,019
430	0,044	0,043	0,029	0,025	0,035
440	0,064	0,073	0,045	0,040	0,056
450	0,098	0,103	0,055	0,063	0,080
460	0,132	0,137	0,084	0,087	0,110
470	0,186	0,194	0,133	0,117	0,158
480	0,248	0,276	0,198	0,162	0,221
490	0,333	0,368	0,262	0,231	0,298
500	0,449	0,509	0,331	0,338	0,407
510	0,605	0,666	0,567	0,493	0,583
520	0,749	0,885	0,770	0,667	0,768
530	0,892	0,964	0,966	0,839	0,915
540	1,002	1,040	1,011	0,927	0,995
550	1,092	1,093	1,041	1,029	1,064
560	1,060	1,060	1,078	1,043	1,060
570	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
580	0,937	0,937	0,899	0,977	0,938
590	0,786	0,792	0,820	0,775	0,793
600	0,664	0,658	0,701	0,682	0,676
610	0,482	0,513	0,530	0,531	0,514
620	0,384	0,419	0,413	0,376	0,398
630	0,273	0,263	0,285	0,240	0,265
640	0,159	0,185	0,198	0,167	0,177
650	0,099	0,106	0,128	0,089	0,106
660	0,055	0,061	0,068	0,059	0,061
670	0,031	0,032	0,037	0,030	0,033
680	0,017	0,016	0,020	0,017	0,017
690	0,007	0,008	0,009	0,007	0,008
700	0,004	0,004	0,005	0,003	0,004
710	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002

Πίνακας Α.4 – Katori - Fuwa - Σχετική Φασματική Ευαισθησία για πεδίο 10° - Heterochromatic Brightness Matching

Μήκος Κύματος λ(nm)	Παρατηρητής (Ηλικία)				M.O.
	KM(20)	T S (20)	M F (39)	KK(45)	
420	0,046	0,064	0,107	0,020	0,059
430	0,076	0,081	0,138	0,067	0,090
440	0,100	0,133	0,198	0,134	0,141
450	0,138	0,187	0,361	0,179	0,216
460	0,185	0,251	0,397	0,244	0,269
470	0,299	0,330	0,562	0,336	0,382
480	0,374	0,373	0,764	0,371	0,471
490	0,511	0,469	0,837	0,420	0,559
500	0,639	0,689	1,055	0,575	0,740
510	0,856	0,943	1,477	0,838	1,029
520	1,093	1,070	2,024	1,144	1,333
530	1,213	1,226	1,936	1,264	1,410
540	1,270	1,219	1,874	1,556	1,480
550	1,287	1,191	1,591	1,445	1,379
560	1,142	1,041	1,353	1,270	1,202
570	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
580	0,972	1,071	1,058	1,018	1,030
590	0,896	0,819	1,090	0,984	0,947
600	0,785	0,767	1,109	0,809	0,867
610	0,719	0,660	0,988	0,651	0,754
620	0,487	0,703	0,795	0,591	0,644
630	0,397	0,591	0,546	0,463	0,499
640	0,248	0,323	0,381	0,328	0,320
650	0,142	0,238	0,295	0,147	0,206
660	0,077	0,152	0,108	0,110	0,112
670	0,047	0,119	0,066	0,045	0,069
680	0,023	0,048	0,034	0,029	0,033
690	0,011	0,023	0,015	0,014	0,016
700	0,007	0,012	0,008	0,007	0,008
710	0,003	0,006	0,006	0,004	0,005

Πίνακας Α.5α - Β.Η. Crawford³⁹ - Σχετική Φασματική Ευαισθησία

Wave-length (μ)	Men											Mean										
	Observer : G W	J W.C.	J T.	M A.L.	W.G.G.	K.H.S.	G.D.D.	G.G.T.	R.B.S.	Age :	27		20	28	17	29	24	26	20	26	26	24.1
0.41	2.756	2.763	2.838	2.689	2.638	2.594	2.806	2.672	2.670	2.714												
0.42	1.065	1.072	1.101	1.142	1.015	1.015	1.088	1.078	1.011	1.059												
0.44	1.564	1.537	1.530	1.609	1.506	1.495	1.540	1.541	1.480	1.534												
0.46	1.764	1.809	1.795	1.832	1.810	1.773	1.804	1.796	1.765	1.795												
0.48	1.956	1.924	1.917	1.941	1.924	1.918	1.940	1.944	1.905	1.930												
0.50	1.985	1.992	1.986	1.985	0.003	1.986	1.996	0.003	0.009	1.994												
0.52	1.975	1.973	1.982	1.971	1.976	1.992	1.983	1.964	1.950	1.974												
0.54	1.767	1.801	1.874	1.824	1.822	1.815	1.832	1.815	1.811	1.818												
0.56	1.493	1.516	1.523	1.513	1.528	1.527	1.525	1.519	1.505	1.517												
0.58	1.029	1.049	1.094	1.037	1.093	1.059	1.035	1.102	1.000	1.055												
0.60	2.521	2.523	2.600	2.627	2.535	2.502	2.504	2.570	2.504	2.543												
0.62	3.928	3.892	3.923	3.953	3.910	3.911	3.921	3.877	3.887	3.911												
0.64	3.217	3.216	3.259	3.215	3.194	3.242	3.243	3.185	3.215	3.221												
0.66	4.536	4.555	4.616	4.568	4.534	4.607	4.614	4.582	4.614	4.581												
0.68	5.882	5.875	4.096	4.070	5.871	5.985	4.015	4.042	5.974	5.979												

Πίνακας Α.5β - Β.Η.Crawford³⁹ - Σχετική Φασματική Ευαισθησία

Wave-length (μ)	Log (Relative Visibility)										Mean						
	Women																
Observer : V.T.	V.T.	V.M.S.	S M I	V.M.S.	V.T.	J.B.J.	M.J.G.	P.A.L.	M.W.	P.A.C.	Y.V.L.	J.B.	D.N.A.	D.P.C.	M.C.P.	N.H.	Mean
Age :	26	30	18	30	22	18	19	18	19	20	18	18	22	30	18	25	21.4
0.41	2.775	2.606	2.514	2.606	2.851	2.801	2.625	2.546	2.693	2.714	2.561	2.586	2.718	2.657	2.816	2.621	2.672
0.42	1.093	1.073	1.026	1.073	1.169	1.147	1.052	1.024	1.039	1.044	1.033	1.014	1.074	1.032	1.109	1.095	1.062
0.44	1.507	1.441	1.496	1.441	1.638	1.559	1.511	1.613	1.539	1.564	1.559	1.559	1.529	1.496	1.539	1.555	1.540
0.46	1.791	1.703	1.776	1.703	1.818	1.826	1.858	1.839	1.816	1.864	1.859	1.762	1.790	1.784	1.831	1.802	1.808
0.48	1.907	1.940	1.923	1.940	1.935	1.954	1.967	1.927	1.901	1.953	1.967	1.940	1.907	1.905	1.922	1.894	1.929
0.50	1.973	0.015	0.001	0.015	1.997	1.998	0.010	1.987	0.016	0.014	1.981	0.021	1.994	1.972	0.002	1.994	1.998
0.52	1.995	1.904	1.981	1.904	1.987	1.974	1.933	1.944	1.968	1.950	1.923	1.900	1.974	1.996	1.957	1.974	1.957
0.54	1.790	1.777	1.815	1.777	1.819	1.820	1.786	1.801	1.800	1.830	1.809	1.785	1.849	1.811	1.761	1.869	1.808
0.56	1.526	1.488	1.492	1.488	1.599	1.549	1.459	1.529	1.529	1.500	1.505	1.482	1.522	1.517	1.481	1.572	1.517
0.58	1.023	1.020	1.094	1.020	1.143	1.086	1.013	1.108	1.082	1.062	1.073	2.981	1.034	1.096	1.016	1.037	1.058
0.60	2.479	2.553	2.497	2.553	2.609	2.546	2.457	2.502	2.516	2.568	2.536	2.517	2.492	2.584	2.562	2.537	2.530
0.62	3.889	3.839	3.893	3.839	3.944	3.930	3.890	3.937	3.878	3.894	3.814	3.814	3.874	3.890	3.888	3.900	3.885
0.64	3.168	3.095	3.258	3.095	3.297	3.249	3.123	3.181	3.169	3.216	3.139	3.191	3.183	3.245	3.215	3.208	3.196
0.66	4.506	4.457	4.657	4.457	4.632	4.615	4.548	4.604	4.496	4.513	4.489	4.476	4.532	4.543	4.568	4.654	4.553
0.68	5.797	5.947	5.978	5.947	4.107	5.954	4.123	4.024	5.942	5.917	5.926	5.996	5.996	5.913	4.094	4.060	5.985

Πίνακας Α.6 – D.A. Palmer²⁹ - Κατηγορία παρατηρητών Νο.1

Table 1. Visibility Functions of Wavelength for Observers of Type 1^a

Name	SM*	JW	JC	JC*	YM	JR	DP	KG	DB	JC	CP	BC
Sex	F	M	M	F	M	F	M	M	M	M	M	M
Age	19	26	28	28	29	34	38	39	42	44	50	67
Eye	R	L	R	R	R	R	R	R	R	L	R	R
Refraction	-	-	-2	-	-2	-	-3	-	-	-	-2	+1
Field	U	U	D	D	D	U	D	D	U	D	U	U
Wavelength (nm)												
741	2.22 ^{1-1/2}	2.20 ^{1-1/2}	2.35 ^{1-1/2}	2.36 ^{1-1/2}	2.39 ^{1-1/2}	2.27 ^{1-1/2}	2.32 ¹	2.45 ^{1-1/2}	2.49 ^{1-1/2}	2.66 ^{1-1/2}	2.13 ^{1-1/2}	2.42 ^{1-1/2}
714	3.18 ^{1/2}	3.05 ¹	3.36 ¹	3.36 ^{1/2}	3.51 ^{1/2}	3.40 ^{1/2}	3.17 ^{1/2}	3.53 ^{1/2}	3.28 ^{1/2}	2.95	2.24 ^{1/2}	3.32 ¹
690	4.13	4.15	3.87	4.25	3.98	3.98	4.13	4.30	4.73	4.62	3.99	4.21
667	4.67	4.69	4.89	5.18	4.35	5.09	4.78	5.06	4.89	5.01	4.79	4.68
645	5.16	5.33	5.19	5.42	4.65	5.28	5.22	5.42	5.23	5.37	5.10	5.27
645	5.09	5.42	5.32	5.48	4.89	5.48	5.34	5.46	5.06	5.31	5.25	5.80
625	5.29	5.46	5.59	5.65	5.32	5.57	5.54	5.75	5.53	5.61	5.48	5.55
606	5.43	5.65	5.67	5.79	5.91	5.87	5.72	5.78	5.52	5.76	5.64	5.99
588	5.72	5.83	5.89	5.93	5.85	5.86	5.85	5.80	5.82	5.82	5.72	5.89
571	5.90	6.03	5.94	6.03	5.85	6.00	5.89	5.78	5.97	5.90	5.80	6.01
556	5.96	5.98	6.01	6.04	5.99	6.53	5.92	5.87	6.06	5.98	5.86	6.02
540	5.64	5.96	6.12	6.06	5.79	6.19	5.85	5.86	5.68	6.05	5.79	5.83
526	5.73	5.79	5.98	6.00	5.83	6.26	5.81	5.93	6.10	6.01	5.74	5.93
526	5.70	5.79	6.11	6.07	6.05	6.23	5.92	6.07	6.22	6.12	5.85	6.03
513	5.59	5.78	5.96	6.16	5.83	6.10	5.66	5.69	5.68	5.76	5.69	5.68
500	5.73	5.79	5.72	5.84	5.61	5.98	5.50	5.70	6.18	5.97	5.69	5.44
488	5.79	5.43	5.63	5.88	5.64	5.85	5.36	5.20	5.75	5.62	5.70	5.40
476	5.49	5.20	5.67	5.71	5.40	5.73	5.20	5.16	5.43	5.62	5.21	5.45
465	4.90	4.83	5.55	5.38	5.48	5.52	5.03	5.01	5.09	5.19	5.33	4.67
454	4.79	5.21	5.30	4.96	5.08	5.34	4.79	4.84	5.22	4.85	4.83	4.79
444	4.82	4.76	5.29	4.88	5.35	5.13	4.75	4.62	4.95	5.23	4.84	4.48
444	4.72	4.71	5.26	5.10	5.26	5.15	4.82	4.75	4.90	4.96	4.95	4.59
435	4.84	4.66	5.20	5.03	5.01	5.08	4.46	4.75	4.75	4.80	4.69	4.09 ¹
426	4.52	4.72	4.87	4.81	4.87	4.71	4.42	4.25	4.81	4.98	4.78	3.85 ¹
417	4.04 ¹	4.56 ^{1/2}	4.58 ^{1/2}	4.82 ¹	4.48 ^{1/2}	4.34 ^{1/2}	4.20 ^{1/2}	4.39 ^{1/2}	4.69 ^{1/2}	4.37 ^{1/2}	4.44 ^{1/2}	3.09 ^{1-1/2}
408	3.76 ^{1-1/2}	3.92 ¹	4.18 ¹	4.04 ¹	3.99 ¹	3.86 ¹	3.71 ¹	3.95 ¹	3.97 ¹	3.54 ^{1-1/2}	3.84 ¹	2.83 ²
Additivity	1.36	1.88	1.62	1.98	1.32	2.40	1.30	1.57	1.59	1.70	1.16	1.67

Πίνακας Α.6 – D.A.Palmer²⁹ - Κατηγορίες παρατηρητών 2 και 3

Table 2. Visibility Functions of Wavelength for Observers of Type 2 and Type 3^a

Name	PA*	PS*	BB	DA*	GB	PA	BP	WH	DM*	MW	US	JM
Sex	F	M	M	F	M	M	F	M	M	F	M	M
Age	17	23	23	24	25	26	28	74	22	24	30	32
Eye	L	L	R	R	R	L	R	L	L	R	L	L
Refraction	-	-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-4	-1
Field	D	D	D	U	D	U	U	U	D	U	D	U
Wavelength (nm)												
741	2.93 ¹	2.50 ²	2.39 ^{1-1/2}	2.33 ^{1-1/2}	2.84 ¹	2.35 ^{1-1/2}	2.42 ^{1-1/2}	2.70 ^{1-1/2}	1.57 ^{1-1/2}	2.34 ^{1-1/2}	2.76 ¹	2.34 ^{1-1/2}
714	4.14	3.50 ¹	3.30 ¹	3.44 ¹	3.84 ^{1/2}	3.47 ^{1/2}	3.43 ^{1/2}	4.19 ¹	3.01 ^{1/2}	3.36 ¹	3.13	2.99 ¹
690	4.75	4.33	4.30	4.44	4.59	4.11	4.08	4.33	3.92	3.65	3.69	3.96
667	5.17	5.13	5.03	5.35	5.26	4.65	4.94	5.06	5.06	4.45	4.44	4.97
645	5.25	5.32	5.44	5.59	5.77	5.39	5.26	5.31	4.94	5.06	5.08	5.02
645	5.75	5.58	5.31	5.41	5.73	5.54	5.04	5.15	5.42	5.21	5.32	5.11
625	5.75	5.87	5.71	5.75	5.86	5.64	5.54	5.70	5.55	5.46	5.23	5.36
606	5.90	5.81	5.60	5.63	5.80	5.59	5.49	5.54	5.43	5.70	5.52	5.65
588	5.78	5.93	5.82	5.75	5.91	5.74	5.86	5.68	5.52	5.80	5.63	5.83
571	5.88	5.90	5.93	6.10	6.04	5.93	5.72	5.87	5.79	5.93	5.84	5.90
556	6.17	6.12	5.99	6.20	6.24	6.18	6.00	5.90	6.02	6.08	5.97	5.94
540	6.20	6.21	6.02	6.31	6.25	6.07	5.93	5.87	5.87	5.97	5.71	5.82
526	6.22	6.05	5.89	6.37	6.35	6.03	5.94	5.95	6.05	5.90	5.78	5.81
526	6.28	6.15	6.05	6.12	6.23	6.02	5.87	5.81	6.10	6.16	5.99	5.86
513	6.28	6.02	6.00	6.27	6.21	5.95	5.88	5.86	6.17	6.00	6.05	5.81
500	6.24	5.93	5.87	6.11	6.13	5.86	5.88	5.70	5.65	5.89	5.83	5.83
488	6.27	5.79	5.82	5.96	6.00	5.79	5.91	5.93	5.67	5.73	5.89	5.68
476	6.28	5.68	5.71	6.12	5.87	5.71	6.11	5.82	5.74	5.45	5.49	5.60
465	6.14	5.90	5.50	5.96	5.89	5.50	6.17	5.59	5.72	5.37	5.54	5.26
454	6.17	5.76	5.53	6.18	5.47	5.17	6.06	5.65	5.68	5.42	5.34	5.19
444	6.12	5.75	5.71	5.51	5.70	5.27	5.16	5.24	5.64	5.42	5.47	5.09
444	6.14	5.50	5.82	5.35	5.63	5.23	6.03	5.16	5.39	5.20	5.49	5.03
435	5.32	5.52	5.17	5.23	5.34	4.95	5.06	5.22	5.61	5.43	5.22	5.03
426	5.54	5.27	5.10	5.07	5.19	4.76	4.94	4.85	5.49	5.31	4.98	5.07
417	5.11	4.65 ^{1/2}	4.79	5.09	5.08	4.83 ^{1/2}	5.04	4.41 ^{1/2}	4.75 ^{1/2}	5.22	4.90	4.96
408	3.71 ^{1/2}	4.01 ¹	3.87 ¹	4.05 ¹	4.39 ¹	4.16 ¹	3.54 ¹	3.49 ^{1-1/2}	4.27 ¹	4.44 ¹	4.27 ¹	4.34 ¹
Additivity	2.43	2.14	2.04	3.95	2.82	2.33	2.02	1.98	1.32	2.15	1.12	1.76

^a First eight observers are type 2; second four are type 3. All conditions same as for Table 1.

Βιβλιογραφία

- ¹ Φ. Β. Τοπαλής, “Φωτοτεχνία”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, 1994.
- ² Commission Internationale de l'Eclairage, “*Light as a True Visual Quantity: Principles of Measurement*”, CIE pub 41.
- ³ Commission Internationale de l'Eclairage, “*The Basis of Physical Photometry*”, CIE pub N ° 1 8.2 (TC-1.2), 1983.
- ⁴ W. M. M.D. Hart, “*Adler’s Physiology of the Eye: Clinical Application*”, Mosby–Yearbook Inc., 1992.
- ⁵ W. Ganong, “*Ιατρική Φυσιολογία*”, Μετάφραση Ι. Χατζημηνά, εκδόσεις Γ. Κ. Αθανασιάδης, Αθήνα 1975.
- ⁶ H. W. Bodmann, “*The Scientific Basis of Photometry*”, Commission Internationale de l'Eclairage, CIE x009, 1995.
- ⁷ S. Berman, R. Clear, “*Additivity Constraints and Visual Task Considerations in Mesopic Photometry*”, Journal of the Illuminating Engineering Society, winter 2001.
- ⁸ H. W. Bodmann, “*The Scientific Basis of Photometry*”, Commission Internationale de l'Eclairage, CIE x009, 1995.
- ⁹ Commission Internationale de l'Eclairage, “*Light as a True Visual Quantity: Principles of Measurement*”, CIE pub 41.
- ¹⁰ M. Kalloniatis, C. Luu, “*Psychophysics of Vision*”, doi.wiley.com /10.1002/glia.20044.
- ¹¹ <http://webvision.med.utah.edu>, *Eye, Vision & Visibility*, “sensitivity of the visual system”
- ¹² Commission Internationale de l'Eclairage, “*The Basis of Physical Photometry*”, CIE pub N ° 1 8.2 (TC-1.2), 1983.
- ¹³ Commission Internationale de l'Eclairage, “*CIE 1988 2 ° Spectral Luminous Efficiency Functions for Photopic Vision*”, CIE Publ. N ° 86, 1990.
- ¹⁴ Commission Internationale de l'Eclairage “*CIE Proceedings 1951*”, Vol. 1, Sec 4; Vol 3, p. 37, Bureau Central de la CIE, Paris, 1951
- ¹⁵ G. Wald, “*Human Vision and the Spectrum*”, Science, 101, 653-658, 1945.

-
- ¹⁶ B. H. Crawford, “*The Scotopic Visibility Function*”, Proceedings of the Physical Society, B62, 321, 1949.
- ¹⁷ Commission Internationale de l'Eclairage, “*The Basis of Physical Photometry*”, CIE pub N ° 1 8.2 (TC-1.2), 1983.
- ¹⁸ 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.
- ¹⁹ 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.
- ²⁰ J. Vos, “*Colorimetric and Photometric Properties of a 2-deg Fundamental Observer*”, Color Research and Application, 3, 125-128, 1978.
- ²¹ Commission Internationale de l'Eclairage, “*Light as a True Visual Quantity: Principles of Measurement*”, CIE pub 41, 1994.
- ²² Commission Internationale de l'Eclairage, “*CIE Proceedings 1964*”, Vienna Session, Vol. B, 1963. (Committee Report E-1.4.1).
- ²³ W.W Coblenz, W.B.Emerson, “*Relative Sensibility of the Average Eye to Light of Different Colors and Some Practical Applications to Radiation Problems*”, Bulletin-Bureau of Standards (US),14, 167-236, 19818-19.
- ²⁴ K.S Gibson, E.P.T. Tyndal “*Visibility of radiant Energy*”, Bureau of Standards (US) Sci. Pap. 19, 131-191, 1923-24.
- ²⁵ L.C.Thomson, “*Shape Irregularities in the Equal Energy Luminosity Curve*”, P Proceedings of the Physical Society, Section B, Volume 62, Issue 12, pp. 787-792 (1949)
- ²⁶ M. Ikeda, H. Yaguchi, and K. Sagawa, “*Brightness luminous-efficiency functions for 2 and 10° fields,*” Journal Optical Society of America, 72, 1660- , 1982
- ²⁷ H.Yaguchi and M.Ikeda, “*Luminous efficiency functions by heterochromatic brightness matching for a wide range of retinal illuminance,*” Journal.Light Vis.Env. 4, 14-17, 1980.
- ²⁸ M.Ikeda, and H.Shimozono, “*Mesopic luminous-efficiency functions,*” Journal Optical Society of America. 71, 280-284, 1981
- ²⁹ D.A.Palmer, “*Visibility curves by direct comparison in a 10° field at 1000 Td*”, Journal Optical Society of America A, Vol2, No4, 578-583, 1985.
- ³⁰ W.S. Stiles, “*18th Thomas Young oration: The basic data of colour matching,*” Year Book of the Physical Society, 44-65, 1955

-
- ³¹ W.S. Stiles and J.M.Burch, "*N.P.L. colour-matching investigation, final report (1958)*", "Optical Acta 6, 1-26, 1959
- ³² D.A. Palmer and C.A. Whitloc, "*an improved monochromator using a single graded interference filter*". Journal of Physics E11, 996-997, 1978
- ³³ O.C Jones, "*standard spectral power distributions*," Journal of Physics D3 1967-1976 (1970)
- ³⁴ K.Sagawa, K. Takeichi, "*Spectral luminous efficiency functions in the mesopic range*", Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision, Volume 3, Issue 1, January 1986, pp.71-75
- ³⁵ Commission Internationale de l'Eclairage, "*Light as a true Visual Quantity: Principles of measurement*", CIE Pub. No. 41 (CIE, Paris), 1978.
- ³⁶ M. Ikeda, H.Yaguchi, and K.Sagawa, "*Brightness luminous-efficiency functions for 2° and 10° fields*", J. Opt. Soc. Am. 72, 1660-1665, 1982
- ³⁷ M. Ikeda and Y. Nakano, "*Spectral luminous-efficiency functions obtained by direct heterochromatic brightness matching for point sources and for 2° and 10° fields*," Journal Optical Society of America A 3, 2105-, 1986.
- ³⁸ Commission Internationale de l'Eclairage, "*Spectral luminous efficiency functions Based Upon Brightness matching For Monochromatic Point Sources 2° and 10° fields*" CIE Pub. No. 75, 1988
- ³⁹ B.H Crawford, "*The Scotopic Visibility Function*" Proceedings of the Physical Society, B62, 321-334, 1949.
- ⁴⁰ H. Katori, M.Fuwa, "*Relative Luminous Efficiency functions of 2° and 10° fields determined by flicker photometry and heterochromatic brightness matching*", Bulletin ETL 45, 139-165, 1981