



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
**ΟΠΤΙΚΗ & ΟΡΑΣΗ**



**Μεταπτυχιακή Εργασία:**

**“Η σημασία της φωτεινότητας και του προσανατολισμού στην αντίληψη των φυσικών εικόνων”**

**Ζαχόπουλος Βασίλειος**

**Επιβλέπων: Δρ. Πλαΐνης Σ.**

Η παρούσα εργασία υπεβλήθη ως μέρος των υποχρεώσεων για την απονομή του μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Οπτική και Όραση» και παρουσιάστηκε στην Τριμελή Επιτροπή αποτελούμενη από τους:

1. Πλαΐνη Σ.
2. Murray I.
3. Παλλήκαρη Ι.

**Ηράκλειο  
2006**

Αφιερώνεται στην  
Ελένη

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας μου Δρ. Σ. Πλαϊνή, για την επιλογή του να ασχοληθώ με αυτό το αντικείμενο και την πολύτιμη βοήθεια του για την ολοκλήρωση της. Επίσης για την υπομονή που επέδειξε και την φιλική σχέση που αναπτύχθηκε στη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Ευχαριστώ τον Πρύτανη του Πανεπιστημίου Κρήτης Καθηγητή Ιωάννη Παλλήμαρη και τον Δρ. Ian Murray για την θετική αποδοχή της εργασίας μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και συνεργάτη Σαπουντζή Παναγιώτη, για την βοήθεια του σε δυσκολίες που αντιμετώπισα κατά την εκπόνηση της εργασίας μου καθώς και την πολύτιμη συμμετοχή του στην συγκέντρωση του απαραίτητου υλικού.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, για την υλική και ηθική στήριξη που μου προσέφερε στις ακαδημαϊκές μου αναζητήσεις.

Ζαχόπουλος Βασίλειος

Ηράκλειο 2006

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

**Σκοπός:** Η χρήση φυσικών εικόνων σε ψυχοφυσικές μελέτες αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την κατανόηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της όρασης και του τρόπου με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται το περιβάλλον μέσα στο οποίο ζει. Προηγούμενες μελέτες κατέληξαν ότι τα διάφορα χαρακτηριστικά της όρασης αναπτύσσονται σε άμεση σχέση με το περιβάλλον μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο κάθε άνθρωπος και ότι υπάρχει συντονισμός των λειτουργιών με τα οπτικά ερεθίσματα τα οποία δέχεται.

Το πρώτο σκέλος της εργασίας είχε σαν σκοπό να αναλυθούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά φυσικών εικόνων, καθώς μειώνεται ο περιβαλλοντικός φωτισμός. Ιδιαίτερη έμφαση στην ανάλυση δόθηκε στον έλεγχο της υπόθεσης σχετικά με την επιλεκτικότητα κατανομής της οπτικής πληροφορίας σε συγκεκριμένους προσανατολισμούς. Στο δεύτερο μέρος πραγματοποιήθηκαν ψυχοφυσικές μετρήσεις με σκοπό να διερευνηθεί η επιλεκτικότητα σε προσανατολισμό και για συγκεκριμένες χωρικές συχνότητες, που έχει διαπιστωθεί ότι εμφανίζουν νευρώνες του οπτικού φλοιού.

**Μεθοδολογία:** Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε αρχικά λήψη φυσικών σκηνών με βαθμονομημένη φωτογραφική μηχανή σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. Έπειτα αναπτύχθηκαν κατάλληλοι αλγόριθμοι σε περιβάλλον Matlab, για την ανάλυση των στατιστικών τους χαρακτηριστικών σε σχέση με τη μείωση του φωτισμού.

Για την μελέτη της επιλεκτικότητας χωρικής συχνότητας και προσανατολισμού χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες συνθήκες που προκαλούσαν νευρωνική προσαρμογή με την καταγραφή οπτικών χρόνων αντίδρασης (visual reaction times). Τα ερεθίσματα ήταν ημιτονοειδή gratings χαμηλού contrast (4x supra-threshold) που προβαλλόταν σε βαθμονομημένη οθόνη. Το ερέθισμα που χρησιμοποιήθηκε για την πρόκληση προσαρμογής είχε συχνότητα 4 c/deg και 20% contrast. Τα πειράματα έγιναν σε δυο εξεταζόμενους για ένα εύρος χωρικών συχνοτήτων (1-16 c/deg) και προσανατολισμών.

**Αποτελέσματα:** Από τη στατιστική ανάλυση των φυσικών σκηνών επαληθεύθηκε η διαπίστωση ότι έχουν περισσότερη ενέργεια σε χαμηλές χωρικές συχνότητες, η οποία μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας. Επίσης προέκυψε ότι οι φυσικές σκηνές εμφανίζουν περισσότερη ενέργεια σε τυχαίους προσανατολισμούς, ανάλογα με το περιεχόμενο της κάθε σκηνής. Η μείωση του φωτισμού προκαλεί αντίστοιχα μείωση στην τιμή του φασματικού πλάτους, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει την κατανομή του ανά χωρική συχνότητα και ανά προσανατολισμό σε καμιά των περιπτώσεων. Ίδια χαρακτηριστικά εμφάνισαν και οι αστικές σκηνές που

εξετασθήκαν, με μόνη διαφορά ότι εμφάνισαν περισσότερη ενέργεια σε κάθετους και οριζόντιους προσανατολισμούς, ανεξάρτητα από το περιεχόμενό τους.

Τα αποτελέσματα των ψυχοφυσικών μετρήσεων, όσον αφορά την επιλεκτικότητα χωρικής συχνότητας και προσανατολισμού των νευρώνων, επιβεβαίωσαν εν μέρει την θεωρία των νευρωνικών καναλιών. Παρατηρήθηκε μεγαλύτερη αύξηση στους χρόνους αντίδρασης των εξεταζόμενων μετά από προσαρμογή σε ερέθισμα που παρουσίαζε ίδιες ή παραπλήσιες τιμές για τον προσανατολισμό και τη χωρική συχνότητα, σε σχέση με το test grating. Όσο μεγάλωνε η διαφορά των παραμέτρων αυτών από τις αντίστοιχες για το test, η αύξηση στους χρόνους αντίδρασης μειωνόταν εκθετικά.

**Συμπεράσματα:** Καταλήγοντας, η μείωση του περιβαλλοντικού φωτισμού μειώνει την «ποσότητα» της οπτικής πληροφορίας των ερεθισμάτων, γεγονός που αντιστοιχεί με αποτελέσματα ψυχοφυσικών μετρήσεων σε χαμηλές συνθήκες φωτισμού. Η χρήση χρόνων αντίδρασης στη διερεύνηση των νευροφυσιολογικών χαρακτηριστικών μέσω νευρωνικής προσαρμογής, αποτελεί ισχυρό εργαλείο λόγω της ισχυρά εξαρτώμενης επίδρασης της προσαρμογής από το χρόνο. Η επιβεβαίωση της ύπαρξης των νευρωνικών καναλιών τονίζει το ρόλο των στατιστικών χαρακτηριστικών των ερεθισμάτων στην εξέλιξη του οπτικού συστήματος.

## **ABSTRACT**

**Purpose:** The use of natural scenes in psychophysics studies constitutes an important tool for investigating the functional characteristics of the visual system and the way the information is neurally-represented. Previous studies suggested that the responses of visual pathway neurons to external stimuli are encoding information representative of the human's natural environment.

The first part of this work focused on the analysis of the statistical characteristics of natural scenes, at high and low photopic light levels. Particular emphasis was given on the selectivity of optical information distribution at concrete orientations. In the second part, psychophysical measurements were performed, in order to test the neurophysiological evidence of orientation and spatial frequency tuning in the visual system.

**Methods:** Natural scenes were captured at different ambient light levels, using a calibrated camera. Then, appropriate algorithms were developed in Matlab for the analysis of their statistical characteristics, such as energy, RMS, Michelson and bandwidth-limited contrast and orientation selectivity.

For studying neuronal adaptation, simple reaction times (RTs) were measured to the onset of a Gaussian windowed vertical sinusoidal grating, displayed on a calibrated CRT monitor. Adaptation was tested by the presence of a 20% contrast test grating which was presented for 10 seconds prior to each RT recording. Two subjects were tested for a wide range of orientations (0, 2, 5, 10, 22.5, 45, 90 deg angles either side to the testing grating) and spatial frequency (0.5, 1, 2 octaves difference either side to the testing grating) combinations.

**Results:** The analysis of natural scenes statistics confirmed the ascertainment that they have more energy at low spatial frequencies and that the energy is decreased exponentially with spatial frequency. Moreover, energy is distributed randomly with orientation, depending on the content of each scene. The reduction of ambient light decreases the Fast Fourier amplitude respectively, without influence the slope of the amplitude vs. spatial frequency function or its distribution per orientation. The carpentered scenes showed similar characteristics, except that they had more energy in vertical and horizontal orientations, regardless of their content.

The effect of adaptation on RTs was more pronounced when the adaptor and the test grating had the same orientation and spatial frequency. When the test grating was orthogonal to the test, the adaptation was minimal. The orientation tuning functions were modelled using Gaussian and exponential functions. The bandwidth of functions found to be from  $12.8^{\circ}$  to  $19.6^{\circ}$ . The spatial frequency tuning curves revealed a bandwidth of 1.15-1.57 octaves.

**Conclusion:** The reduction of ambient illumination decreases the energy spectra of the images. This agrees with the psychophysical findings of decreased visual performance at low light levels. Visual RTs form supra-threshold behavioural responses that could lead to indicative values of selectivity tuning in orientation and spatial frequency channels, using contrast adaptation paradigms. They offer the advantage over threshold testings in terms of accuracy in timing, which is very important due to the time course of contrast adaptation.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Φυσιολογικά και ανατομικά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου οφθαλμού</b>	<b>11</b>
1.1.1 Ανθρώπινος οφθαλμός	11
1.1.2 Φωτοϋποδοχείς	13
1.1.3 Δίπολα και οριζόντια κύτταρα	15
1.1.4 Αμακρύινα κύτταρα	16
1.1.5 Γαγγλιακά κύτταρα	16
1.1.6 Έξω Γονατώδης Πυρήνας (Lateral Geniculate Nucleus)	18
1.1.7 Πρωτοταγής Οπτικός Φλοιός V1	19
<b>1.2 Ψυχοφυσικές μέθοδοι</b>	<b>21</b>
1.2.1 Απλά gratings	22
1.2.2 Contrast Sensitivity function	25
1.2.3 CSF και ανάλυση Fourier	26
1.2.4 Οπτικοί Χρόνοι Αντίδρασης (Visual Reaction Times, RTs)	29
<b>1.3 Ο ρόλος της φωτεινότητας στη συμπεριφορά της όρασης</b>	<b>32</b>
<b>1.4 Νευροφυσιολογικά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου οφθαλμού</b>	<b>35</b>
1.4.1 Νευρωνική προσαρμογή	35
1.4.2 Πολλαπλά νευρωνικά κανάλια και χωρικές συχνότητες	38
1.4.3 Πολλαπλά νευρωνικά κανάλια και επιλεκτικότητα προσανατολισμού	40
<b>1.5 Φυσικές σκηνές</b>	<b>43</b>
1.5.1 Οι φυσικές σκηνές ως ερεθίσματα	43
1.5.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά φυσικών σκηνών	44
1.5.2.1 Μετρικές contrast	44
1.5.2.2 Φάσμα πλάτους Fourier	46
<b>ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</b>	<b>48</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</b>	<b>50</b>
<b>2.1 Ανάλυση φυσικών εικόνων</b>	<b>50</b>
2.1.1 Εισαγωγή	50
2.1.2 Ψηφιακή εικόνα	50
2.1.3 Λήψη και επεξεργασία των εικόνων	50
2.1.4 Windowing	53
<b>2.2 Ψυχοφυσικές δοκιμασίες επιλεκτικότητας προσανατολισμού και χωρικής συχνότητας</b>	<b>55</b>
2.2.1 Εισαγωγή	55
2.2.2 Εξεταζόμενοι	55
2.2.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός	55
2.2.4 Ερεθίσματα	56
2.2.5 Πειραματική διαδικασία	57
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>	<b>60</b>
<b>3.1 Φυσικές εικόνες</b>	<b>60</b>
<b>3.2 Ψυχοφυσικές μελέτες επιλεκτικότητας προσανατολισμού και χωρικής συχνότητας</b>	<b>68</b>
3.2.1 Ψυχοφυσικές μελέτες επιλεκτικότητας προσανατολισμού	68
3.2.2 Ψυχοφυσικές μελέτες επιλεκτικότητας χωρικής συχνότητας	73



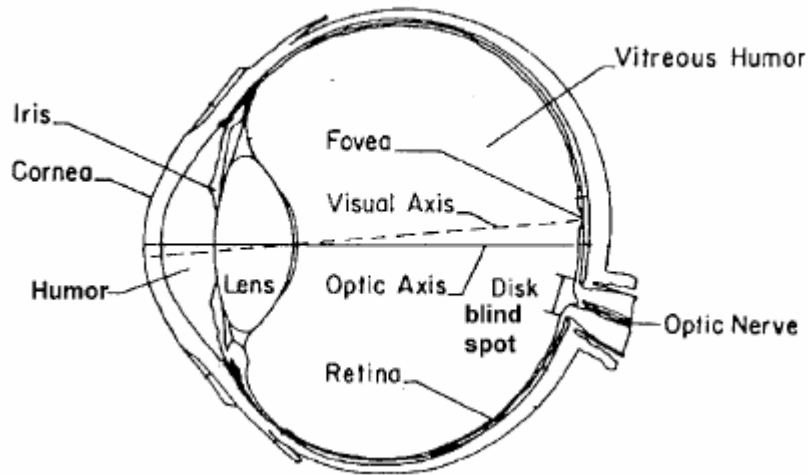
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ</b>	<b>79</b>
4.1 Φυσικές εικόνες	79
4.2 Ψυχοφυσικές μελέτες επιλεκτικότητας χωρικής συχνότητας και προσανατολισμού	83
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1</b>	<b>87</b>
Βαθμονόμηση φωτογραφικής μηχανής	87
Εκτίμηση της συνάρτησης γάμμα	87
Εκτίμηση της φασματικής ευαισθησίας των αισθητήρων της φωτογραφικής μηχανής	90
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2</b>	<b>95</b>
Ρυθμίσεις φωτογραφικής μηχανής	95
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3</b>	<b>96</b>
Μονοδιάστατος μετασχηματισμός Fourier	96
Δυσδιάστατος μετασχηματισμός Fourier	100
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4</b>	<b>104</b>
Κώδικες Matlab	104
1α. Ρουτίνα που γραμμικοποιεί τις εικόνες με τις παραμέτρους της κάμερας μας (Aphrodite)	104
1β. Ρουτίνα που καλεί την παραπάνω συνάρτηση, αυξάνει το bit-depth των εικόνων από 8 σε 16 και τις μετατρέπει σε grayscale	104
2α. Ρουτίνα που σχεδιάζει ένα εκ περιστροφής σιγμοειδές φίλτρο (windowing function)	105
2β. Ρουτίνα που πολ/ζει την εικόνα με το παραπάνω φίλτρο και υπολογίζει τη μέση τιμή του φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό, αθροιζόμενο για όλες τις χωρικές συχνότητες	105
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5</b>	<b>107</b>
Αποτελέσματα επεξεργασίας εικόνων	107
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>134</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Φυσιολογικά και ανατομικά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου οφθαλμού

#### 1.1.1 Ανθρώπινος οφθαλμός

Η αίσθηση της όρασης αποτελεί ένα συνδυασμό πολλών διαφορετικών ικανοτήτων που λειτουργούν αυτόνομα και όλες μαζί συνεργάζονται για να μπορέσουμε να αντιληφθούμε το χώρο μέσα στον οποίο κινούμαστε. Το βασικό αισθητήριο όργανο της όρασης είναι ο οφθαλμός. Ο οφθαλμός συλλέγει το φως που προσπίπτει σε αυτόν από το περιβάλλον και ύστερα από επεξεργασία, το διαβιβάζει υπό την μορφή νευρικών ώσεων στα κέντρα του εγκεφάλου, για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση. Στο σχήμα 1.1 απεικονίζεται ένας ανθρώπινος οφθαλμός.



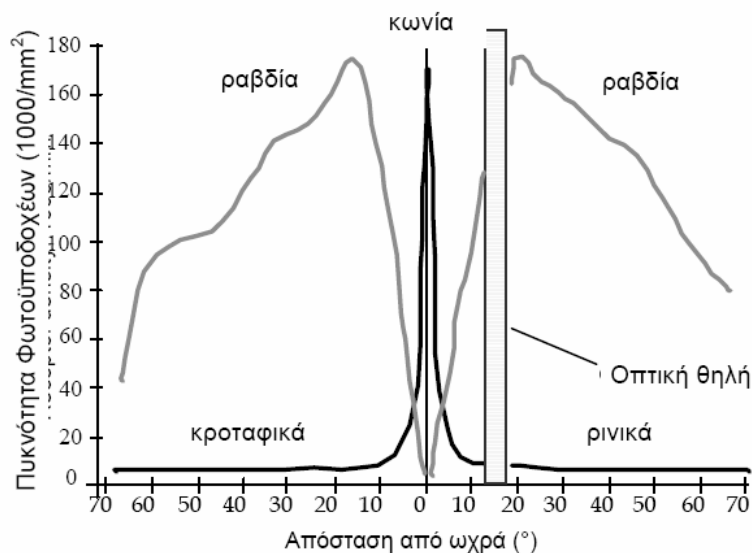
Σχ.1.1: Ο ανθρώπινος οφθαλμός (DeValois et al. 1990)

Το φως εισέρχεται στο εσωτερικό του οφθαλμού από τον κερατοειδή, που αποτελεί και την κύρια διαθλαστική επιφάνεια του. Έπειτα διελαύνει μέσω των άλλων οπτικών μέσων του ματιού (υδατοειδές υγρό, ίριδα, κρυσταλλοειδής φακός, υαλώδες) για να καταλήξει τελικά στους φωτοϋποδοχείς του αμφιβληστροειδή χιτώνα.

Ο αμφιβληστροειδής αποτελεί το πρώτο στάδιο επεξεργασίας της εισερχόμενης οπτικής πληροφορίας. Σε αυτόν επιτελείται η διαδικασία της φωτομεταγωγής, δηλαδή η μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε νευρικές ώσεις. Λόγω του ότι, σε αντίθεση με άλλα αισθητήρια όργανα, ο αμφιβληστροειδής δημιουργείται απευθείας από το νευρικό εξώδερμα, θεωρείται σαν μια απόφυση του εγκεφάλου και αποτελεί μέρος του κεντρικού νευρικού συστήματος.

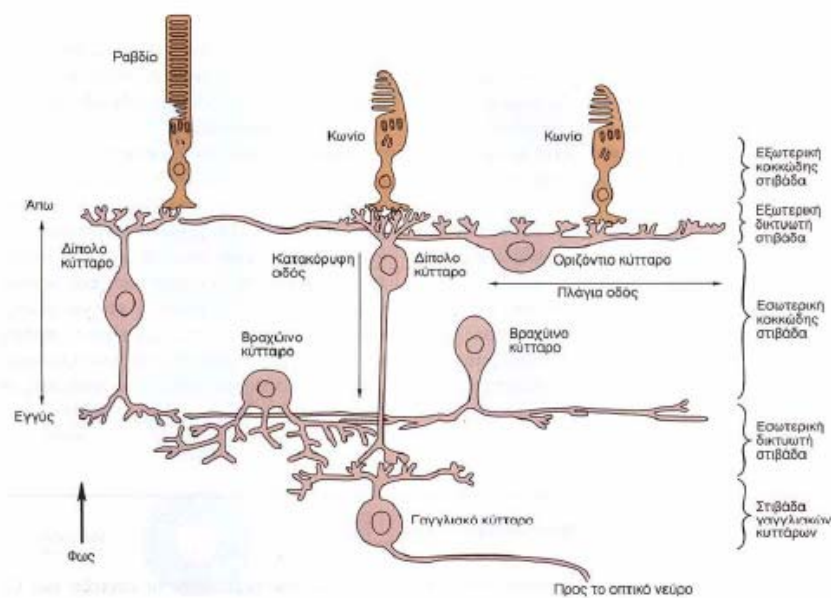
Ο αμφιβληστροειδής δεν διαβιβάζει «ακατέργαστη» την οπτική πληροφορία που φτάνει σε αυτόν. Αντίθετα, η διάταξη των νευρώνων του, ή συγκεκριμένα των γαγγλιακών κυττάρων, είναι τέτοια που του επιτρέπει να ανιχνεύει και να συγκρίνει αλλαγές (π.χ. στη φωτεινότητα, στο χρώμα), φιλτράροντας μεγάλα ποσά πληροφορίας, όπως τις φωτεινές εντάσεις που παραμένουν σταθερές στον χρόνο (Atick 1992, De Valois 1990). Το πρώτο τμήμα του αμφιβληστροειδή που επεξεργάζεται το εισερχόμενο φως είναι οι φωτοϋποδοχείς του. Ήδη από τον 18<sup>ο</sup> αιώνα (Max Schultze 1866) γνωρίζουμε ότι οι φωτοϋποδοχείς είναι δυο ειδών: τα κωνία, που λειτουργούν σε υψηλές συνθήκες φωτεινότητας (φωτοπική όραση) και τα ραβδία που λειτουργούν σε χαμηλά επίπεδα φωτεινότητας (σκοτοπική όραση) (Parinaud 1898, Von Kries 1896, Hecht 1937, Wald 1945).

Η κατανομή των δυο ειδών φωτοϋποδοχέων δεν είναι ίδια σε όλη την επιφάνεια του αμφιβληστροειδή (Oesteborg 1935, Curcio 1990). Ο αριθμός των κωνίων είναι περίπου 5 εκατομμύρια, ενώ των ραβδίων 120 εκατομμύρια. Στο κεντρικό τμήμα του αμφιβληστροειδή, γνωστό σαν κεντρικό βοθρίο, βρίσκονται μόνο κωνία (Wandell 1995). Αντίθετα τα ραβδία κατανέμονται στην περιφέρεια, με μέγιστη πυκνότητα στις 20<sup>ο</sup> από το κέντρο της ωχράς. Με αυτό τον τρόπο κατανομής, ο αμφιβληστροειδής χωρίζεται σε δυο μέρη: το κεντρικό που είναι υπεύθυνο για την αναγνώριση των οπτικών ερεθισμάτων και το περιφερειακό που είναι υπεύθυνο για την ανίχνευση αυτών. Στο σχήμα 1.2 απεικονίζεται η κατανομή των φωτοϋποδοχέων.



Σχ. 1.2: Κατανομή φωτοϋποδοχέων (από Σημειώσεις Πλαϊνή Σ., δεδομένα από Oesteborg)

Ωστόσο, πέραν των φωτοϋποδοχέων, στον αμφιβληστροειδή βρίσκονται και άλλα κύτταρα, υπεύθυνα για την μετάβαση της πληροφορίας στον εγκέφαλο. Τα κωνία και τα ραβδία διαβιβάζουν τις νευρικές τους ώσεις στα δίπολα κύτταρα και από εκεί στα γαγγλιακά (κάθετη ροή πληροφορίας). Οι πληροφορίες μεταφέρονται επίσης πλάγιως (πλάγια ροή πληροφορίας) μεταξύ των φωτοϋποδοχέων και των δίπολων κυττάρων, μέσω των οριζόντιων κυττάρων. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα που δέχεται ένας φωτοϋποδοχέας μπορεί να επηρεαστεί από τη δραστηριότητα γειτονικών φωτοϋποδοχέων. Επιπλέον, τα βραχύινα κύτταρα εκτελούν πλάγια αλληλεπίδραση σε διαφορετικό επίπεδο, μεταξύ των δίπολων και των γαγγλιακών κυττάρων. Στο σχήμα 1.3 απεικονίζεται η ροή της πληροφορίας στον αμφιβληστροειδή.

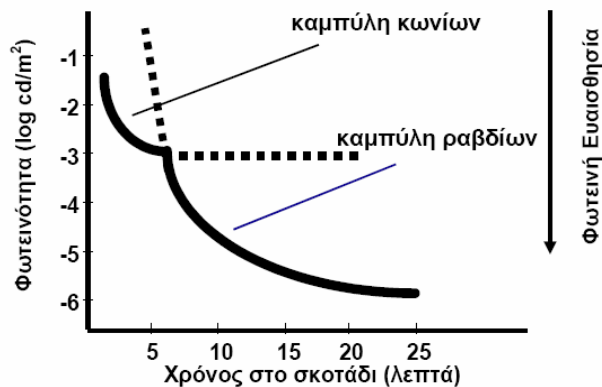


Σχ.1.3: Οι νευρώνες του αμφιβληστροειδή.

### 1.1.2 Φωτοϋποδοχείς

Τα ραβδία, όπως προαναφέρθηκε, έχουν σαν ρόλο την ανίχνευση των ερεθισμάτων και όχι την αναγνώριση τους. Αυτό οφείλεται στο ότι περιέχουν περισσότερη φωτοευαίσθητη οπτική χρωστική από ότι τα κωνία. Παρόλο όμως που το μέγεθος τους είναι μικρότερο από αυτό των κωνίων και η πυκνότητά τους μεγαλύτερη, άρα κάνουν καλύτερη δειγματοληψία μιας εικόνας, δεν προσφέρουν καλή χωρική διακριτική ικανότητα. Ο λόγος είναι ότι πολλά ραβδία συνάπτονται σε ένα δίπολο κύτταρο (spatial summation). Το συγκλίνον σύστημα των ραβδίων τους επιτρέπει μια σημαντική αύξηση της ευαισθησίας τους (λειτουργία σε σκοτοπικές συνθήκες), αλλά μειώνει σημαντικά την διακριτική τους ικανότητα. Τέλος, τα ραβδία φτάνουν πολύ γρήγορα σε κορεσμό όταν ανεβαίνουν τα επίπεδα φωτεινότητας

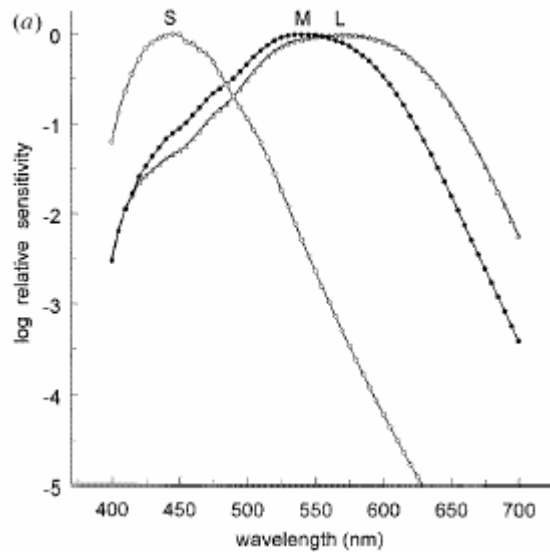
(Norman and Weblin 1974) και πιστεύεται ότι συμμετέχουν ελάχιστα στην καθημερινή φωτοπική όραση. Στο σχήμα 1.4 απεικονίζεται η ευαισθησία των ραβδίων και των κωνίων σε σχέση με την φωτεινότητα.



**Σχ.1.4: Προσαρμογή στο σκοτάδι. Καμπύλες επανάκτησης φωτεινής ευαισθησίας μετά από έκθεση σε έντονο φως.**

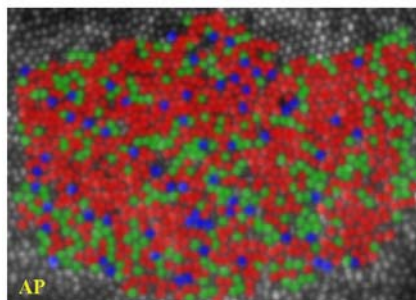
Εν αντιθέσει με τα παραπάνω, τα κωνία, υπεύθυνα για την φωτοπική όραση, εμφανίζουν μικρή φωτεινή ευαισθησία (βλ.Σχ.1.4) αλλά μεγάλη διακριτική ικανότητα. Στο τελευταίο, σημαντικό ρόλο παίζει ο τρόπος με τον οποίο συνάπτονται τα κωνία στα δίπολα κύτταρα. Στο κεντρικό βοθρίο, το τμήμα του αμφιβληστροειδή που εμφανίζει την μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα, τα κωνία έχουν το μικρότερο μέγεθος και ένα κωνίο συνάπτεται με ένα μόνο δίπολο κύτταρο. Τα κωνία της περιφέρειας είναι διάσπαρτα, έχουν μεγάλο μέγεθος και εμφανίζουν χωρική άθροιση (spatial summation) όπως ακριβώς και τα ραβδία. Το τελευταίο μειώνει σαφώς την διακριτική ικανότητα αλλά δεν δημιουργεί πρόβλημα στην αντίληψη των χρωμάτων (Gouras 1991).

Ένα όμως χαρακτηριστικό των κωνίων είναι ότι χωρίζονται σε τρία είδη, ανάλογα με την χρωστική που έχουν: τα L που εμφανίζουν μέγιστη απορρόφηση στα 559 nm, τα M που απορροφούν μέγιστα στα 531 nm και τα S που έχουν την μεγαλύτερη απόκριση στα 419 nm (Smith and Pokorny 1972,1975, Baylor et al 1987). Στο σχήμα 1.5 φαίνεται η καμπύλη φασματικής ευαισθησίας των κωνίων.



**Σχ.1.5: Καμπύλες φωτεινής ευαισθησίας κωνίων (Webster 1996)**

Έχοντας τα κωνία αυτά τα χαρακτηριστικά, υιοθετήθηκε ο όρος μωσαϊκό των κωνίων για να περιγράψει καλύτερα την κατανομή τους στο κεντρικό βοθρίο. Στο σχήμα 1.6 απεικονίζεται το μωσαϊκό, ανάλογα με το μήκος κύματος στο οποίο κορυφώνεται η καμπύλη ευαισθησίας του.



**Σχ.1.6: Μωσαϊκό κωνίων, 1 deg περιφερικά του κεντρικού βοθρίου. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα L κωνία, με πράσινο τα M και με μπλε τα S**

### 1.1.3 Δίπολα και οριζόντια κύτταρα

Τα κύτταρα αποκαλούνται δίπολα επειδή παρουσιάζουν δύο "πόλους" ή δύο σημεία σύνδεσης. Η μία σύνδεση πραγματοποιείται με τον φωτούποδοχέα και η άλλη με ένα γαγγλιακό κύτταρο. Οι οδοί των ραβδίων και των κωνίων παραμένουν συνήθως χωριστές στον αμφιβληστροειδή. Ορισμένα δίπολα έρχονται σε επαφή μόνο με κωνία, άλλα μόνον με ραβδία. Αν και ορισμένα κωνιο-δίπολα, κυρίως στο κέντρο του αμφιβληστροειδή, έρχονται σε άμεση επαφή με μόνο ένα κωνίο, είναι πιθανό να δέχονται και έμμεσες πληροφορίες από άλλα κωνία (μέσω των οριζόντιων κυττάρων ή συνάψεων των φωτούποδοχέων με άλλους φωτούποδοχείς). Ενώ τα

δίπολα μεταβιβάζουν τις πληροφορίες κατακόρυφα στην οπτική οδό, τα οριζόντια κύτταρα μεταβιβάζουν τις πληροφορίες πλαγίως. Τα οριζόντια κύτταρα έχουν μεγάλες υποδοκτικές επιφάνειες, ώστε να έρχονται σε επαφή με πολλούς φωτοϋποδοχείς.

#### **1.1.4 Αμακρύινα κύτταρα**

Μία ξεχωριστή ομάδα κυττάρων στον αμφιβληστροειδή αποτελούν τα αμακρύινα κύτταρα. Υπάρχουν πολλοί τύποι αμακρύινων κυττάρων που διαφέρουν στο μέγεθος, στην μορφολογία και στη λειτουργία. Συχνά, διαμορφώνουν τις διασυνδέσεις μεταξύ των διπολικών και των γαγγλιακών κυττάρων αλλά και μεταξύ τους, διανέμοντας τις πληροφορίες πλαγίως, όπως τα οριζόντια κύτταρα. Πιστεύεται ότι συνεισφέρουν και σε άλλες λειτουργίες, αλλά ο ιδιαίτερος ρόλος τους δεν έχει ακόμη αποσαφηνισθεί.

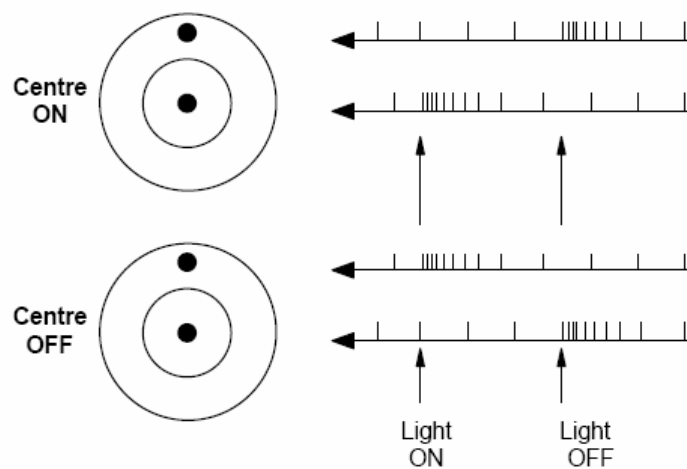
#### **1.1.5 Γαγγλιακά κύτταρα**

Η εσωτερική στιβάδα του αμφιβληστροειδή αποτελείται από τα γαγγλιακά κύτταρα. Οι νευράξονες των γαγγλιακών κυττάρων σχηματίζουν το οπτικό νεύρο, το οποίο διαβιβάζει τις οπτικές πληροφορίες στον Έξω Γονατώδη Πυρήνα (LGN) για περαιτέρω επεξεργασία.

Όπως προαναφέρθηκε, οι πληροφορίες για το κάθε γαγγλιακό κύτταρο προέρχονται από συγκεκριμένους φωτοϋποδοχείς. Οι φωτοϋποδοχείς αυτοί ορίζουν και την περιοχή ελέγχου του κάθε γάγγλιου, γνωστή και σαν υποδοκτικό πεδίο του κάθε κυττάρου. Το σχήμα της περιοχής αυτής είναι κυκλικό. Το μέγεθος των υποδοκτικών πεδίων εξαρτάται από τη θέση της περιοχής ελέγχου. Στο κέντρο του αμφιβληστροειδή τα υποδοκτικά πεδία είναι μικρά, εν αντιθέσει με την περιφέρεια, όπου τα υποδοκτικά πεδία είναι μεγάλα. Προφανώς, το μέγεθος των πεδίων συνάγεται άμεσα με την διακριτική ικανότητα κάθε περιοχής του αμφιβληστροειδή.

Το υποδοκτικό πεδίο χωρίζεται σε δυο περιοχές: μια κυκλική περιοχή στο κέντρο, γνωστή και σαν *κέντρο* του υποδοκτικού πεδίου και την υπόλοιπη κυκλική περιοχή, γνωστή σαν *περιφέρεια* του υποδοκτικού πεδίου. Οι δυο αυτές περιοχές παίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία των γαγγλιακών κυττάρων. Φωτίζοντας με μια μικρή φωτεινή κηλίδα το κέντρο ενός γάγγλιου, ανάλογα με την απόκριση τους, τα χωρίζουμε σε δυο κατηγορίες: τα γάγγλια φωτεινού κέντρου, που έχουν την μέγιστη απόκριση όταν φως προσπίπτει στο κέντρο τους και όχι στην περιφέρεια και τα σκοτεινού κέντρου, που αποκρίνονται μέγιστα όταν φως προσπίπτει στην περιφέρεια

τους. Στον διάχυτο φωτισμό και τα δυο είδη αποκρίνονται ελάχιστα. Στο σχήμα 1.7 φαίνεται ο τρόπος απόκρισης των δυο ειδών γαγγλιακών κυττάρων.



**Σχ.1.7: Απόκριση γαγγλιακών κυττάρων**

Ο τρόπος διαχωρισμού των γαγγλιακών κυττάρων γινόταν με βάση διάφορα φυσιολογικά και ανατομικά χαρακτηριστικά. Μέχρι πρότινος υπήρχαν δυο βασικές κατηγορίες γάγγλιων: τα midget ή P τα οποία βρίσκονται στο κέντρο και καταλήγουν στις P στιβάδες του LGN και τα parasol ή M που βρίσκονται στην περιφέρεια και καταλήγουν στις M στιβάδες του LGN. Ωστόσο, τελευταία ανακαλύφθηκε και μια τρίτη κατηγορία γάγγλιων, τα small bistratified, τα οποία προβάλλουν στην περιοχή κοπίο του LGN. Και στις τρεις κατηγορίες υπάρχουν κύτταρα τόσο σκοτεινού όσο και φωτεινού κέντρου.

Και τα τρία είδη γάγγλιων αποτελούν το βασικό πυρήνα μιας δεύτερης χρωματικής επεξεργασίας, που πλέον δεν επιτελείται στο επίπεδο των φωτοϋποδοχέων αλλά στα γαγγλιακά κύτταρα. Την θεωρία της δεύτερης αυτής επεξεργασίας εισήγαγε πρώτος ο *Hering* το 1878, ο οποίος πρότεινε ότι στο επίπεδο των γαγγλιακών κυττάρων γίνεται ένας συνδυασμός των αποκρίσεων των κωνίων (κωδικοποίηση του αθροίσματος ή της διαφοράς τους). Η θεωρία αυτή είναι πλέον γνωστή σαν color opponency theory (θεωρία χρωματικής ανταγωνιστικότητας) και βασίζεται στον ανταγωνισμό που παρουσιάζεται στην αντίληψη μεταξύ κόκκινου-πράσινου, και μπλε-κίτρινου χρώματος. Οι *DeValois et al. (1966)* ήταν οι πρώτοι που περιέγραψαν κύτταρα στην οπτική οδό ανώτερων θηλαστικών, τα οποία, για παράδειγμα, «αναστέλλονταν» από το κόκκινο και «διεγείρονταν» από το πράσινο φως. Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω θεωρία, τα τρία είδη των γάγγλιων εμφανίζουν και επιπλέον λειτουργικά χαρακτηριστικά.



Τα parasol κύτταρα αποτελούν περίπου το 10% του συνολικού πληθυσμού των γαγγλιακών κυττάρων και μεταφέρουν κυρίως πληροφορίες για την αντίθεση φωτεινότητας (διάκριση φωτός από το σκοτάδι), αθροίζοντας τις αποκρίσεις των L- και M- κωνίων με τον εξής τρόπο: η κεντρική περιοχή ενός parasol φωτεινού κέντρου (ON-center), η οποία αποκαλείται  $+(L+M)$ , διεγείρεται από τις αθροιστικές αποκρίσεις των L και M κωνίων. Η περιφέρειά του, που αποκαλείται  $-(L+M)$ , αναστέλλεται από τις αποκρίσεις των L και M κωνίων. Σε αντίθεση, ένα parasol σκοτεινού κέντρου (OFF-center), αναστέλλεται  $[-(L+M)]$  στο κέντρο του και διεγείρεται  $+[+(L+M)]$  στην περιφέρειά του. Τα parasol κύτταρα έχουν υψηλή ευαισθησία στην αντίθεση φωτεινότητας αλλά παρουσιάζουν μηδαμινή χρωματική επιλεκτικότητα.

Στον πίνακα 1.1 εντέλει συνοψίζονται τα επιμέρους χαρακτηριστικά των δυο βασικότερων κατηγοριών γαγγλιακών κυττάρων.

**Πιν.1.1: Λειτουργικά χαρακτηριστικά P και M κυττάρων**

Ιδιότητες	P – κύτταρα	M – κύτταρα
Συναπτική ταχύτητα	χαμηλή	Υψηλή
Υποδεκτικά πεδία	Μικρά	Μεγάλα
Αριθμός (σε εκατομμύρια)	1.2	0.15
Απόκριση	Παρατεταμένη (Φασική)	παροδική (τονική)
Χρωματική αντίληψη	Ναι	Όχι
Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης	Χαμηλή	Υψηλή
Χωρική ανάλυση	Υψηλή (~40-60 c/deg)	Low (~8-10 c/deg)
Χρονική ανάλυση	Χαμηλή	Υψηλή (υπεύθυνα για κίνηση)
Λειτουργία στο σκοτάδι	Όχι	Ναι

### 1.1.6 Έξω Γονατώδης Πυρήνας (Lateral Geniculate Nucleus)

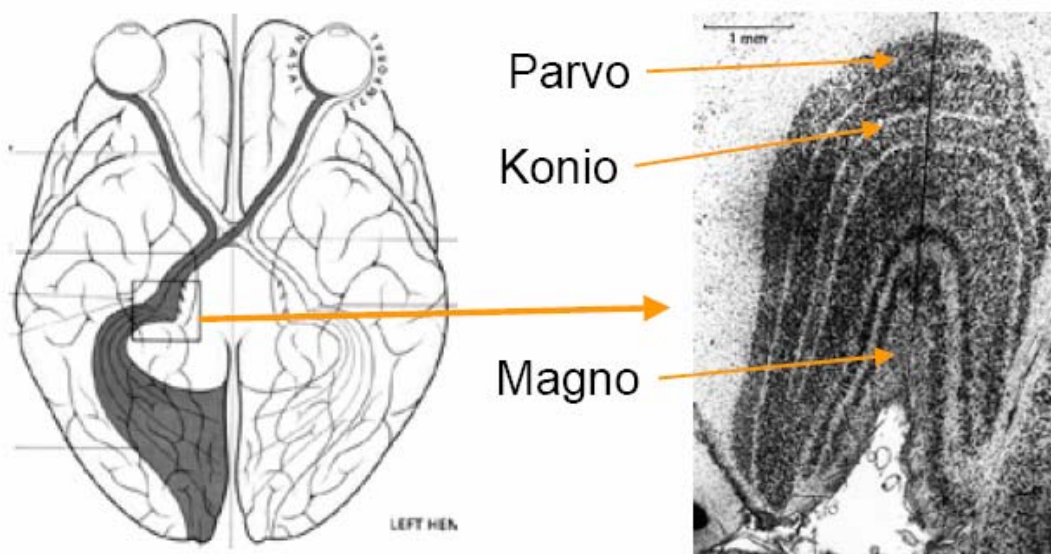
Το κάθε είδος γαγγλιακών κυττάρων προβάλλει σε ξεχωριστή περιοχή του LGN. Όπως προαναφέρθη, τα midget προβάλλουν στις Parvocellular (PC) στιβάδες, τα parasol στις Magnocellular (MC) (Cleland et al. 1971; De Valois and De Valois 1990; Kulikowski and Tolhurst 1972; Tolhurst 1973) και τα small bistratified στις Koniocellular (KC).

. Οι PC στιβάδες είναι τέσσερις και βρίσκονται στο ανώτερο μέρος του LGN. Αντίθετα οι MC είναι δυο και βρίσκονται στο κάτω μέρος. Οι KC στιβάδες είναι λεπτές στιβάδες ανάμεσα στις Parvocellular (Hendry and Reid 2000; White et al. 2001; Xu et al. 2002; Xu et al. 2001).

Η προβολή των νευροαξόνων γίνεται με τοπογραφική οργάνωση, τέτοια ώστε κάθε έξω γονατώδης πυρήνας να αποτελεί μια αμφιβληστροειδοτοπική αντιπροσώπευση του ετερόπλευρου οπτικού ημιπεδίου. Κατά συνέπεια, ο έξω γονατώδης πυρήνας περιέχει έναν νευρικό χάρτη του αμφιβληστροειδούς. Η προβολή του αμφιβληστροειδούς όμως στον LGN δεν είναι σημείο προς σημείο. Αυτό οφείλεται στην διαφορά του αριθμού των φωτοϋποδοχέων ανά μονάδα επιφάνειας σε κάθε περιοχή του. Το κεντρικό βοθρίο, που περιέχει την μεγαλύτερη πυκνότητα φωτοϋποδοχέων σε σχέση με την επιφάνεια του, στέλνει μεγαλύτερη ποσότητα πληροφορίας στον LGN από ό,τι η περιφέρεια. Το ήμισυ περίπου της νευρικής ουσίας διατίθεται για την αντιπροσώπευση του βοθρίου (κεντρικές 5° του αμφιβληστροειδούς). Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως φλοιώδης μεγέθυνση (cortical magnification).

Από τις δυο στιβάδες του έξω γονατώδη πυρήνα ξεκινούν δυο οδοί, που καταλήγουν τελικά στον πρωτοταγή οπτικό φλοιό V1 και άλλες εγκεφαλικές περιοχές για ανώτερη επεξεργασία.

Το σχήμα 1.8 παρουσιάζει τη δομή του LGN και τη θέση των επιμέρους στιβάδων που τον αποτελούν.



Σχ.1.8: Ο έξω γονατώδης πυρήνας (LGN)

### 1.1.7 Πρωτοταγής Οπτικός Φλοιός V1

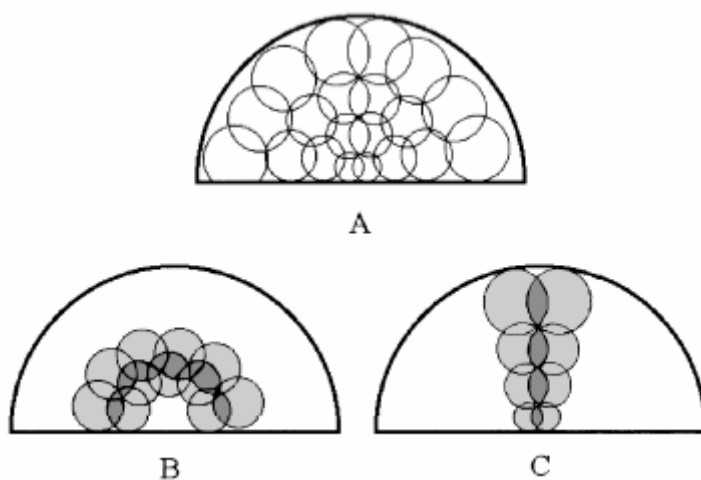
Στα πρωτεύοντα θηλαστικά, το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας από τον αμφιβληστροειδή και τον Έξω Γονατώδη Πυρήνα καταλήγει για επεξεργασία στον Πρωτοταγή Οπτικό Φλοιό V1. Ο V1 περιέχει περίπου 100 φορές περισσότερους

νευρώνες από ότι ο LGN και παρόλο που υπάρχουν πάνω από 20 φλοιώδεις περιοχές που δέχονται ισχυρό οπτικό σήμα, ο V1 έχει γίνει αντικείμενο πολλών μελετών και σήμερα θεωρείται ως το τμήμα του φλοιού για το οποίο γνωρίζουμε τα περισσότερα (Wandell 1995).

Τα υποδεκτικά πεδία στον V1 είναι εντελώς διαφορετικά από ότι στον LGN. Εμφανίζουν δε διάφορα χαρακτηριστικά όσον αφορά τη λειτουργία τους. Ένα από αυτά είναι ότι αποκρίνονται καλύτερα σε ερεθίσματα που κινούνται σε μια κατεύθυνση από ότι στην αντίθετη. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι γνωστό σαν επιλεκτικότητα κατεύθυνσης (direction selectivity) (Hubel and Wiesel 1968).

Επίσης τα υποδεκτικά πεδία του V1 εμφανίζουν διαφορετική δομή διεγερτικών και ανασταλτικών περιοχών. Πλέον αυτές οι περιοχές δεν είναι συγκεντρικές και εμφανίζουν μεγαλύτερη απόκριση σε ερεθίσματα συγκεκριμένου προσανατολισμού (orientation selectivity) (Hubel and Wiesel 1959). Οφείλεται στο ότι τα υποδεκτικά πεδία των νευρώνων του V1 δεν είναι κυκλικά όπως αυτά του αμφιβληστροειδή ή του LGN. Πολλοί νευρώνες που προβάλλουν σε διαφορετικές χωρικά περιοχές του LGN αλλά είναι ευθυγραμμισμένοι μεταξύ τους, αθροίζουν τις αποκρίσεις τους στον V1. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα υποδεκτικά τους πεδία να είναι επιμήκη και κατά συνέπεια επιλεκτικά στον προσανατολισμό (Hubel and Wiesel 1962) (βλ. Σχ. 1.9).

Ένα όμως ακόμα χαρακτηριστικό των νευρώνων του V1 είναι ότι εμφανίζουν και επιλεκτικότητα όσον αφορά την χωρική συχνότητα των ερεθισμάτων (spatial frequency selectivity). Και αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να ερμηνευτεί σαν άθροιση των υποδεκτικών πεδίων του LGN, τα οποία ανήκουν σε διαφορετικό προσανατολισμό αλλά προβάλλουν στην ίδια χωρική περιοχή του (επιμήκη υποδεκτικά πεδία) (βλ. Σχ. 1.9).



**Σχ.1.9: Άθροιση στον V1 των υποδεκτικών πεδίων του LGN με αποτελέσματα της εμφάνιση επιλεκτικότητας προσανατολισμού και χωρικής συχνότητας (Webster 1996)**

Συνοψίζοντας, ο τρόπος με τον οποίο οι νευρώνες του LGN συνάπτονται με τους νευρώνες του V1 είναι υπεύθυνος για την εμφάνιση της επιλεκτικότητας των νευρώνων του V1 σε διαφορετικά χαρακτηριστικά ενός οπτικού ερεθίσματος, όπως ο προσανατολισμός και η χωρική του συχνότητα (περαιτέρω ανάλυση γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο).

## **1.2 Ψυχοφυσικές μέθοδοι**

Μέχρι τα μισά του 20<sup>ου</sup> αιώνα, όπου με τη χρήση της ηλεκτροφυσιολογίας δόθηκε η δυνατότητα να απομονωθούν νευρώνες και να καταγραφεί η απόκριση τους, οι ψυχοφυσικές μετρήσεις ήταν οι μόνες που επέτρεπαν τη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι αισθητήριες πληροφορίες μεταβιβάζονται και οργανώνονται από το οπτικό σύστημα. Πρώτος ο Gustav Fechner τον 18<sup>ο</sup> αιώνα ήταν αυτός, που θεωρώντας το οπτικό σύστημα σαν μαύρο κουτί, συσχέτισε τα χαρακτηριστικά των ερεθισμάτων με τις αποκρίσεις των εξεταζόμενων.

Ένα ωστόσο πρώτο πρόβλημα που προκύπτει σε αυτή τη συσχέτιση είναι ότι το οπτικό σύστημα απαρτίζεται από σύνολα νευρώνων, με διαφορετικά λειτουργικά και ανατομικά χαρακτηριστικά. Επίσης άλλοι ερευνητές όπως ο Helmholtz, ο Hering, ο Hecht κ.α., χρησιμοποιώντας ψυχοφυσικές μεθόδους, απέδειξαν ότι η επεξεργασία του οπτικού σήματος είναι μη – γραμμική.

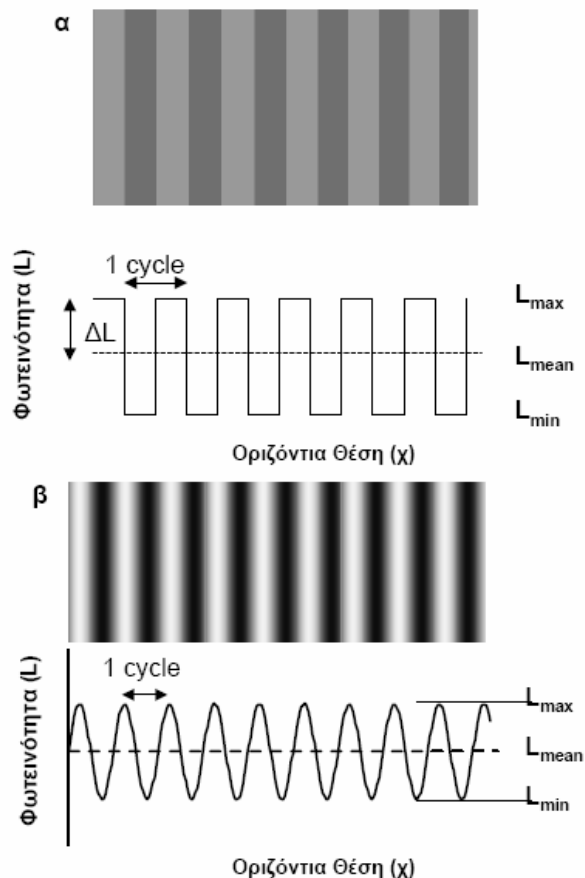
Η έρευνα συσχέτισης όμως των φυσιολογικών χαρακτηριστικών των νευρώνων και των διαφόρων δομών του οπτικού συστήματος (άλλων ανώτερων θηλαστικών με νευρωνικό σύστημα παρόμοιο του ανθρώπινου, π.χ. μακάκος) με την ανθρώπινη οπτική αντίληψη, δημιούργησε έναν νέο χώρο μελέτης (inner psychophysics), που οδήγησε στην κατανόηση από μέρους μας των νευρωνικών δομών του οπτικού συστήματος.

Για να γίνει κατανοητός ο συσχετισμός των φυσικών χαρακτηριστικών των εικόνων που δεχόμαστε από τον περιβάλλοντα χώρο, με τις φυσιολογικές λειτουργίες και αποκρίσεις των νευρώνων και επίσης με την αντιλαμβανόμενη απόκριση (που ολοκληρώνεται σε ανώτερα στάδια επεξεργασίας του οπτικού σήματος, στον εγκέφαλο), αναπτύχθηκαν διάφορες λειτουργικές δοκιμασίες της όρασης. Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή των τρόπων με τους οποίους γίνεται η αξιολόγηση της λειτουργικής όρασης, θα πρέπει να αναφερθούμε σε κάποιες μαθηματικές έννοιες που έχουν σχέση με τα προβαλλόμενα ερεθίσματα.

### 1.2.1 Απλά gratings

Ένα είδος ερεθισμάτων που χρησιμοποιούνται στον τομέα της ψυχοφυσικής είναι τα gratings. Στα ερεθίσματα αυτά η φωτεινότητα διαμορφώνεται περιοδικά και στη πραγματικότητα τα gratings αποτελούν την οπτική περιγραφή μιας απλής μαθηματικής συνάρτησης.

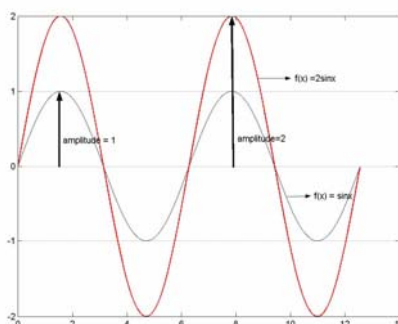
Ένα grating αποτελείται από εναλλασσόμενες σκοτεινές και φωτεινές ράβδους. Η μορφή των ερεθισμάτων αυτών επιλέχθηκε να είναι τέτοια ώστε να συμφωνεί με τις ιδιότητες των νευρώνων, όπως η επιλεκτικότητα προσανατολισμού και χωρικής συχνότητας. Στο σχήμα 1.10α απεικονίζεται ένα απλό square-wave grating του οποίου η φωτεινότητα παρουσιάζει τετράγωνη χωρική διαμόρφωση κατά μήκος του οριζόντιου άξονα  $x$  της οθόνης, ενώ στο σχήμα 1.10β απεικονίζεται ένα sine-wave grating, στο οποίο η φωτεινότητα μεταβάλλεται ημιτονοειδώς κατά μήκος του οριζόντιου άξονα της οθόνης.



Σχ.1.10: Gratings τετραγωνικής διαμόρφωσης (α) και ημιτονοειδούς διαμόρφωσης (β)

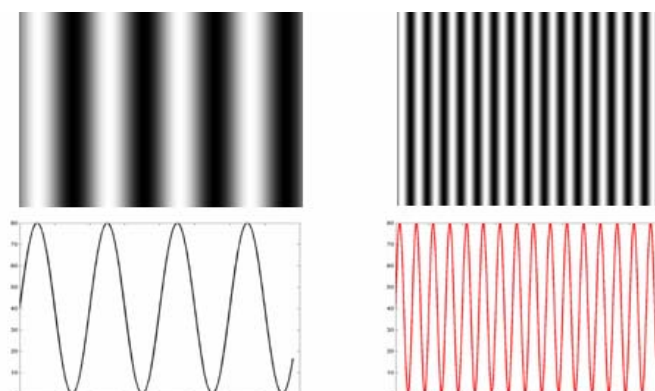
Η απόσταση της μέγιστης τιμής μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης (λόγου χάρη ενός grating) από τον οριζόντιο άξονα λέγεται πλάτος (amplitude) της συνάρτησης.

Αν μία περιοδική συνάρτηση πολλαπλασιαστεί εξωτερικά με έναν αριθμό αυτό θα μεταβάλλει την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της. Για παράδειγμα η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει η συνάρτηση  $\sin(x)$  είναι 1 και -1 αντίστοιχα, ενώ η συνάρτηση  $2\sin(x)$  έχει μέγιστη τιμή 2 και ελάχιστη -2. Για ένα grating η μεταβολή του πλάτους μεταφράζεται σε μεταβολή του (Michelson) contrast του grating. Μεγαλύτερο πλάτος για τη διαμόρφωση της φωτεινότητας ενός grating οδηγεί σε μεγαλύτερο contrast για το grating. Το σχήμα 1.11 προβάλλει τη διαφορά που επιφέρει σε μια συνάρτηση ο πολλαπλασιασμός αυτής εξωτερικά με έναν αριθμό.



**Σχ.1.11: Η συνάρτηση  $\sin(x)$  (μαύρο) και η συνάρτηση  $2\sin(x)$  (κόκκινο)**

Ωστόσο και ο εσωτερικός πολλαπλασιασμός μίας περιοδικής συνάρτησης με έναν αριθμό επιφέρει αλλαγές στην συνάρτηση. Ο εσωτερικός πολλαπλασιασμός μεταβάλλει την συχνότητα (frequency) της συνάρτησης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός ο οποίος πολλαπλασιάζει εσωτερικά τη συνάρτηση τόσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα της. Για ένα grating μικρότερη συχνότητα μεταφράζεται σε πιο παχιές ράβδους, ενώ μεγαλύτερη συχνότητα σε λεπτότερες ράβδους. Για παράδειγμα η συνάρτηση  $\sin(4x)$  έχει μεγαλύτερη συχνότητα από τη  $\sin(x)$  (βλ. σχήμα 1.12).



**Σχ.1.12 : Η συνάρτηση  $\sin(x)$  (κάτω αριστερά) και η συνάρτηση  $\sin(4x)$  (κάτω δεξιά). Gratings με μεγαλύτερη χωρική συχνότητα (επάνω) παρουσιάζουν ταχύτερη εναλλαγή φωτεινών και σκοτεινών ράβδων.**

Τα πιο απλά gratings που χρησιμοποιούνται είναι τα ημιτονοειδούς διαμόρφωσης. Αυτά αποτελούνται από μια μόνο χωρική συχνότητα και ο προσανατολισμός τους, δηλαδή η διεύθυνση στην οποία διαμορφώνεται η φωτεινότητά τους, μπορεί να είναι κάθετος ή να δημιουργεί κάποια γωνία σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα. Η μαθηματική σχέση που περιγράφει ένα απλό sine-wave grating με κάθετο προσανατολισμό είναι η ακόλουθη:

$$L(x) = L_{mean}[1 + C \sin(2\pi Fx + \phi)]$$

όπου  $L(x)$  η φωτεινότητα στην θέση  $x$ ,  $L_{mean}$  είναι η μέση φωτεινότητα της οθόνης,  $C$  το contrast,  $F$  η χωρική συχνότητα και  $\phi$  η φάση.

Από τη σχέση αυτή παρατηρούμε ότι για να δημιουργηθεί αλλά και να περιγραφεί ένα sine-wave grating, θα πρέπει να καθοριστούν οι ακόλουθες παράμετροι:

- 1) η χωρική του συχνότητα (spatial frequency ή sf)  $F$  σε c/deg, που είναι αντιστρόφως ανάλογη του πάχους των γραμμών του grating (grating με μεγάλο πάχος γραμμών εμφανίζει μικρή χωρική συχνότητα και αντίστροφα)
- 2) η μέση φωτεινότητα της οθόνης σε  $cd/m^2$ , που αποτελεί τη μέση τιμή της διαμόρφωσης και περιγράφεται από τη σχέση:

$$L_{mean} = (L_{max} + L_{min}) / 2$$

- 3) το contrast  $C$  (αντίθεση φωτεινότητας), το οποίο εκφράζεται είτε σαν ποσοστό (%C) ή στην κλίμακα dB ( $C_{dB} = 20 \log_{10} C$ ) και περιγράφεται από τον Michelson με την ακόλουθη σχέση:

$$C_M = (L_{max} - L_{min}) / (L_{max} + L_{min})$$

- 4) η φάση  $\phi$ , που περιγράφει την οριζόντια μετατόπιση του grating σε σχέση με την αρχή των αξόνων
- 5) ο προσανατολισμός του grating. Στην περίπτωση που το grating έχει διαφορετικό του κάθετου προσανατολισμό έχουμε διαμόρφωση φωτεινότητας και στους δύο άξονες και η σχέση που περιγράφει ολοκληρωμένα το grating είναι:

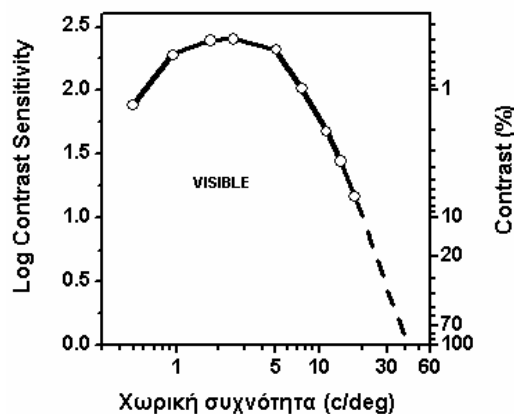
$$L(x,y) = L_{mean}[1 + C \sin\{2\pi F \cos(\omega)y + 2\pi F \sin(\omega)x + \phi\}]$$

### 1.2.2 Contrast Sensitivity function

Μία μέθοδος που αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '60 είναι γνωστή ως ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (contrast sensitivity).

Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης αποτελεί μια ψυχοφυσική εξέταση της «ποιότητας» της όρασης, βασισμένη σε προβαλλόμενα ερεθίσματα – κυρίως gratings – με μεταβαλλόμενες παραμέτρους όπως η χωρική συχνότητα, η φωτεινότητα και το contrast. Κατά την δοκιμασία αυτή, προβάλλεται ένα ερέθισμα (grating) συγκεκριμένης χωρικής συχνότητας και προσανατολισμού, του οποίου μεταβάλλεται το contrast και ο εξεταζόμενος καλείται να βρει το ελάχιστο contrast  $C_{min}$  που απαιτείται από αυτόν για να είναι το grating ορατό. Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης (Contrast Sensitivity, CS) ορίζεται ως το αντίστροφο του ελάχιστου contrast  $C_{min}$ . Έτσι προκύπτει η σχέση  $CS=1/C_{min}$ .

Στο σχήμα 1.13 απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης ενός ανθρώπου.



Σχ.1.13: Contrast Sensitivity Function

Αναλύοντας το σχήμα 1.13 βλέπουμε ότι η μέγιστη ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης παρουσιάζεται για χωρικές συχνότητες μεταξύ 3-5 c/deg. Έχει προταθεί ότι αυτό οφείλεται κυρίως στην υψηλή ευαισθησία αντίθεσης που παρουσιάζουν τα κύτταρα M (στον αμφιβληστροειδή και στον έξω γονατώδη πυρήνα, LGN), τα οποία παρουσιάζουν «μεγάλα» σχετικά υποδεκτικά πεδία (σε σύγκριση με τα κύτταρα P). Για χωρικές συχνότητες < 2 c/deg παρατηρείται μια βαθμιαία μείωση στην ευαισθησία, η οποία έχει νευρωνικά αίτια, και πιο συγκεκριμένα οφείλεται στο φαινόμενο της παράπλευρης αναστολής (lateral inhibition) των νευρώνων. Η μείωση της ευαισθησίας σε χωρικές συχνότητες μεγαλύτερες από 5 c/deg είναι σχεδόν γραμμική, και οφείλεται κατά ένα ποσοστό σε οπτικούς λόγους και στο γεγονός ότι



λιγότεροι νευρώνες είναι συντονισμένοι σε πολύ υψηλές συχνότητες. Το σημείο στο οποίο η καμπύλη της ευαισθησίας αντίθεσης τέμνει τον άξονα  $\chi$ , αποτελεί την μέγιστη διακριτική ικανότητα του οφθαλμού (στο σχήμα 1.13 αυτή είναι περίπου 45 c/deg).

### 1.2.3 CSF και ανάλυση Fourier

Ως γνωστό, εάν γνωρίζουμε τα φασματικά χαρακτηριστικά ενός ερεθίσματος και την Συνάρτηση Μεταφοράς Διαμόρφωσης (Modulation Transfer Function, MTF) ενός οπτικού συστήματος τότε, χρησιμοποιώντας τις απλές αρχές της οπτικής Fourier, μπορούμε να προβλέψουμε την απόκριση του οπτικού συστήματος στην προβολή του ερεθίσματος. Ένα ερέθισμα, όπως τα gratings που αποτελούν περιοδικές συναρτήσεις, μπορεί να αναλυθεί χρησιμοποιώντας τη θεωρία Fourier.

Τον 18<sup>ο</sup> αιώνα ο Jean Baptiste Fourier διατύπωσε την θεωρία ότι οποιαδήποτε περιοδική συνάρτηση μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα άθροισμα αρμονικών συναρτήσεων (ημιτονοειδών ή συνημιτονοειδών) με διαφορετική συχνότητα, φάση και προσανατολισμό η καθεμία. Η ίδια θεωρία επεκτάθηκε και για την ανάλυση εικόνων, όσο πολύπλοκες και αν είναι, παρόλο που η πρώτη χρήση των σειρών Fourier ήταν για την ανάλυση μόνο ακουστικών κυμάτων.

Σύμφωνα με τη παραπάνω θεωρία, οποιαδήποτε περιοδική συνάρτηση  $f(x)$  μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα άθροισμα μιας άπειρης σειράς αρμονικών συναρτήσεων, που έχουν περίοδο ακέραια υποπολλαπλάσια της περιόδου  $X$  του αρχικού κύματος (άρα και πολλαπλάσια συχνότητα). Το άθροισμα αυτό των αρμονικών κυμάτων αποτελεί μια σειρά Fourier για την συνάρτηση  $f(x)$  και περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos mkx + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin mkx$$

όπου  $k = \frac{2\pi}{X}$ ,  $X$  η περίοδος της συνάρτησης.

Οι συντελεστές  $A_0, A_m, B_m$  προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις.

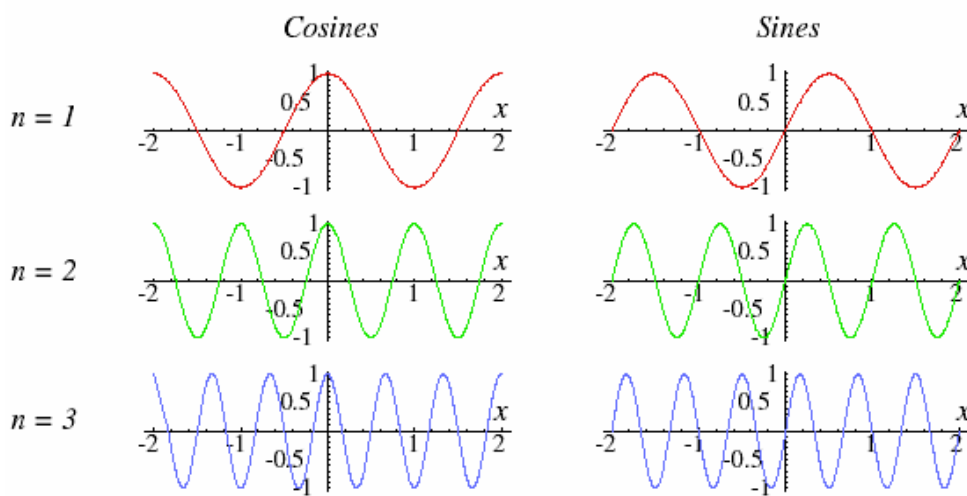
$$A_0 = \frac{2}{X} \int_0^X f(x) dx,$$

$$A_m = \frac{2}{X} \int_0^X f(x) \cos mkx dx,$$

$$B_m = \frac{2}{X} \int_0^x f(x) \sin mkx dx$$

Ο προσδιορισμός των παραπάνω συντελεστών, αναφέρεται ως **ανάλυση Fourier**.

Οι όροι  $n = 1$  έχουν την μεγαλύτερη χωρική περίοδο,  $X$ , κι επομένως την μικρότερη χωρική συχνότητα - την ίδια με την συνάρτηση  $f(x)$ . Για το λόγο αυτό η συχνότητα αυτή αναφέρεται ως **θεμελιώδης** (fundamental) ή **πρώτη αρμονική** συχνότητα. Οι όροι  $n = 2, 3, \dots$  έχουν μικρότερες περιόδους και μεγαλύτερες χωρικές συχνότητες (βλ. Σχ.1.14), η περίοδος είναι  $X/n$  και η συχνότητα ανάλογη του  $n/L$ . Αυτό οι όροι αποκαλούνται **ανώτερες αρμονικές** (higher harmonics).

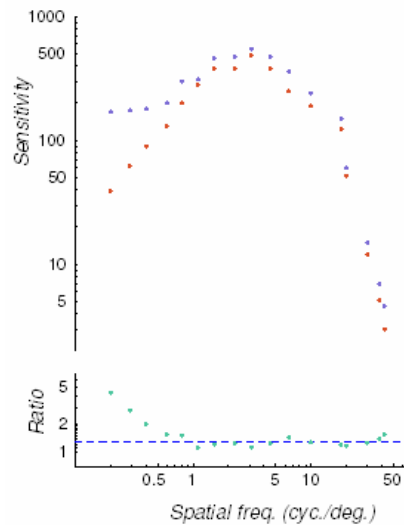


**Σχ.1.14: Αναπαράσταση των τριών πρώτων αρμονικών μιας ημιτονοειδούς (αριστερά) και μιας συνημιτονοειδούς (δεξιά) συνάρτησης με περίοδο  $X=2$ .**

Τυχόν συμμετρίες της συνάρτησης που αναλύεται σε σειρά Fourier, μπορεί να απλοποιήσει σημαντικά τους υπολογισμούς. Έτσι αν η συνάρτηση  $f(x)$  είναι άρτια, δηλαδή συμμετρική γύρω από τον άξονα  $yy'$ , τότε η σειρά Fourier θα περιέχει μόνο συνημίτονα (που είναι άρτιες συναρτήσεις). Δηλαδή θα είναι  $B_m = 0$  για όλα τα  $m$ . Παρόμοια αν η συνάρτηση είναι περιττή, δηλαδή είναι συμμετρική ως προς την αρχή των αξόνων, τότε η σειρά Fourier θα περιέχει μόνο ημίτονα. Δηλαδή θα είναι  $A_m = 0$  για όλα τα  $m$ .

Η εμφάνιση της θεωρίας Fourier έφερε στο προσκήνιο μια μεγάλη συζήτηση, όσον αφορά το αν το οπτικό μας σύστημα αναλύει τα ερεθίσματα με βάση τη θεωρία Fourier ή όχι. Το συγκεκριμένο θέμα προέκυψε μετά την δημοσίευση της εργασίας των Campbell και Robson το 1968, που έκαναν μετρήσεις CS χρησιμοποιώντας δυο

διαφορετικά είδη grating, ένα τετραγωνικής διαμόρφωσης και ένα ημιτονοειδούς. Τα αποτελέσματα της έρευνας τους παρουσιάζονται στο σχήμα 1.15.



**Σχ.1.15: CSF με χρήση square-wave grating (μπλε) και sine-wave grating (κόκκινο)**

Η ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης όταν μετρήθηκε με ένα τετραγωνικής διαμόρφωσης grating ήταν πάντοτε μεγαλύτερη από την ευαισθησία σε grating ημιτονοειδούς διαμόρφωσης. Μάλιστα για συχνότητες μεγαλύτερες των 0.8 c/deg ο λόγος της ευαισθησίας ήταν σταθερός και ίσος με  $4/\pi$  (βλ. κάτω μέρος στο Σχ.1.15).

Η διαφορά αυτή που εμφανίζεται, οφείλεται στο ότι ένα ημιτονοειδές grating αποτελείται από μια μόνο αρμονική, τη θεμελιώδη, εν αντιθέσει με ένα τετραγωνικό grating που αποτελείται από άπειρες αρμονικές. Η σχέση που περιγράφει την ανάλυση ενός κύματος τετραγωνικής διαμόρφωσης σε σειρά Fourier είναι η ακόλουθη:

$$\frac{4}{\pi} (\sin \kappa\chi + \frac{1}{3} \sin 3\kappa\chi + \frac{1}{5} \sin 5\kappa\chi + \dots)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η καμπύλη ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (Contrast Sensitivity Function, CSF) φθίνει για χωρικές συχνότητες μεγαλύτερες των 3 c/deg (βλ. σχήμα 1.15), αναμένεται η μορφή της CSF για μεγάλες συχνότητες να καθορίζεται από την ευαισθησία στον θεμελιώδη όρο του τετραγωνικού grating,

$\frac{4}{\pi} \sin \kappa\chi$  (οι μεγαλύτερες αρμονικές έχουν μεγαλύτερη συχνότητα και μικρότερο πλάτος (μικρότερο contrast) κάτι που τις καθιστά πιο δυσδιάκριτες). Έτσι, το τετραγωνικό grating λαμβάνεται από το οπτικό σύστημα σαν ένα ημιτονοειδές grating με πλάτος  $4/\pi$ .

Για συχνότητες όμως μικρότερες των 0,8 c/deg, η 3<sup>η</sup> αρμονική (~2.4 c/deg) συνεισφέρει περισσότερο στην αντίληψη του ερεθίσματος, μιας και ο οφθαλμός έχει μεγαλύτερη ευαισθησία στην συχνότητα αυτή. Έτσι, η ευαισθησία σε συχνότητες κάτω των 0.8 c/deg, για το τετραγωνικής διαμόρφωσης grating, είναι μεγαλύτερη από την ευαισθησία για το ημιτονοειδές grating, με τον λόγο τους να παρεκκλίνει από το 4/π.

Αφού λοιπόν κάθε ερέθισμα μπορεί να αναλυθεί σε άθροισμα αρμονικών συνιστωσών και θέλοντας να απαντήσουμε στο αρχικό μας ερώτημα, αν δηλαδή το οπτικό μας σύστημα επιτελεί ανάλυση σύμφωνη με τη θεωρία Fourier, τότε θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι η απόκριση του συστήματος σε αυτό το ερέθισμα θα ήταν ίση με το άθροισμα των αποκρίσεων στις επιμέρους αρμονικές συνιστώσες. Δηλαδή η συμπεριφορά του οπτικού συστήματος θα ήταν γραμμική. Επίσης το δυναμικό της απόκρισής σε κάποιο ερέθισμα, ενός μόνο νευρώνα, θα πρέπει να καθορίζεται αποκλειστικά από τη συχνότητα και τον προσανατολισμό του ερεθίσματος και μάλιστα κάθε νευρώνας θα πρέπει να αποκρίνεται σε ένα στενό εύρος συχνοτήτων και προσανατολισμού.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, μπορούμε να πούμε πως ενώ τα νευρωνικά κανάλια του οπτικού συστήματος αποκρίνονται σε ένα συγκεκριμένο εύρος χωρικών συχνοτήτων και προσανατολισμών, διαδικασία δηλαδή αντίστοιχη της ανάλυσης Fourier, το εύρος αυτών των καναλιών δεν είναι τόσο στενό ώστε να μπορούμε να μιλήσουμε για ανάλυση Fourier με αυστηρά μαθηματική έννοια (Graham 1979). Τα παραπάνω καταρρίπτουν σε κάποιο βαθμό την υπόθεση της γραμμικότητας του οπτικού συστήματος, κάτι το οποίο ούτως ή άλλως είχαν αποδείξει πολύ νωρίτερα ερευνητές όπως ο Helmholtz, ο Hering, ο Hecht κ.ά.

#### **1.2.4 Οπτικοί Χρόνοι Αντίδρασης (Visual Reaction Times, RTs)**

Ένας από τους τρόπους αξιολόγησης της λειτουργικής όρασης είναι η καταγραφή απλών χρόνων αντίδρασης. Με τον όρο απλός χρόνος αντίδρασης εννοούμε το διάστημα από την εμφάνιση ενός ερεθίσματος μέχρι την απόκριση, υπό την προϋπόθεση ότι ο εξεταζόμενος έχει εκπαιδευτεί να αποκρίνεται όσο το δυνατόν ταχύτερα' (Teichner, 1954). Ο απλός χρόνος αντίδρασης (ΧΑ) αποτελείται από τρία σκέλη: το χρόνο που χρειάζεται για την πρόσληψη και αντίληψη του ερεθίσματος, το χρόνο για τη μεταβίβαση και διάδοση της νευρικής διέγερσης στα ανώτερα κέντρα επεξεργασίας και τέλος το χρόνο για την εντολή και την εκτέλεση της κινητικής απόκρισης.

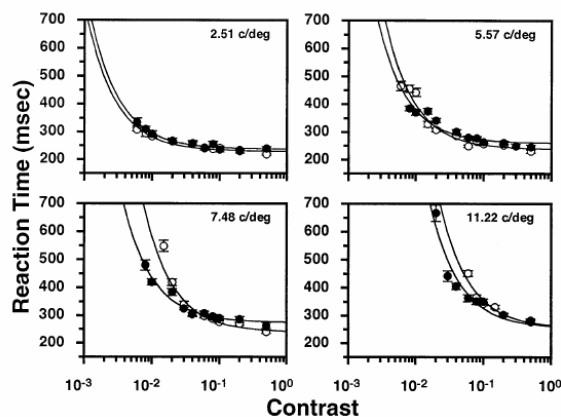
Οι Lupp et al. το 1978 πρότειναν μια εξίσωση που περιγράφει τον απλό χρόνο αντίδρασης:

$$\tau = \tau_{\alpha} + \tau_{\kappa}$$

όπου  $\tau$  είναι ο απλός χρόνος αντίδρασης,  $\tau_{\alpha}$  το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώσπου να καταστεί ανιχνεύσιμο το ερέθισμα και  $\tau_{\kappa}$  το χρονικό διάστημα μέχρι να αποκριθεί ο εξεταζόμενος (π.χ. με το πάτημα ενός κουμπιού) από την ώρα που θα αντιληφθεί το ερέθισμα. Ο χρόνος  $\tau_{\kappa}$  θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητος των χαρακτηριστικών του ερεθίσματος (π.χ. φωτεινότητα, contrast κ.τ.λ.). Έτσι, διαφορές ανάμεσα σε χρόνους αντίδρασης, προκύπτουν ως διαφορές στο χρόνο που το ερέθισμα καθίσταται ανιχνεύσιμο.

Από μελέτες που έχουν γίνει (*Breitmeyer, 1975; Harwerth and Levi, 1978; Felipe et al., 1993; Menees, 1998*), για να διερευνηθούν οι λόγοι που επηρεάζουν τους χρόνους αντίδρασης, προκύπτει ότι οι ΧΑ είναι πιο αργοί όσο το contrast του ερεθίσματος μειώνεται και επίσης όσο η χωρική του συχνότητα αυξάνεται (μεγαλύτεροι χρόνοι για  $sf > 10$  c/deg από ότι για  $sf < 2$  c/deg). Είναι επίσης γνωστό (*Murray and Plainis, 2003*) ότι οι ΧΑ επηρεάζονται από τα ανατομικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά των νευρώνων που μεταφέρουν την οπτική πληροφορία από τον αμφιβληστροειδή στον V1.

Όταν οι ΧΑ παρασταθούν γραφικά συναρτήσει του contrast, προκύπτουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του σχήματος 1.16, που επιβεβαιώνουν την εξάρτηση των χρόνων αντίδρασης από το contrast του ερεθίσματος. Παρατηρώντας το σχήμα βλέπουμε ότι αύξηση του contrast επιφέρει μια μείωση στους χρόνους αντίδρασης, μέχρι να σταθεροποιηθούν σε μια συγκεκριμένη τιμή, γνωστή σαν ασυμπτωτικός ΧΑ ( $\tau_0$ ), της παρεμβάλουσας συνάρτησης.

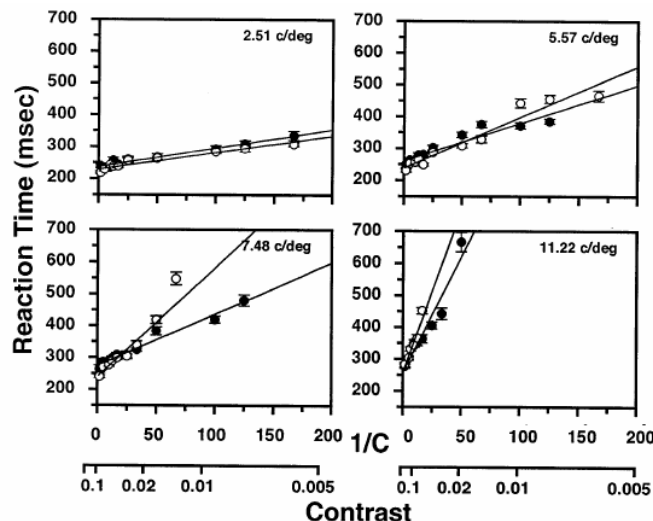


Σχ. 1.16: ΧΑ συναρτήσει του contrast για δύο εξεταζόμενους (κύκλοι, τετράγωνα) και διαφορετικές χωρικές συχνότητες (Plainis and Murray, 2000).

Ο ασυμπτωτικός χρόνος αντίδρασης ( $\tau_0$ ) εξαρτάται από την χωρική συχνότητα του προβαλλόμενου grating. Ερεθίσματα που περιέχουν μικρότερες χωρικές συχνότητες, έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερους  $\tau_0$ . Η μορφή των καμπύλων των ΧΑ συναρτήσεσι του contrast είναι παρόμοια σε κάθε περίπτωση, ανεξάρτητα από την χωρική συχνότητα, και η σχέση που μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά την εξάρτηση των ΧΑ από το contrast είναι η ακόλουθη:

$$\tau = \tau_0 + k \frac{1}{C},$$

όπου  $\tau$  ο χρόνος αντίδρασης,  $\tau_0$  ο ασυμπτωτικός χρόνος,  $k$  η κλίση της καμπύλης και  $C$  το contrast. Στο σχήμα 1.17 παρουσιάζονται τα ίδια δεδομένα, συναρτήσεσι του  $1/C$ . Κρίνοντας από τα σχήματα, βλέπουμε ότι επιβεβαιώνεται η γραμμικότητα που εισάγεται από την παραπάνω σχέση, ανεξάρτητα της  $sf$  που χρησιμοποιείται στην εξέταση.



**Σχ.1.17: ΧΑ συναρτήσεσι του αντίστροφου του contrast ( $1/C$ ) για δύο εξεταζόμενους (κύκλοι, τετράγωνα) και διαφορετικές χωρικές συχνότητες, (Plainis and Murray, 2000).**

Όπως φαίνεται στο σχήμα υπάρχει σημαντική διαφορά στην τιμή της κλίσης  $k$ , για διαφορετικές χωρικές συχνότητες. Στις χαμηλές χωρικές συχνότητες (2.51 c/deg), μικρές αλλαγές στο contrast έχουν μικρή επίδραση στους ΧΑ, με συνεπεία η τιμή του  $k$  να είναι μικρή. Στις μεσαίες χωρικές συχνότητες (5.57 και 7.48 c/deg) η τιμή του  $k$  είναι μεσαία, ενώ στις μεγαλύτερες χωρικές συχνότητες (11.2 c/deg) η τιμή του  $k$  είναι μεγαλύτερη, λόγω της μεγαλύτερης επίδρασης του contrast στους ΧΑ.

Ένα χαρακτηριστικό το οποίο προκύπτει από το σχήμα 1.16 για τους χρόνους αντίδρασης είναι ότι μικρές τιμές της κλίσης  $k$  αντιστοιχούν σε μεγάλη ευαισθησία για

το προβαλλόμενο ερέθισμα και αντίστροφα. Το αντίστροφο λοιπόν της κλίσης  $1/k$  αποτελεί μέτρο εκτίμησης της ευαισθησίας και αναφέρεται ως RT – gain.

Σημαντικό ρόλο επίσης στην μεταβολή του μεγέθους  $k$  παίζει και η φωτεινότητα. Όσο ο λογάριθμος της φωτεινότητας μειώνεται, ο λογάριθμος της κλίσης  $k$  αυξάνεται με σχεδόν γραμμικό τρόπο (*Plainis and Murray, 2000*), επισημαίνοντας ότι υπάρχει στενή συσχέτιση της παραμέτρου αυτής με την ορατότητα του ερεθίσματος.

Όσον αφορά τη σχέση των ΧΑ με τη νευροφυσιολογική δομή του οπτικού συστήματος, φαίνεται πως οι αποκρίσεις των Μ και Ρ νευρώνων διαχωρίζονται μεταξύ τους, κρίνοντας με βάση τις αποκρίσεις τους σε ερεθίσματα χαμηλού contrast (*Plainis and Murray, 2000*). Οι Μ νευρώνες είναι ευαίσθητοι σε χαμηλά contrasts και χαμηλές φωτεινότητες, εν αντιθέσει με τους Ρ νευρώνες που αποκρίνονται ελάχιστα σε contrasts χαμηλότερα από 0.1. Είναι φανερό από τα σχήματα 1.16, 1.17 ότι οι ΧΑ σε ερεθίσματα χαμηλών χωρικών συχνοτήτων, όπου το σήμα μεταδίδεται από τα Μ κύτταρα που έχουν μικρή χωρική ανάλυση, είναι μικροί για contrasts μεγαλύτερα από 0.01. Σε υψηλές χωρικές συχνοτήτες, το σήμα μεταδίδεται από τα Ρ κύτταρα και οι χρόνοι αντίδρασης είναι μικροί μόνο για contrasts μεγαλύτερα από 0.1, εκεί δηλαδή που τα Ρ κύτταρα παρουσιάζουν ισχυρές αποκρίσεις. Καθώς το contrast μειώνεται κάτω από 0.1 σε ερεθίσματα υψηλών χωρικών συχνοτήτων, οι ΧΑ αυξάνονται σημαντικά.

Από τα παραπάνω συμπεράσματα υποδηλώνεται ότι οι οπτικοί ΧΑ μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά την ευαισθησία του οπτικού συστήματος για suprathreshold τιμές contrast, όταν χρησιμοποιούνται gratings για την μέτρηση τους.

### **1.3 Ο ρόλος της φωτεινότητας στη συμπεριφορά της όρασης**

Ήδη από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα, ψυχοφυσικές μελέτες έδειξαν ότι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζει τις δοκιμασίες αξιολόγησης της οπτικής απόδοσης είναι η φωτεινότητα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να διαχωρίζονται οι δοκιμασίες αυτές σε δυο κατηγορίες: μια κατηγορία που ανταποκρίνεται σε χαμηλές φωτεινότητες και οφείλεται στη λειτουργία των ραβδίων και μια που ανταποκρίνεται σε υψηλές φωτεινότητες και οφείλεται στη λειτουργία των κωνίων. Η ύπαρξη των δυο τύπων φωτοϋποδοχέων δίνει τη δυνατότητα στο οπτικό μας σύστημα να αποκρίνεται σε ένα μεγάλο εύρος φωτεινότητας, περίπου 8 – 10 λογαριθμικές μονάδες. Ανάλογα με τα επίπεδα φωτεινότητας, έχουμε διαφορετική συμπεριφορά της όρασης. Έτσι η όραση χωρίζεται στην φωτοοπική, στην μεσοοπική και στην σκοτοοπική.

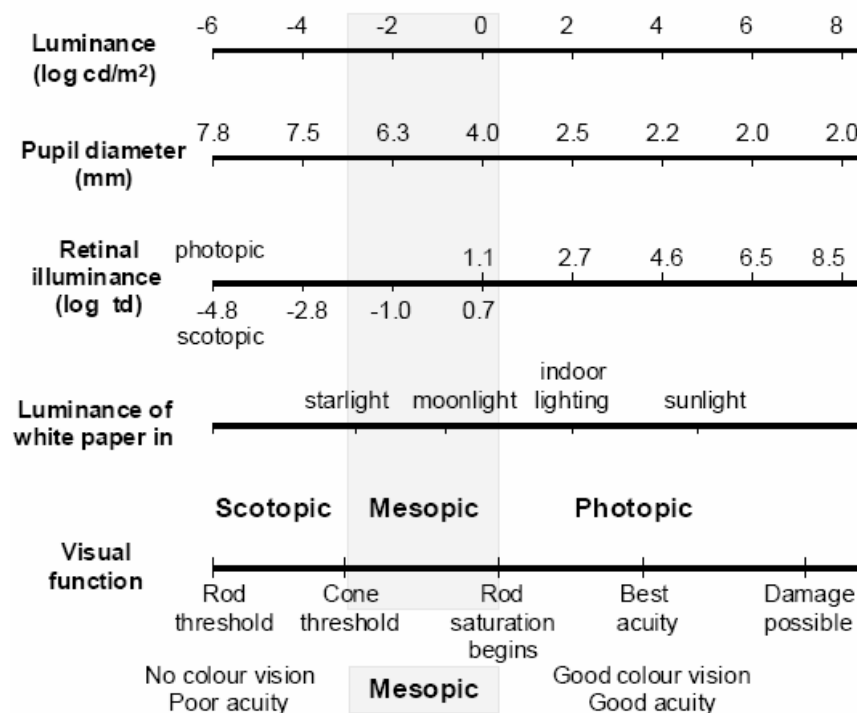
Στην φωτοοπική όραση λειτουργούν μόνο τα κωνία, ενώ τα ραβδία υπόκεινται σε κορεσμό λόγω της υψηλής φωτεινότητας (φωτοοπικές συνθήκες φωτεινότητας:  $>3$

cd/m<sup>2</sup>). Φωτοπικές συνθήκες έχουμε κατά την διάρκεια της ημέρας αλλά και σε φωτισμένους εσωτερικούς χώρους. Η λειτουργία των κωνίων μας επιτρέπει να έχουμε την καλύτερη δυνατή διακριτική ικανότητα και να αντιλαμβανόμαστε τα χρώματα αλλά και τη δομή του κάθε ερεθίσματος.

Στην σκοτοπική όραση (φωτεινότητα < 10<sup>-3</sup> cd/m<sup>2</sup>), έχουμε αναστολή της λειτουργίας των κωνίων και η όραση επιτελείται μόνο με τα ραβδία. Τα τελευταία, ως γνωστό, δεν έχουν καλή διακριτική ικανότητα ούτε χρωματική επιλεκτικότητα. Τα δυο αυτά χαρακτηριστικά των ραβδίων μας δίνουν τη δυνατότητα, σε σκοτοπικές συνθήκες, να μπορούμε να διακρίνουμε μόνο ασπρόμαυρες εικόνες.

Στα ενδιάμεσα επίπεδα φωτεινότητας (10<sup>-3</sup> cd/m<sup>2</sup> – 3 cd/m<sup>2</sup>) και τα δυο είδη φωτοϋποδοχέων λειτουργούν για ένα εύρος περίπου 3.5 λογαριθμικών μονάδων. Η μελέτη της όρασης σε αυτές τις συνθήκες έχει ιδιαίτερη αξία, μιας και οι συνθήκες αυτές επικρατούν κυρίως τη νύχτα όταν οδηγούμε κ.λ.π.

Στο σχήμα 1.18 απεικονίζεται ο διαχωρισμός της όρασης με βάση τα επίπεδα φωτεινότητας.



Σχ.1.18: επίπεδα φωτεινότητας και λειτουργία της όρασης

Σε φωτοπικές συνθήκες, η μέγιστη ευαισθησία παρουσιάζεται στον κεντρικό αμφιβληστροειδή, ενώ μειώνεται όσο κινούμαστε προς την περιφέρεια. Μάλιστα, ένα ερέθισμα που γίνεται αντιληπτό από την κεντρική μοίρα πρέπει να είναι 2 με 3 φορές πιο φωτεινό για να γίνει αντιληπτό από την περιφέρεια. Αυτό υποδηλώνει ότι, σε



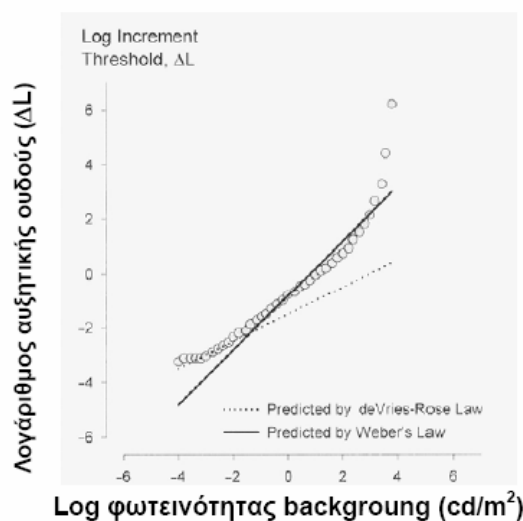
φωτοπικές συνθήκες, η πιθανότητα σωστής αναγνώρισης ενός αντικειμένου μειώνεται με την απόσταση από το κεντρικό βοθρίο (*Thorpe 2001*). Μειώνοντας όμως τη φωτεινότητα, αυξάνεται η ευαισθησία στην περιφέρεια, με αντίστοιχη μείωση αυτής στο κέντρο. Για του λόγου το αληθές, σε σκοτοπικές συνθήκες (πλήρες σκοτάδι) η μέγιστη ευαισθησία έχει βρεθεί στις 20<sup>ο</sup> περιφερικά, εκεί που η πυκνότητα των ραβδίων είναι μέγιστη. Στο απόλυτο σκοτάδι, το κέντρο του αμφιβληστροειδή παρουσιάζει μειωμένη φωτεινή ευαισθησία.

Ανάλογα με το ποιοι φωτοϋποδοχείς χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση εξαιτίας της φωτεινότητας, απαιτείται η σωστή επιλογή του μεγέθους του προς ανίχνευση αντικειμένου. Το αντιλαμβανόμενο μέγεθος ενός ερεθίσματος έχει να κάνει με την χωρική άθροιση (*spatial summation*) που εμφανίζουν οι φωτοϋποδοχείς στην περιφέρεια.

Η διάρκεια προβολής του ερεθίσματος παίζει σπουδαίο ρόλο στην αντίληψη του. Η σχέση της διάρκειας προβολής και της φωτεινότητας έγκειται σε ένα άλλο χαρακτηριστικό της όρασης, την χρονική άθροιση των αποκρίσεων (*temporal summation*). Σε χαμηλές φωτεινότητες, το φαινόμενο αυτό παρατηρείται έντονα, μιας και οι φωτοϋποδοχείς πρέπει να αθροίσουν χρονικά τις αποκρίσεις τους, με απώτερο σκοπό την αύξηση της ευαισθησίας. Σε υψηλές φωτεινότητες δεν παρατηρείται χρονική άθροιση.

Εντούτοις, ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας στην αντίληψη ενός ερεθίσματος είναι και η φωτεινότητα του background (για ανασκόπηση βλ. *Yang 2004*). Το σημείο που μπορούμε να εστιάσουμε στην περιγραφή του ρόλου του background είναι το πόσο πιο φωτεινό ( $\Delta L$ ) πρέπει να είναι το ερέθισμα από το background ( $L$ ) για να γίνει αντιληπτό. Η ικανότητα του οπτικού μας συστήματος να εντοπίσει διαφορές στην φωτεινότητα (*luminance discrimination*) είναι πρωταρχικό χαρακτηριστικό για την όραση. Επομένως αυτό που μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε είναι το ποσό της διαφοράς στην φωτεινότητα του στόχου από το background ( $\Delta L$ , *increment threshold* - αυξητική ουδός) σε σχέση με την φωτεινότητα του background, δηλαδή το λόγο  $\Delta L / L$ . Σε χαμηλά επίπεδα φωτισμού ( $< 0.01 \text{ cd/m}^2$ ) το οπτικό μας σύστημα συμπεριφέρεται ως ιδανικός ανιχνευτής, αφού όσο αυξάνεται η φωτεινότητα του background, η διαφορά φωτεινότητας ( $\Delta L$ , αυξητική ουδός) του ερεθίσματος από το background αυξάνεται περίπου γραμμικά με  $\sqrt{L}$  (*De-Vries' law* -  $\Delta L/\sqrt{L}$ =σταθερό) (*Van Hateren 1993, Hess et al. 1990*). Για μεγαλύτερες φωτεινότητες (μέχρι  $103 \text{ cd/m}^2$ ) του background το κλάσμα  $\Delta L/L$  παραμένει σταθερό, δηλαδή η αυξητική ουδός ( $\Delta L$ ) αυξάνεται σε ευθέως αναλογία με την αύξηση της φωτεινότητας του background (*Weber's law* -  $\Delta L/L$ =σταθερό) (*Van Hateren 1993, Hess et al. 1990*). Σε ακόμα μεγαλύτερες φωτεινότητες ( $>103 \text{ cd/m}^2$ ) καμία από τις παραπάνω σχέσεις δεν

ισχύει γιατί και οι δύο ομάδες φωτούποδοχέων έχουν κορεστεί. Το σχήμα 1.19 περιγράφει τους δυο παραπάνω νόμους.



**Σχ.1.19: Μεταβολές του λογαρίθμου της αυξητικής ουδούς σε σχέση με την φωτεινότητα του background. Η συνεχής γραμμή περιγράφει τον νόμο του Weber και η διακεκομμένη το νόμο του De-Vries (Hess et al., 1990).**

Πρόσφατες μελέτες έδειξαν επίσης ότι η φωτεινότητα ενός στόχου που φτάνει στον οφθαλμό μεταβάλλεται εκθετικά σε σχέση με τη φωτεινότητα του background (Steven's Law) (Whittle 1994, Moroney 2002, Nundy 2002). Συνοψίζοντας τα παραπάνω, η φωτεινότητα του ερεθίσματος πρέπει να διαφέρει πάρα πολύ από αυτή του background για να την αντιληφθούμε.

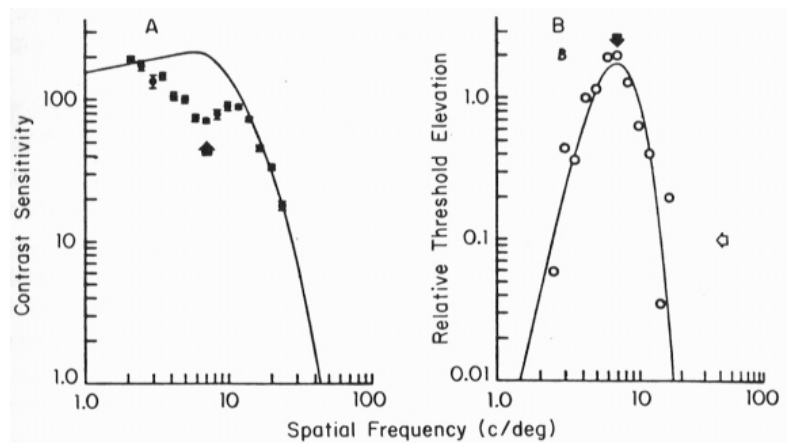
#### **1.4 Νευροφυσιολογικά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου οφθαλμού**

##### **1.4.1 Νευρωνική προσαρμογή**

Μια διαδικασία που επιτελείται στους νευρώνες, γνωστή σαν νευρωνική προσαρμογή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της όρασης με ψυχοφυσικές δοκιμασίες. Το 1969, οι Blakemore και Campbell πραγματοποίησαν ένα ενδιαφέρον πείραμα. Αφού πρώτα υπολόγισαν τη CSF των εξεταζόμενων, τους άφησαν να προσαρμοστούν (παρατεταμένη έκθεση) σε ένα grating υψηλού contrast και καθορισμένης χωρικής συχνότητας. Το αποτέλεσμα ήταν οι εξεταζόμενοι να δείξουν μειωμένη ευαισθησία στην χωρική συχνότητα που αντιστοιχούσε στο ερέθισμα προσαρμογής. Μειωμένη ωστόσο ευαισθησία εμφανίστηκε και σε

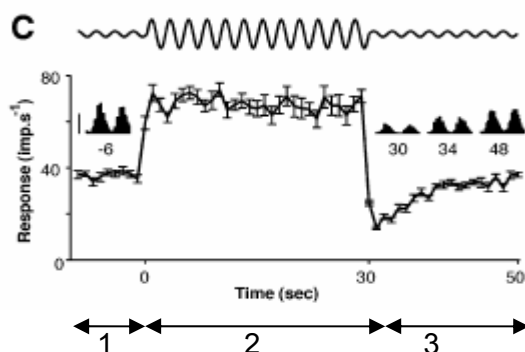
παρακείμενες συχνότητες, αλλά σε μικρότερο ποσοστό. Έτσι, επιβεβαιώνεται κατά κάποιο τρόπο η θεωρία των πολλαπλών παράλληλων νευρωνικών καναλιών. Αν μόνον ένα κανάλι αποτελούσε το νευρωνικό υπόστρωμα της CSF, τότε η μείωση της ευαισθησίας αντίθεσης θα ήταν η ίδια για όλες τις χωρικές συχνότητες.

Το σχήμα 1.20 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής.



**Σχ.1.20:** (αριστερά) Ευαισθησία φωτεινής αντίθεσης μετά από προσαρμογή (παρατεταμένη έκθεση) σε ένα grating υψηλού contrast χωρικής συχνότητας 7 c/deg. (δεξιά) Η αύξηση στο contrast που απαιτείται για την ανάκτηση της αρχικής ευαισθησίας (η κορύφωση συμβαίνει). Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και μετά από προσαρμογή σε άλλες συχνότητες (Blakemore and Campbell, 1969).

Νεότερες έρευνες έδειξαν με τη χρήση της ηλεκτροφυσιολογίας την διαφορά στην απόκριση των νευρώνων μετά από προσαρμογή. Το σχήμα 1.21 δείχνει τα αποτελέσματα της προσαρμογής σε νευρωνικό επίπεδο.



**Σχ.1.21:** Απόκριση νευρώνων ύστερα από προσαρμογή (Solomon 2004)

Μελετώντας το σχήμα 1.21 βλέπουμε ότι κατά το χρονικό διάστημα 1 η απόκριση των νευρώνων είναι η αναμενόμενη. Στο χρονικό διάστημα 2 επιτελείται η διαδικασία της προσαρμογής των νευρώνων. Τέλος, στο χρονικό διάστημα 3 απεικονίζονται οι

μειωμένες αποκρίσεις των νευρώνων λόγω της προσαρμογής και η βαθμιαία αποκατάσταση αυτών με το πέρασ του χρόνου.

Μια άλλη έρευνα (*Levinson 1980*) έδειξε ότι η προσαρμογή δρα και στην επιλεκτικότητα κατεύθυνσης των νευρώνων. Προσαρμογή σε κινούμενο στόχο προκαλεί αύξηση της ουδούς (threshold) που απαιτείται για να ανιχνευθεί στόχος που κινείται στην ίδια κατεύθυνση. Ένα ακόμα από τα συμπεράσματα της μελέτης του ήταν ότι σε νευρωνικό επίπεδο, υπάρχουν δυο ξεχωριστά υποσυστήματα για την ανίχνευση ενός ερεθίσματος, ένα που ανιχνεύει την κίνηση του και ένα που ανιχνεύει τα επιμέρους χαρακτηριστικά του στόχου. Το τελευταίο επιβεβαιώθηκε και από την έρευνα του Maddess το 1988 σε γάτες, που έδειξε ότι ο ρυθμός νευρωνικής απόκρισης, το direction selectivity των νευρώνων και η χρονική συχνότητα ενός ερεθίσματος υπερισχύουν κατά την προσαρμογή σε ένα κινούμενο ερέθισμα, σε σχέση με το contrast του και την χωρική του συχνότητα.

Πρόσφατες έρευνες για την προσαρμογή έδειξαν ότι αυτή, όταν χρησιμοποιείται ερέθισμα με υψηλή χρονική συχνότητα, μπορεί να διαχωριστεί σε δυο φάσεις, μια αργή και μια γρήγορη (*Baccus and Meister 2002*). Η γρήγορη φάση είναι στιγμιαία και επηρεάζει το μέγεθος και τη διάρκεια της απόκρισης των γαγγλιακών κυττάρων. Η φάση αυτή της προσαρμογής δεν εμφανίζεται στον LGN (*Benardete and Kaplan 1997*). Η αργή φάση αντίθετα, επηρεάζει το μέγεθος της απόκρισης των γαγγλίων και όχι τη χρονική συμπεριφορά της (*Baccus and Meister 2002*). Οι δυο αυτές φάσεις εμφανίζονται μόνο στα M κύτταρα τα οποία έχουν υψηλή χρονική ανάλυση και όχι στα P κύτταρα (*Solomon 2004*).

Το 1978, οι Nagshineh και Ruddock διατύπωσαν την άποψη ότι τα αποτελέσματα της παρατεταμένης έκθεσης σε ένα grating επηρεάζονται από το πάχος των γραμμών του grating, ειδικά αν το τελευταίο έχει μικρό contrast. Οι μετρήσεις που έκαναν περιλάμβαναν προσαρμογή σε gratings που είχαν διαφορετικό πάχος για τις φωτεινές και διαφορετικό πάχος για τις σκοτεινές γραμμές. Τα αποτελέσματα της έρευνας τους έδειξαν ότι υπήρχε διαφορά στην προσαρμογή, ανάλογα με το αν το πάχος των σκοτεινών και φωτεινών γραμμών ήταν ίδιο ή όχι. Παρόλα αυτά, ο Georgeson το 1981 επαναλαμβάνοντας τα πειράματα τους κατέληξε ότι δεν υπάρχει διαφορά στην προσαρμογή λόγω του πάχους των γραμμών, είτε το contrast του grating είναι μεγάλο είτε μικρό.

Μια ακόμα ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι η επιρροή της προσαρμογής από το contrast. Πρότερη προσαρμογή σε θολή (blurred) έκδοση μιας εικόνας (Εικ.1.22α) κάνει την αυθεντική εικόνα να εμφανίζεται με τονισμένες λεπτομέρειες (sharp) (*Webster 2002*). Το αντίστροφο παρατηρείται αν η προσαρμογή γίνει σε sharp έκδοση μιας εικόνας (Εικ.1.22β).

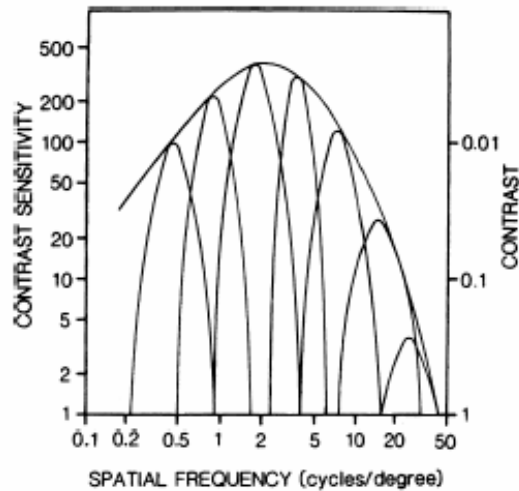


**Εικ.1.22: Επίδραση του contrast στην νευρωνική προσαρμογή (Webster 2002)**

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι η νευρωνική προσαρμογή επηρεάζει και επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Γνωρίζοντας ότι αυτή επιτελείται σε πολλά στάδια της νευρωνικής οδού, οι ψυχοφυσικές δοκιμασίες που γίνονται με χρήση αυτής αποτελούν πλέον ένα από τα πιο αξιόπιστα εργαλεία στην διερεύνηση της λειτουργίας της νευρωνικής δομής του οπτικού μας συστήματος.

#### **1.4.2 Πολλαπλά νευρωνικά κανάλια και χωρικές συχνότητες**

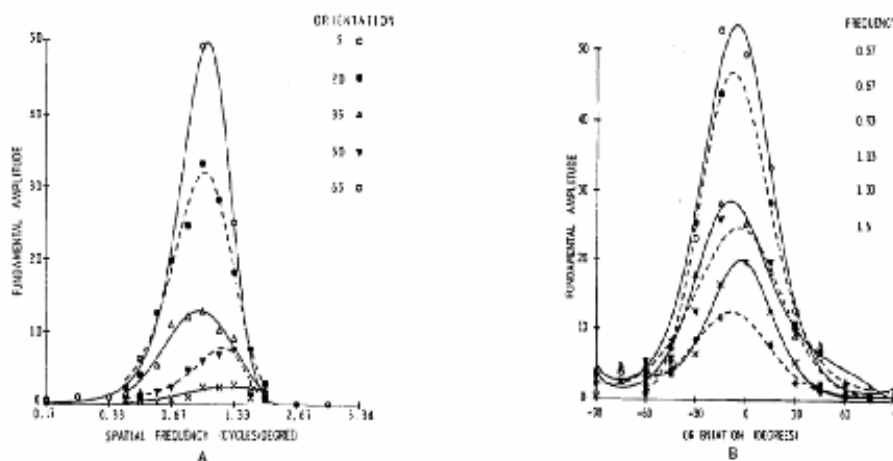
Μία τυπική καμπύλη ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης (CSF) καλύπτει περίπου 8 οκτάβες (μια οκτάβα ισούται με τη διαφορά μεταξύ δυο διαδοχικών δυνάμεων του 2) χωρικών συχνοτήτων. Πολλά στοιχεία συνάγουν στο συμπέρασμα ότι η CSF είναι η περιβάλλουσα πολλαπλών, επικαλυπτόμενων χωρικών νευρωνικών καναλιών (*Blackmore and Campbell, 1969; Tolhurst and Movshon, 1975; De Valois and De Valois, 1988; Billock 2000*), καθένα από τα οποία είναι συντονισμένα σε ένα συγκεκριμένο εύρος (περίπου 1-1.5 οκτάβα) χωρικών συχνοτήτων (βλ. Σχ. 1.23).



**Σχ.1.23: Η CSF περιβάλλουσα πολλών νευρωνικών καναλιών, συντονισμένων σε διαφορετικό εύρος χωρικών συχνοτήτων (Ginsburg,1986)**

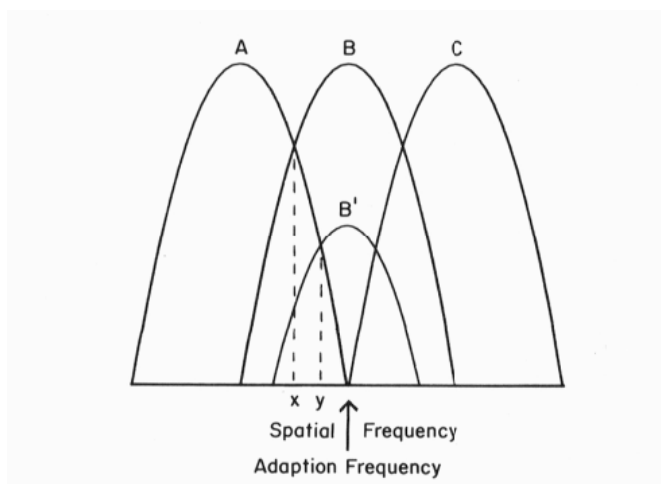
Η θεωρία των πολλαπλών νευρωνικών καναλιών δικαιολογεί τις αποκλίσεις που παρατηρούνται στο σχήμα της CSF και την ευαισθησία ανάμεσα σε διαφορετικούς εξεταζόμενους, αλλά και ανάμεσα στους ίδιους εξεταζόμενους μετά από κάποιο χρόνο (Peterzell et al. 1995, Ginsburg 1986). Αυτές οι αποκλίσεις προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για τη δομή των μηχανισμών που επεξεργάζονται την οπτική πληροφορία (Ginsburg, 1986; Peterzell et al.,1993; Owsley et al. 1983, Peterzell et al.,1995).

Νεότερες έρευνες σε γάτες (Webster 1985), με χρήση της ηλεκτροφυσιολογίας, αλλά και ανθρώπους με χρήση οπτικών προκλητών δυναμικών (VEP) (Arakawa 2000) επιβεβαίωσαν αυτά τα αποτελέσματα (Σχ. 1.24).



**Σχ.1.24: Αποκρίσεις απλού κυττάρου (simple cell) του οπτικού φλοιού γάτας σε ερεθίσματα σταθερής χωρικής συχνότητας και διαφορετικού προσανατολισμού (αριστερά) και σε ερεθίσματα σταθερού προσανατολισμού και μεταβλητής χωρικής συχνότητας (δεξιά) (Webster 1985)**

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των νευρώνων είναι η φαινομενική μετατόπιση της χωρικής συχνότητας ενός ερεθίσματος έπειτα από προσαρμογή. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο Blakemore-Sutton (βλ.Σχ.1.25) και μπορεί να εξηγηθεί από τη θεωρία των πολλαπλών νευρωνικών καναλιών.



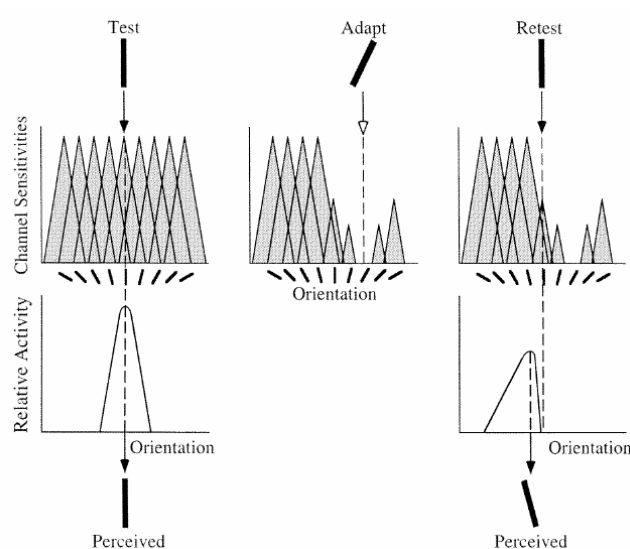
**Σχ.1.25:Επεξήγηση του φαινομένου Blakemore-Sutton (φαινομενική μετατόπιση χωρικής συχνότητας) με βάση την θεωρία των πολλαπλών χωρικών νευρωνικών καναλιών.** Έστω ότι τρία χωρικά κανάλια (A, B, C) παρουσιάζουν ίδια ευαισθησία (σε διαφορετικές όμως συχνότητες). Το σημείο  $x$  πριν την «προσαρμογή» παρουσιάζει κάποια φαινομενική χωρική συχνότητα επειδή ενεργοποιεί κατά τον ίδιο βαθμό τα νευρωνικά κανάλια A και B. Μετά την προσαρμογή σε ένα grating «μεσαίας» χωρικής συχνότητας (βλ. βέλος) η ευαισθησία του καναλιού B μειώνεται σε B'. Ως αποτέλεσμα, μια άλλη χωρική συχνότητα  $y$  (μικρότερη της συχνότητας προσαρμογής) ενεργοποιεί κατά τον ίδιο βαθμό τα νευρωνικά κανάλια A και B (τώρα B') και για αυτό φαίνεται όπως η  $x$  πριν την προσαρμογή (η αντίθετη μετατόπιση παρατηρείται για μια συχνότητα μεγαλύτερη από την συχνότητα προσαρμογής).

### 1.4.3 Πολλαπλά νευρωνικά κανάλια και επιλεκτικότητα προσανατολισμού

Η θεωρία των νευρωνικών καναλιών δεν έχει να κάνει μόνο με την επιλεκτικότητα χωρικής συχνότητας. Επεκτείνεται και στην επιλεκτικότητα προσανατολισμού (βλ.Σχ.1.24).

Μελέτες έχουν δείξει ότι τα νευρωνικά κανάλια του V1 είναι συντονισμένα σε ένα στενό εύρος προσανατολισμών. Πιο συγκεκριμένα, οι Hubel και Wiesel (1965) παρατήρησαν ότι οι νευρώνες στον πρωτοταγή οπτικό φλοιό V1 ήταν συντονισμένοι σε 10-15 'κανάλια' προσανατολισμών, με αποτέλεσμα κάθε κανάλι να εμφανίζει

εύρος  $\sim 12^{\circ} - 15^{\circ}$ . Η ύπαρξη αυτών των ομάδων νευρώνων επιβεβαιώθηκε και με τη μέθοδο της προσαρμογής (βλ. Σχ.1.26). Ο Gilinsky το 1968 έδειξε ότι όταν οι νευρώνες προσαρμόζονται σε ένα grating ενός προσανατολισμού τότε μειώνεται η ευαισθησία τους σε gratings του ίδιου και παρακείμενων προσανατολισμών. Άλλες έρευνες που έγιναν ( *Braddick et al. 1978, Thomas et al. 1979, Green et al. 1980, Webster et al. 1985, Dragoi et al. 2000, Arakawa et al. 2000, He et al. 2001, Teich et al. 2002*) επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα του Gilinsky χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους μέτρησης όπως VEPs, αποκρίσεις μεμονωμένων νευρώνων κ.ά.



**Σχ.1.26: Προσαρμογή σε ένα «λοξό» grating προκαλεί μείωση της ευαισθησίας σε νευρωνικά κανάλια με παρόμοιο προσανατολισμό (πάνω δεξιά). Επιπλέον, επηρεάζει την αντίληψη ενός κάθετου grating, το οποίο φαίνεται με κλίση προς την αντίθετη κατεύθυνση (tilt aftereffect) (κάτω δεξιά) (Braddick et al., 1978).**

Όπως φαίνεται από το σχήμα η απόκριση των νευρώνων μειώνεται αρκετά για τον συγκεκριμένο προσανατολισμό αλλά μειώνεται και για κοντινούς προσανατολισμούς.

Με βάση αποτελέσματα άλλων ερευνών (*Thomas et al. 1979, Phillips et al. 1984*) το εύρος των καναλιών είναι περίπου  $15^{\circ} - 30^{\circ}$ . Όμως, όπως προέκυψε από την έρευνα του Padney το 1997, το εύρος αυτό αντιστοιχεί στους νευρώνες που δεν συνδυάζουν και χρωματική πληροφορία για την αναγνώριση του ερεθίσματος. Αντίθετα, τα νευρωνικά κανάλια που χρησιμοποιούν και την χρωματική πληροφορία έχουν μεγαλύτερο εύρος, που κυμαίνεται μεταξύ  $30^{\circ} - 68^{\circ}$ . Η απόκριση ωστόσο των



νευρώνων και των δυο κατηγοριών έχει την ίδια συμπεριφορά, ανεξάρτητα από το εύρος των καναλιών της κάθε ομάδας (*Bradley et al. 1988*).

Στην εμφάνιση της επιλεκτικότητας προσανατολισμού παίζουν ρόλο και άλλα στοιχεία που έχουν σχέση με τους νευρώνες. Από πρόσφατη έρευνα σε γάτες (*Crowder et al. 2006*) έχει βρεθεί ότι στον V1 υπάρχουν κύτταρα που είναι ισχυρά επιλεκτικά στον προσανατολισμό, κύτταρα που δεν είναι επιλεκτικά και άλλα κύτταρα τα οποία εμφανίζουν επιλεκτικότητα και σε κάθετους με τον προτιμώμενο προσανατολισμούς. Ο Zeki το 1983, έπειτα από έρευνα σε πιθήκους (μακάκος, είδος που εμφανίζει παρόμοια δομή οπτικού συστήματος με τον άνθρωπο), βρήκε ότι στον V1 υπάρχουν λίγοι προσανατολισμένοι νευρώνες στο κέντρο του ενώ η μεγαλύτερη πυκνότητα εμφανίζεται στις  $10^{\circ} - 30^{\circ}$  περιφερικά. Αντίθετα, σε ανώτερα στάδια επεξεργασίας, όπως οι περιοχές V4 και V5 του φλοιού, η αναλογία των προσανατολισμένων νευρώνων είναι αντίστροφη. Από τα αποτελέσματα του Zeki αλλά και από άλλες έρευνες (*Boynton et al. 2003, Fang et al. 2005, Kourtzi et al. 2003*) προκύπτει ότι επιλεκτικότητα προσανατολισμού δεν εμφανίζει μόνο ο V1 αλλά και οι υπόλοιπες περιοχές του φλοιού, οι οποίες με τη δομή τους επηρεάζουν την ισχύ του φαινομένου.

Λόγω του ότι πολλές περιοχές του φλοιού εμφανίζουν επιλεκτικότητα προσανατολισμού και η καθεμιά έχει διαφορετική δομή και λειτουργία, απαιτείται διαφορετικός χρόνος προβολής του ερεθίσματος για την κάθε περιοχή, όταν μελετάται αυτό το νευροφυσιολογικό χαρακτηριστικό με ψυχοφυσικές μελέτες προσαρμογής (*Fang et al. 2005*). Ακόμα και μικρή έκθεση σε ένα adaptor χαμηλού contrast προκαλεί την μείωση της ευαισθησίας σε παρόμοιο grating (*Suzuki 2001*). Έτσι ο χρόνος προβολής καθίσταται μια από τις βασικές παραμέτρους που εξαρτάται άμεσα από την επιλεκτικότητα προσανατολισμού.

Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση που έχει να κάνει με την επιλεκτικότητα προσανατολισμού είναι ότι προσαρμογή σε έναν προσανατολισμό μείωνε την ευαισθησία σε αυτόν, αλλά ταυτόχρονα αύξανε την ευαισθησία ανίχνευσης του κάθετου σε αυτόν προσανατολισμό. Έρευνες που αναφέρουν την παρατήρηση αυτή είναι των *Clifford et al. 2001* και *Dragoi et al. 2002*. Ήδη από το 1998, ο Carandini, μελετώντας γάτες και μακάκους, έδειξε ότι υπήρχε αλληλεπίδραση των νευρώνων που ήταν συντονισμένοι σε κάθετους μεταξύ τους προσανατολισμούς.

Τέλος, ένα ακόμα φαινόμενο με ιδιαίτερα μεγάλη σημασία είναι το tilt aftereffect. Το tilt aftereffect περιγράφει τη φαινομενική αλλαγή που παρατηρείται στους άλλους προσανατολισμούς λόγω της νευρωνικής προσαρμογής. Για παράδειγμα, προσαρμογή σε έναν πλάγιο προσανατολισμό επηρεάζει την αντίληψη ενός κάθετου grating, το οποίο φαίνεται με κλίση προς την αντίθετη κατεύθυνση (βλ. Σχ.1,26).

Πολλές έρευνες (*Gibson 1933, Braddick et al. 1978, Wolfe 1984, Wenderoth et al. 1988*) έχουν επιβεβαιώσει την ύπαρξη του tilt aftereffect.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι η επιλεκτικότητα προσανατολισμού αποτελεί ένα πολυδιάστατο χαρακτηριστικό των νευρώνων του οπτικού φλοιού. Σε αυτό το χαρακτηριστικό επιδρούν πολλοί παράγοντες, που καθιστούν την διερεύνησή του πρόκληση, μιας και δίνει την ευκαιρία να γίνει κατανοητή μια ακόμα λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου.

## **1.5 Φυσικές σκηνές**

### **1.5.1 Οι φυσικές σκηνές ως ερεθίσματα**

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε λόγος για ερεθίσματα τα οποία είναι απλά και μπορούν να περιγραφούν από μια μαθηματική σχέση (gratings). Ωστόσο, το περιβάλλον μέσα στο οποίο ζει και αναπτύσσεται ένας άνθρωπος δεν αποτελείται από αυτά τα απλά ερεθίσματα, αλλά από πολύ πιο σύνθετα, των οποίων η αντίληψη δεν είναι δυνατό να περιγράψει από έρευνες που χρησιμοποιούν τα απλά ερεθίσματα (*Kayser et al. 2004*). Αυτά τα πιο σύνθετα ερεθίσματα είναι γνωστά σαν φυσικές εικόνες .

Μια σειρά από μελέτες για το πώς το ανθρώπινο οπτικό σύστημα αποκωδικοποιεί και διαβιβάζει την αμφιβληστροειδική εικόνα συνηγορεί για το διαμορφωτικό ρόλο των φυσικών εικόνων. Είναι αντιληπτό ότι, κατά τη διαδικασία της εξέλιξης, το πιο αποτελεσματικό οπτικό σύστημα θα επιβιώσει. Με βάση αυτή τη θεώρηση, τα στατιστικά χώρο-χρωματικά (spatio-chromatic) χαρακτηριστικά των φυσικών σκηνών θα πρέπει να έχουν καθορίσει τα χαρακτηριστικά των πρώιμων οπτικών οδών, έτσι ώστε να περιοριστεί η διαβίβασή περιττών πληροφοριών και να διαχωριστεί το χρήσιμο σήμα από το θόρυβο. Ούτως ή άλλως, η απόρριψη της περιττής οπτικής πληροφορίας και η γρήγορη επεξεργασία του χρήσιμου σήματος βοηθά στην μείωση του χρόνου αντίδρασης, κάτι το οποίο παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο για την επιβίωση (π.χ. γρήγορη αντίδραση σε απειλή από εχθρό).

Για τον έλεγχο της υπόθεσης αν το οπτικό μας σύστημα αναπτύσσεται με βάση τις στατιστικές ιδιότητες των φυσικών εικόνων, χρειάζεται να συσχετιστούν τα χαρακτηριστικά αυτά με τις λειτουργίες που επιτελούνται από τους νευρώνες. Έτσι υπάρχουν δύο κλάδοι ερευνητικού ενδιαφέροντος με χρήση εικόνων από το περιβάλλον, οι νευροφυσιολογικές μελέτες με τη χρήση φυσικών σκηνών σαν ερέθισμα και η ανάλυση των φυσικών σκηνών με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού.

Πρώτος ο Barlow (*Barlow, 1961, 1972*) πρότεινε ότι ο χωρικός συντονισμός των νευρώνων του οπτικού συστήματος, έχει διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποβάλλει περιττές πληροφορίες και να διαχωρίζει το πραγματικό σήμα από το θόρυβο. Τα τελευταία 30 χρόνια έχει διατυπωθεί πληθώρα αποδείξεων που υποδηλώνουν ότι το οπτικό σύστημα έχει βελτιστοποιηθεί στο να μεταδίδει μέγιστη πληροφορία των φυσικών εικόνων ή ερεθισμάτων με στατιστικά χαρακτηριστικά παρόμοια με εκείνα των φυσικών σκηνών. Αυτή η ιδιαίτερα δημοφιλής παρατήρηση, υποστηρίζεται από μελέτες σχετικά με τα φασματικά χαρακτηριστικά των κωνίων (πχ *Regan et al., 2001*), τα χωρικά χαρακτηριστικά (υποδεκτικά πεδία) των αμφιβληστροειδικών νευρώνων καθώς και των νευρώνων του οπτικού φλοιού (*Atick and Redlich, 1992; van Hateren, 1993; Baddeley et al., 1997; Chatworthy et al., 2003*) και ψυχοφυσικές μετρήσεις με χρήση φυσικών εικόνων (*Webster and Miyahara, 1997; Webster and Mollon, 1997; Parraga et al., 1998; Parraga et al., 2000*).

Για να γίνει επομένως συσχέτιση μεταξύ των γνωστών χαρακτηριστικών του οπτικού συστήματος, από νευροφυσιολογικές και ψυχοφυσικές μελέτες, με το φασματικό περιεχόμενο των φυσικών εικόνων είναι απαραίτητη η μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών των εικόνων αυτών.

## **1.5.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά φυσικών σκηνών**

### **1.5.2.1 Μετρικές contrast**

Από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των ερεθισμάτων είτε αυτά είναι απλά (π.χ. απλά gratings) είτε σύνθετα (φυσικές εικόνες, σύνθετα gratings), είναι το contrast. Το contrast για ένα απλό ερέθισμα, περιγράφεται ικανοποιητικά από τον ορισμό του Michelson (βλ. κεφάλαιο για περιγραφή gratings). Στον ορισμό αυτό λαμβάνεται υπόψη μόνο η μέγιστη και η ελάχιστη φωτεινότητα των περιοδικών gratings. Αντίστοιχες με αυτή μετρικές για μη περιοδικής διαμόρφωσης ερεθίσματα είναι η μετρική του Weber, η οποία υπολογίζει το τοπικό contrast ενός στόχου με ομοιόμορφη φωτεινότητα έναντι ενός ομοιόμορφα φωτιζόμενου background και η μετρική του Westheimer (*Westheimer 1985*) (για ανασκόπηση βλ. *Peli 1990*).

Εν αντιθέσει, τα πιο σύνθετα ερεθίσματα αποτελούνται από πολλές τιμές φωτεινότητας. Καμιά από τις προαναφερθείσες μετρικές δεν μπορεί να περιγράψει τις διαφορές φωτεινότητας μεταξύ παρακείμενων σημείων που εμφανίζονται στις φυσικές εικόνες (τοπικό ή local contrast). Για να είναι δυνατή η σωστή περιγραφή του

local contrast δημιουργήθηκαν μετρικές που χρησιμοποιούν διαφορετικό τρόπο προσέγγισης.

Δυο από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μετρικές για τον υπολογισμό του local contrast είναι το RMS (*Rubin et al. 1984, Pavel 1989*) και το Band-limited contrast (*Peli 1990*). Το RMS contrast είναι στην ουσία η τυπική απόκλιση των τιμών φωτεινότητας σε μια εικόνα. Η σχέση με την οποία υπολογίζεται είναι η ακόλουθη:

$$C_{rms} = \left[ \frac{\sum L^2(x, y) - \frac{(\sum L(x, y))^2}{N}}{N} \right]^{1/2}$$

Πολλές έρευνες (*Tiirpana et al. 1994, Moulden et. al. 1990, Parraga et al. 2000, Bex et al. 2002, Raj et al.2005*) έχουν δείξει ότι η χρήση του RMS contrast σαν μετρική συσχετίζεται πολύ καλά με τις αποκρίσεις του οπτικού συστήματος.

Το band-limited contrast (*Peli 1990*) αποτελεί μια μετρική που σαν στόχο έχει να συσχετίσει την ένταση ενός σημείου μιας εικόνας με την τοπική μέση φωτεινότητα. Αυτό επιτυγχάνεται διαιρώντας τη φωτεινότητα  $L_b$  κάθε σημείου μιας band-pass φιλτραρισμένης εκδοχής της εικόνας με τη φωτεινότητα  $L_l$  του αντίστοιχου σημείου μιας low-pass φιλτραρισμένης εκδοχής της εικόνας. Όταν ο παρονομαστής ισούται με 0 η διαίρεση αποφεύγεται, αγνοώντας τα σημεία αυτά. Η ακόλουθη σχέση περιγράφει την παραπάνω διαδικασία.

$$C_L(x, y) = \frac{L_b(x, y)}{L_l(x, y)}.$$

Παράγεται με αυτό τον τρόπο ένας πίνακας με τιμές τοπικού contrast (ίσος σε διαστάσεις με την αρχική εικόνα), η μέση τιμή των οποίων δίνει το band-limited contrast της εικόνας:

$$C_{bl} = \overline{C_L(x, y)}.$$

Αν και υπάρχουν έρευνες (π.χ. *Tolhurst and Tadmor 1997*) που υποστηρίζουν ότι το band-limited contrast συσχετίζεται ικανοποιητικά με πειράματα αξιολόγησης της όρασης, η αξιοπιστία της μετρικής έχει αμφισβητηθεί από άλλους. Οι *Parraga et al. 2000, Bex et al. 2002* και *Raj et al.2005* έχουν δείξει ότι ο ορισμός αυτός δεν αντιπροσωπεύει κατάλληλα το τοπικό contrast. Ειδικότερα η έρευνα των *Parraga et al.* έδειξε ότι ο οφθαλμός συνδυάζει πληροφορίες για το contrast από διάφορες χωρικές συχνότητες και όχι από μια, όπως ορίζεται από το band-limited contrast.

Άλλες έρευνες (*Einhauser 2003, Parkhurst 2004, Raj 2005, Frazor 2005*) επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα του Parraga, δείχνοντας ότι οι οφθαλμικές κινήσεις, άρα και η βέλτιστη σάρωση μιας εικόνας, υποκινούνται από αλλαγές στο local contrast που δεν περιγράφονται από το band-limited contrast, μιας και συνδυάζουν πληροφορία από διάφορες χωρικές συχνότητες.

Και άλλες μετρικές έχουν προταθεί για την εκτίμηση του τοπικού contrast. Αυτές περιέχουν εκτίμηση του τοπικού Michelson contrast ανάμεσα σε γειτονικά μέγιστα και ελάχιστα (*Badcock, 1984 a,b*), εκτίμηση του τοπικού Michelson contrast ανάμεσα σε γειτονικά μέγιστα (*Akutsu and Legge, 1995*), χρήση του gradient της φωτεινότητας (*Campbell et al., 1981, Hess and Pointer 1987*) και άλλα.

Η σύγκριση ωστόσο των παραπάνω μετρικών σε contrast matching μετρήσεις, με χρήση φυσικών εικόνων ως ερεθίσματα αυτή τη φορά (*Bex and Makous 2001*), έδειξαν πως το προσλαμβανόμενο (apparent) contrast περιγράφεται καλύτερα από τη χρήση του RMS contrast, ενώ δεν φαίνεται να υπάρχει εμφανής σχέση του προσλαμβανόμενου contrast με το band-limited contrast.

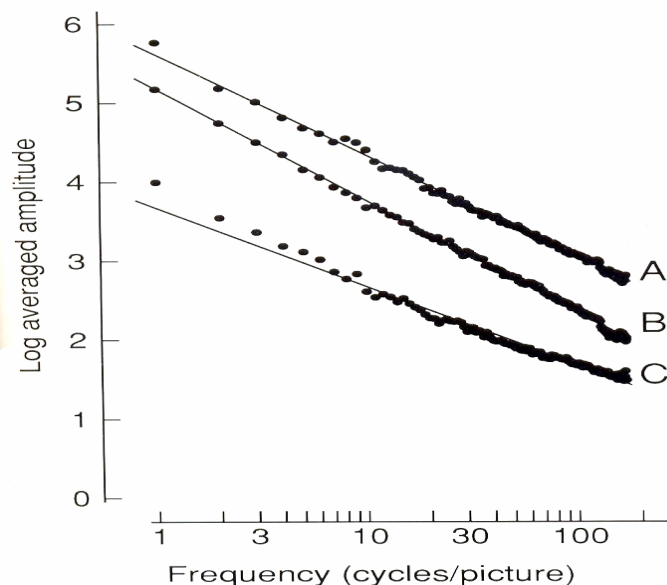
Συνοψίζοντας, φαίνεται ότι η χρήση του RMS contrast είναι καταλληλότερη για την περιγραφή του contrast όσον αφορά τα σύνθετα ερεθίσματα, όπως φυσικές εικόνες και σύνθετα gratings.

### 1.5.2.2 Φάσμα πλάτους Fourier

Στατιστικές αναλύσεις των φυσικών εικόνων έχουν γίνει κυρίως όσον αφορά το φάσμα πλάτους (Amplitude spectrum) και την φάση τους. Έχει αποδειχθεί (*Field, 1987; Burton and Moorhead, 1987, Parraga et al., 1998*) ότι εικόνες φυσικών σκηνών έχουν παρόμοια δεύτερης τάξης χαρακτηριστικά. Το πιο σημαντικό συμπέρασμα για την στατιστική δομή των φυσικών εικόνων έχει να κάνει με το ότι οι χωρικές συχνότητες που αποτελούν μια φυσική σκηνή δεν έχουν το ίδιο φασματικό πλάτος. Από διάφορες έρευνες (βλ. Πιν.1.2 πιο κάτω) προκύπτει ότι το φασματικό πλάτος ακολουθεί ένα εκθετικό νόμο σε σχέση με την χωρική συχνότητα που περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Amplitude}(f) \propto f^{-a}$$

Η παραπάνω σχέση υποδηλώνει ότι το φασματικό πλάτος, εάν παρασταθεί σε λογαριθμικό άξονα έναντι της χωρικής συχνότητας, εμφανίζει μια γραμμική με κλίση  $a$  μείωση όσο η χωρική συχνότητα αυξάνεται. Το σχήμα 1.27 δείχνει ακριβώς τη μείωση αυτή που παρατηρείται.



**Σχ.1.27: Φάσμα πλάτους τριών διαφορετικών αχρωματικών εικόνων συναρτήσει της χωρικής συχνότητας. Και οι δυο άξονες είναι σε λογαριθμική κλίμακα (Tolhurst et al. 1991)**

Όπως παρατηρείται, το φάσμα πλάτους έχει αυτή τη γραμμική μείωση ακόμα και για διαφορετικές εικόνες. Το μόνο που αλλάζει από εικόνα σε εικόνα είναι η κλίση  $a$ . Στον πίνακα 1.2 αναφέρονται οι τιμές της κλίσης  $a$  όπως αυτές έχουν προκύψει από διάφορες έρευνες.

**Πιν.1.2: Τιμές κλίσης  $a$  φασματικού πλάτους (Billock 2000)**

Μελέτη	Πλήθος εικόνων	$a + SD$
Burton and Moorehead ('87)	19	$1.05 \pm 0.12$
Field and Brady ('97)	20	$1.10 \pm 0.14$
Parraga et al. ('98)	29	$1.11 \pm 0.13$
Webster and Miyahara ('97)	48	1.13
Thomson and Foster ('97)	82	1.13
Field ('93)	85	1.10
Van Hateren ('92)	117	$1.06 \pm 0.18$
Tolhurst et al. ('92)	135	$1.20 \pm 0.13$
Schaaf and Van Hateren ('96)	276	$0.94 \pm 0.21$

Dong and Attick ('95)	320	1.15
Σταθμισμένη μέση τιμή	<b>1176</b>	<b>1.08</b>

Γενικά στην βιβλιογραφία οι τιμές για την κλίση  $a$  σε φυσικές εικόνες κυμαίνονται μεταξύ 0.7 και 1.6. Η τιμή της κλίσης  $a$  αυτή υποστηρίζεται πως έχει μεγάλη σημασία για τον τρόπο που το ανθρώπινο οπτικό σύστημα εξελίχθηκε, αφού μπορεί και επεξεργάζεται βέλτιστα χωρικές πληροφορίες φυσικών σκηνών, στις οποίες η κλίση  $a$  έχει τη συγκεκριμένη τιμή (Parraga *et al.*, 2000).

Η χρήση φυσικών σκηνών για τη διενέργεια ψυχοφυσικών μελετών παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες, καθώς πολλά διαφορετικά χαρακτηριστικά μιας φυσικής σκηνής, όπως φωτεινότητα, τοπικό (local) contrast, χρωματικότητα, σκιάς κ.ά. είναι δυνατόν να επηρεάσουν την απόκριση του οπτικού συστήματος. Παρά τις δυσκολίες όμως, η χρήση των φυσικών σκηνών ως ερεθίσματα σε ψυχοφυσικές μετρήσεις καθώς και η μελέτη των στατιστικών τους ιδιοτήτων είναι εξαιρετικά διαδεδομένα τα τελευταία χρόνια και σίγουρα αποτελεί το μέτρο για την αξιολόγηση της οπτικής συμπεριφοράς, σε όσο το δυνατόν πραγματικές συνθήκες.

### **ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η παρούσα εργασία αποτελείται από δυο σκέλη. Το πρώτο σκέλος περιλαμβάνει λήψεις φυσικών σκηνών σε βαθμιαία μειούμενες φωτεινότητες. Η λήψη των εικόνων θα γίνει με βαθμονομημένη κάμερα (Nikon Coolpix 5700) που θα επιτρέπει την ορθή επεξεργασία των εικόνων και θα δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν αυτές σαν ερεθίσματα σε ψυχοφυσικές δοκιμασίες. Οι εικόνες που θα ληφθούν, μετά την γραμμικοποίηση τους θα επεξεργαστούν με χρήση αλγορίθμων σε περιβάλλον Matlab. Ο στόχος της επεξεργασίας είναι να βρεθούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των εικόνων που έχουν να κάνουν με τον προσανατολισμό κατά την μείωση του περιβαλλοντικού φωτισμού.

Το δεύτερο σκέλος της εργασίας έχει σαν στόχο την αξιολόγηση της επιλεκτικότητας προσανατολισμού και χωρικής συχνότητας και την συσχέτιση της με τα νευροφυσιολογικά χαρακτηριστικά της όρασης. Για την επίτευξη του στόχου θα μετρηθούν απλοί οπτικοί χρόνοι αντίδρασης (simple visual RTs) με και χωρίς νευρωνική προσαρμογή, χρησιμοποιώντας απλά gratings με διαφορετικές χωρικές συχνότητες αλλά και διαφορετικούς προσανατολισμούς. Στη συνέχεια θα βρεθούν οι κατάλληλες συναρτήσεις που θα μπορούν να αναπαραγάγουν τα αποτελέσματα, έτσι ώστε να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη δομή των νευρωνικών καναλιών

αλλά και να γίνει μια σύγκριση με αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών. Οι μετρήσεις αυτές αποτελούν αξιολόγηση της οπτικής συμπεριφοράς σε contrast υψηλότερα της ουδούς (suprathreshold), δηλαδή σε συνθήκες που αντιπροσωπεύουν όσο γίνεται καλύτερα την πραγματικότητα.

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την επεξεργασία των εικόνων, αλλά και από τις ψυχοφυσικές δοκιμασίες, θα αναλυθούν περαιτέρω, για να βρεθεί αφενός η σχέση μεταξύ της επιλεκτικότητας προσανατολισμού των νευρώνων και της δομής των φυσικών σκηνών και αφετέρου ο ρόλος της φωτεινότητας στην αντίληψη των φυσικών σκηνών από το οπτικό μας σύστημα.

Συνοψίζοντας, σαν γενικό στόχο η παρούσα εργασία έχει να συνδέσει τα χαρακτηριστικά της νευρωνικής δομής του οπτικού συστήματος με τη δομή και τις ιδιότητες του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο αυτό λειτουργεί και εξελίσσεται.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ**

### **2.1 Ανάλυση φυσικών εικόνων**

#### **2.1.1 Εισαγωγή**

Η χρήση φυσικών εικόνων σε ψυχοφυσικές δοκιμασίες, όπως έχει προαναφερθεί, αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη του οπτικού συστήματος σε συνθήκες που προσεγγίζουν, όσο το δυνατό καλύτερα, τις πραγματικές. Για να χρησιμοποιηθούν οι φυσικές σκηνές ως ερεθίσματα, και να αναλυθούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους, απαιτείται η τήρηση μιας διαδικασίας που περιλαμβάνει λήψη των εικόνων με βαθμονομημένη κάμερα και επεξεργασία με κατάλληλους αλγορίθμους.

#### **2.1.2 Ψηφιακή εικόνα**

Μια εικόνα μπορεί να παρασταθεί ψηφιακά σαν ένας δυσδιάστατος πίνακας που περιλαμβάνει τιμές μιας συνάρτησης  $f(x,y)$ . Οι παράμετροι  $x,y$  αποτελούν χωρικές συντεταγμένες, ενώ η τιμή της  $f$  σε ένα ζεύγος συντεταγμένων  $(x, y)$  ονομάζεται ένταση (intensity) και αντιστοιχεί στην ένταση της φωτεινότητας σε αυτό το σημείο. Ένα ζεύγος συντεταγμένων  $x, y$  αντιστοιχεί στη θέση ενός στοιχείου του πίνακα. Η θέση αυτή ονομάζεται pixel.

Ο όρος διαβάθμιση του γκρι (gray level) περιγράφει την ένταση μονοχρωματικών εικόνων. Για παράδειγμα μία μονοχρωματική εικόνα 8-bit περιέχει 256 διαβαθμίσεις του γκρι (από 0 μέχρι 255). Οι έγχρωμες εικόνες αντίθετα, αποτελούν ένα συνδυασμό διαφορετικών δυσδιάστατων πινάκων. Ο κάθε πίνακας περιέχει τις τιμές φωτεινότητας που αντιστοιχούν σε κάθε χρώμα. Για παράδειγμα, στο RGB σύστημα, μια έγχρωμη εικόνα αποτελείται από τρεις πίνακες, ένα που περιέχει τιμές φωτεινότητας για το Red, ένα για το Green και ένα για το Blue. Η σύνθεση και των τριών πινάκων μαζί σχηματίζει την έγχρωμη εικόνα, όπως εμείς την αντιλαμβανόμαστε.

#### **2.1.3 Λήψη και επεξεργασία των εικόνων**

Στην παρούσα εργασία, οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν ελήφθησαν σε βαθμιαία μειούμενες φωτεινότητες με τη βαθμονομημένη κάμερα Nikon Coolpix 5700 που έχει το εργαστήριο μας. Οι ρυθμίσεις της κάμερας (βλ. Παράρτημα 2) ήταν οι

ίδιες για κάθε σεντ εικόνων και η φωτεινότητα ελέγχονταν με luxmeter (RS 180-7133), τοποθετημένο κοντά στην κάμερα και στραμμένο προς τη φυσική σκηνή.

Το βήμα μεταξύ διαδοχικών φωτεινοτήτων μεταβάλλονταν ανάλογα με τον περιβαλλοντικό φωτισμό. Οι τιμές φωτεινότητας για την κάθε εικόνα παρατίθενται στο Παράρτημα 5. Οι εικόνες που επιλεχθήκαν απεικονίζουν φυσικά τοπία στα οποία δεν έχει γίνει ανθρώπινη επέμβαση. Το περιεχόμενο της κάθε σκηνής περιγράφεται από τους τίτλους των επιμέρους γραφημάτων.

Το αρχικό μέγεθος τους ήταν 2560X1920 pixels. Αφού διατηρήθηκε το κεντρικό κομμάτι των εικόνων, διαστάσεων 512X512 pixels, οι νέες εικόνες γραμμικοποιήθηκαν, με βάση τους διορθωτικούς συντελεστές που προέκυψαν από την βαθμονόμηση της φωτογραφικής μηχανής (βλ. Παράρτημα 1).

Το bit-depth των εικόνων αυξήθηκε από 8 σε 16. Η ανάγκη αυτής της αύξησης προέκυψε από το ότι όταν το bit-depth ήταν 8, ιδιαίτερα σε πολύ μικρές φωτεινότητες, δεν ήταν δυνατό να διακριθούν οι διαφορές μεταξύ των εικόνων λόγω μικρής διακριτικής ικανότητας. Όσες από τις εικόνες είχαν χρόνο λήψης 8 sec δεν χρησιμοποιήθηκαν λόγω κορεσμού.

Πριν την επεξεργασία των εικόνων εφαρμόστηκε σε αυτές ένα εκ-περιστροφής σιγμοειδές φίλτρο το οποίο περιγράφεται παρακάτω. Ο μετασχηματισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform, FFT), που αποτελεί μια πιο γρήγορη έκδοση του Διάκριτου Μετασχηματισμού Fourier (βλ. Παράρτημα 3). Στη μονοδιάστατη περίπτωση αν ο μετασχηματισμός Fourier έχει υπολογιστική πολυπλοκότητα  $O(n^2)$ , ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier έχει υπολογιστική πολυπλοκότητα  $O(n \log_2 n)$ . Σε όλες τις εφαρμογές το dc component αφαιρέθηκε. Όλοι οι αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον Matlab και παρατίθενται στο παράρτημα 4.

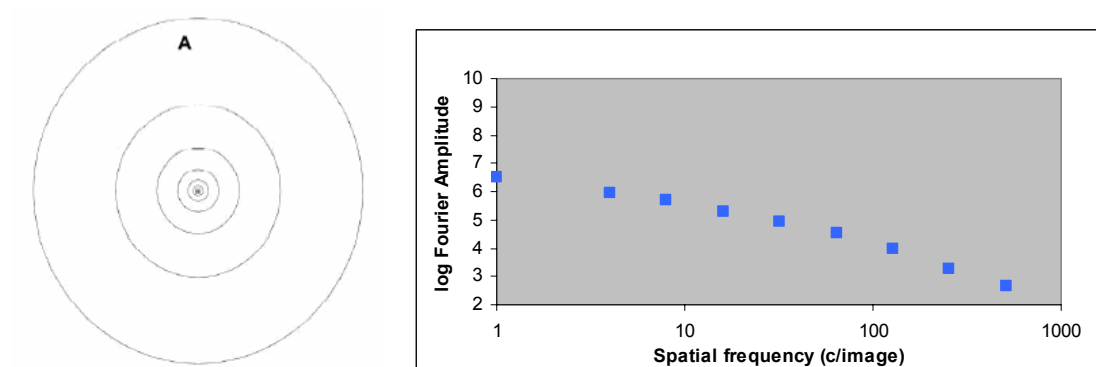
Η προς ανάλυση παράμετρος των εικόνων ήταν το φασματικό τους πλάτος και πως αυτό κατανέμεται σε διαφορετικές χωρικές συχνότητες και προσανατολισμούς.

Εκτενείς έρευνες σε φάσματα πλάτους φυσικών εικόνων έχουν δείξει ότι το φάσμα πλάτους μειώνεται γραμμικά όσο αυξάνεται η χωρική συχνότητα με μια σχέση της μορφής:

$$\text{Amplitude}(f) \propto f^{-a}$$

όπου  $f$  η χωρική συχνότητα και  $a$  η κλίση της ευθείας (για τιμές  $a$  και βιβλιογραφία βλ. Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή, Πιν.1.2). Η παρουσίαση του φάσματος πλάτους σαν μονοδιάστατη συνάρτηση της χωρικής συχνότητας γίνεται υπολογίζοντας τη μέση τιμή του πλάτους για όλους τους προσανατολισμούς, ξεχωριστά για κάθε οκτάβα χωρικής συχνότητας. Η μορφή του φάσματος πλάτους δίνει την δυνατότητα να

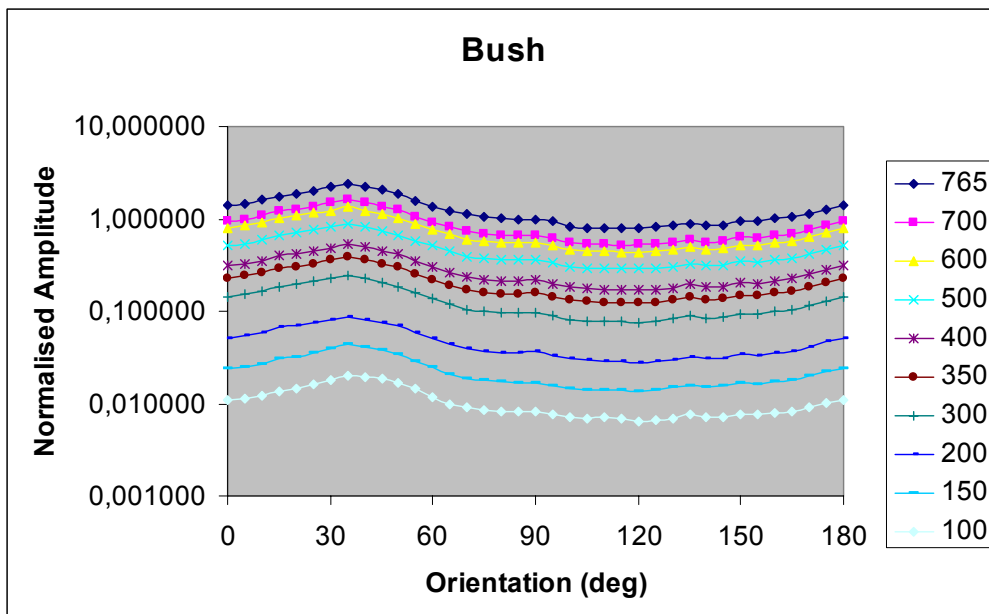
υπολογίζεται αυτή η τιμή εύκολα μέσω ομόκεντρων κύκλων, που ο καθένας περικλείει τα πλάτη μιας οκτάβας. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται ο τρόπος υπολογισμού βάσει των ομόκεντρων κύκλων και το αποτέλεσμα αυτού.



**Σχ.2.1: (α) Υπολογισμός του φάσματος πλάτους κάθε οκτάβας ξεχωριστά και (β) γραφική παράσταση των επιμέρους μέσων τιμών συναρτήσει της χωρικής συχνότητας (και οι δυο άξονες είναι λογαριθμικοί)**

Η γραμμική αυτή μείωση του φάσματος πλάτους θεωρείται χαρακτηριστικό των φυσικών εικόνων. Οι μέσες τιμές, που προέκυψαν για κάθε οκτάβα, κανονικοποιήθηκαν σε σχέση με την μέγιστη τιμή του πλάτους που παρατηρήθηκε.

Το φασματικό πλάτος αναλύθηκε και ως προς την κατανομή του ανά προσανατολισμό. Η παρουσίαση του φάσματος πλάτους σαν μονοδιάστατη συνάρτηση προσανατολισμού γίνεται υπολογίζοντας τη μέση τιμή του πλάτους για όλες τις χωρικές συχνότητες, ξεχωριστά για κάθε προσανατολισμό. Το βήμα μεταξύ διαδοχικών προσανατολισμών επιλέχθηκε να είναι ίσο με  $5^0$ . Οι μέσες τιμές, που προέκυψαν για κάθε προσανατολισμό, κανονικοποιήθηκαν σε σχέση με την μέση τιμή του πλάτους για τον προσανατολισμό των  $90^0$  της μέγιστης φωτεινότητας. Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται το φάσμα πλάτους μιας τυχαίας εικόνας συναρτήσει του προσανατολισμού, σε βαθμιαία μειούμενη φωτεινότητα.



Σχ.2.2: Γραφική παράσταση των κανονικοποιημένων μέσω των τιμών του φασματικού πλάτους συναρτήσεων του προσανατολισμού. Ο άξονας y είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Στο δεξιό μέρος απεικονίζονται οι τιμές φωτισμού σε lux.

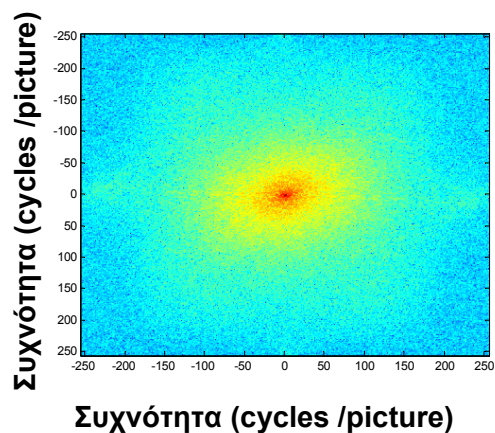
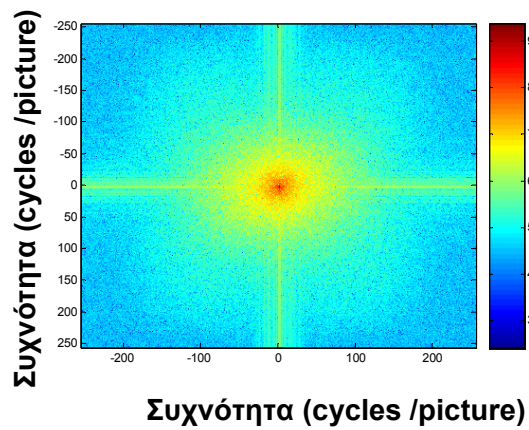
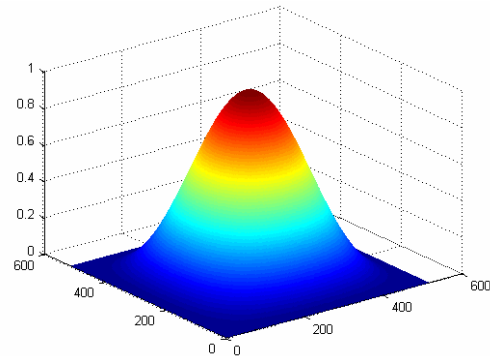
#### 2.1.4 Windowing

Ένα από τα προβλήματα κατά το μετασχηματισμό μιας εικόνας με τον FFT είναι οι παραμορφώσεις που εισάγονται στο φάσμα πλάτους λόγω των ακμών στα όρια της. Επειδή ο μετασχηματισμός αναγνωρίζει τα όρια της εικόνας σαν υψηλή συχνότητα, το φάσμα πλάτους απεικονίζει περισσότερη ενέργεια σε αυτές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, κατά τον αντίστροφο μετασχηματισμό, να εμφανίζονται οι παραμορφώσεις (γνωστές και σαν ringing) στην εικόνα.

Έτσι προέκυψε σαν ανάγκη, πριν μετασχηματιστεί μια εικόνα, να πολλαπλασιαστεί με μια συνάρτηση, η οποία θα μειώνει σταδιακά τις τιμές φωτεινότητας από το κέντρο στην περιφέρεια μέχρι την τιμή του μηδενός. Ο μετασχηματισμός δεν θα αναγνωρίζει πλέον τα όρια της εικόνας και η ενέργεια θα κατανέμεται στο φάσμα όπως είναι στην πραγματικότητα.

Η επιλογή μιας κατάλληλης windowing συνάρτησης είναι δύσκολη, αφενός γιατί πρέπει να ελαχιστοποιηθούν οι συνηθισμένες υψηλής συχνότητας από τα όρια της εικόνας και αφετέρου να διατηρηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα της εικόνας. Αρκετές διαφορετικές windowing συναρτήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί, όπως τα Hamming, Gaussian, Kaiser-Bessel, Rectangle windows και άλλα (για ανασκόπηση βλ. *Harris 1978*). Στις περισσότερες εφαρμογές ωστόσο χρησιμοποιείται το Hamming window.

Στη δική μας εφαρμογή η windowing συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί μία εκ περιστροφής συμμετρική σιγμοειδή συνάρτηση. Στο κέντρο της έχει επίπεδη μορφή (εκεί έχει την τιμή 1) ενώ η μετάβαση στο μηδέν γίνεται εκθετικά. Στο σχήμα 2.3 πάνω απεικονίζεται η windowing συνάρτηση ενώ στη μέση και κάτω απεικονίζεται η διαφορά που προκύπτει από τη χρήση της.



Σχ.2.3: (πάνω) Η windowing συνάρτηση που χρησιμοποιήσαμε. (Μέση) Η εικόνα και ο FFT χωρίς window. (Κάτω) Η εικόνα και ο FFT με χρήση window.

Συγκρίνοντας τα δυο φάσματα πλάτους βλέπουμε ότι στο πρώτο, που δεν έχει χρησιμοποιηθεί window, υπάρχει ενέργεια στις κάθετες και οριζόντιες συχνότητες εξαιτίας των ορίων της τετράγωνης εικόνας. Αντίθετα, στο δεύτερο δεν εμφανίζεται αυτή η ψευδένδειξη, ενώ το υπόλοιπο φάσμα έχει όμοια μορφή και στις δυο εικόνες.

Συνεπώς, καταλήγουμε ότι για τη σωστή μελέτη των εικόνων απαιτείται η χρήση windowing συναρτήσεων, μιας και δεν επιφέρουν καμιά αλλαγή στα φάσματα πλάτους εκτός από την αφαίρεση των αποτελεσμάτων της πεπερασμένης διάστασης του FFT.

## **2.2 Ψυχοφυσικές δοκιμασίες επιλεκτικότητας προσανατολισμού και χωρικής συχνότητας**

### **2.2.1 Εισαγωγή**

Για την μελέτη της επίδρασης της νευρωνικής προσαρμογής διενεργήθηκαν ψυχοφυσικές δοκιμασίες με χρήση απλών ημιτονοειδών gratings, των οποίων μεταβάλλονταν η χωρική συχνότητα και ο προσανατολισμός. Έγινε καταγραφή απλών οπτικών χρόνων αντίδρασης (RTs) σε τιμές contrast μεγαλύτερες της ουδούς (suprathreshold).

### **2.2.2 Εξεταζόμενοι**

Οι εξεταζόμενοι ήταν δύο (SP και BZ), οι οποίοι είχαν πρότερη εμπειρία σε ψυχοφυσικές μετρήσεις. Ο SP ήταν άνδρας 36 ετών και ο BZ άντρας 23 ετών. Ο SP είχε διορθωμένη για διαθλαστικά σφάλματα όραση ενώ ο BZ κανονική για την απόσταση των δύο μέτρων στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Κανένας από τους δύο δεν παρουσίαζε κάποια παθολογία στην όραση. Τα δεδομένα συγκεντρωθήκαν από τον κυρίαρχο (dominant) οφθαλμό των δύο εξεταζόμενων (αριστερός οφθαλμός για τον SP και δεξιός οφθαλμός για τον BZ). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με φυσική κόρη, μέσα σε σκοτεινό δωμάτιο.

### **2.2.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός**

Τα ερεθίσματα παρουσιάστηκαν σε μία οθόνη Sony GDM F-520 CRT, με ρυθμό ανανέωσης 120 Hz και μέση φωτεινότητα 30 cd/m<sup>2</sup>. Οι λειτουργίες γάμμα της οθόνης (gamma functions) για το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε χρωματικό «κανάλι» βαθμονομήθηκαν με μεγάλη ακρίβεια με φασματοραδιόμετρο (PR650,

Photoresearch, Chatsworth, USA). Με την πραγματοποίηση της διαδικασίας βαθμονόμησης των «χρωματικών καναλιών» της οθόνης, επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια στον προσδιορισμό των συντεταγμένων χρωματικότητας (X,Y - του χρωματικού φάσματος CIE) και φωτεινότητάς τους (ίση με 0,01 cd/m<sup>2</sup>). Τα ερεθίσματα αναπαρήχθησαν από μία VSG 2/5 (Cambridge Research Systems (CRS), Rochester, UK) κάρτα γραφικών, με 15-bit ανάλυση ανά χρωματικό κανάλι. Οι εξεταζόμενοι αποκρίνονταν με το πάτημα ενός κουμπιού της συσκευής απόκρισης CB6 (Cambridge Research Systems (CRS), Rochester, UK). Η σύνδεση της συσκευής απόκρισης με την κάρτα VSG 2/5 ήταν ασύρματη και πραγματοποιούνταν μέσω υπερύθρων.

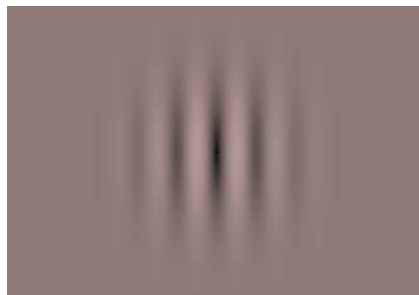
#### 2.2.4 Ερεθίσματα

Τα ερεθίσματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν απλά gratings με ημιτονοειδή διαμόρφωση φωτεινότητας. Η εξίσωση που περιγράφει τη διαμόρφωση του προφίλ φωτεινότητας ενός τέτοιου grating με μηδενική αρχική φάση ( $\varphi=0$ ), είναι,

$$L(x) = L_{mean}[1 + C \sin(2\pi Fx)],$$

όπου  $L(x)$  η φωτεινότητα στην θέση  $x$ ,  $L_{mean}$  είναι η μέση φωτεινότητα της οθόνης,  $C$  το contrast και  $F$  η χωρική συχνότητα του grating.

Οι ακμές που δημιουργούνται στην άκρη του ερεθίσματος με την οθόνη έχει βρεθεί ότι επηρεάζουν την ανιχνευσιμότητα του grating. Για αυτό το λόγο τα ερεθίσματα πολλαπλασιάστηκαν με μία συνάρτηση Gabor, η οποία έχει τη μορφή Gaussian συνάρτησης, με διάμετρο 100 pixels στο μισό ύψος του Gaussian προφίλ και με τυπική απόκλιση 1.2 deg, όταν μετρήθηκε από απόσταση 2 m. Στο σχήμα 2.4 απεικονίζεται το ερέθισμα που χρησιμοποιήθηκε, όπως αυτό φαίνεται στην οθόνη.



Σχ.2.4: Απλό ημιτονοειδές grating, πολλαπλασιασμένο με μια Gabor συνάρτηση

### 2.2.5 Πειραματική διαδικασία

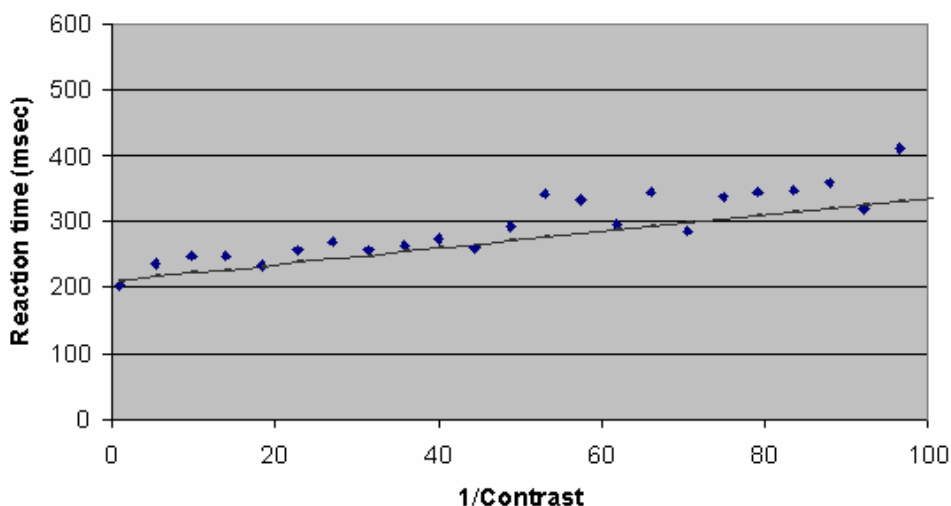
Η ψυχοφυσική δοκιμασία που διενεργήθηκε περιελάμβανε απόκριση των εξεταζόμενων όταν εμφανιζόταν το test grating ύστερα από νευρωνική προσαρμογή στο adapting grating (ή adaptor).

Το test grating είχε χωρική συχνότητα ίση με 4 c/deg και προσανατολισμό είτε  $0^{\circ}$  είτε  $90^{\circ}$ . Το contrast που χρησιμοποιήθηκε ήταν 4 φορές μεγαλύτερο από την ουδό του κάθε εξεταζόμενου. Η ουδός προσδιοριζόταν για τον εξεταζόμενο μέσω της CSF του. Η μέθοδος εύρεσης της ουδούς ήταν η μέθοδος της «ρύθμισης» (method of adjustment), όπου ο εξεταζόμενος είναι ελεύθερος να ρυθμίσει μια μεταβλητή (π.χ. την ένταση) του ερεθίσματος αυξομειώνοντας την, μέχρι να καταλήξει σε μια απόκριση (συνήθως χρησιμοποιώντας κάποιον «ροοστάτη»)

Η δοκιμασία περιελάμβανε τρία ξεχωριστά μέρη μετρήσεων. Στο καθένα από αυτά μεταβαλλόταν διαφορετική παράμετρος του adapting grating. Στο πρώτο μέρος των μετρήσεων της δοκιμασίας η χωρική συχνότητα του adaptor ήταν 4 c/deg (ίση με αυτή του test grating) και ο προσανατολισμός του  $90^{\circ}$ . Το Michelson contrast  $C_M$  που χρησιμοποιήθηκε ήταν 5%, 10%, 20%, 40% και 100%.

Στο δεύτερο μέρος των μετρήσεων η χωρική συχνότητα του adaptor άλλαζε. Οι χωρικές συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν, εκφρασμένες σε οκτάβες (1 οκτάβα = διαφορά μεταξύ δυο διαδοχικών δυνάμεων του 2), ήταν 0, 0.5, 1, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 3, 3.5 και 4. Οι παραπάνω τιμές αντιστοιχούν σε 1, 1.41, 2, 2.83, 3.36, 4, 4.76, 5.66, 8, 11.31 και 16 c/deg. Ο προσανατολισμός του ήταν  $90^{\circ}$ . Για τον υπολογισμό του contrast του adaptor έγιναν καταγραφές RTs με χρήση του test grating σε διαφορετικά Michelson contrast, από 100% ως την τιμή  $2 \cdot C_{min}$  σε 32 βήματα της κλίμακας  $1/Contrast$ . Η σχέση των χρόνων αντίδρασης, όταν παρασταθούν γραφικά συναρτήσει του  $1/Contrast$ , είναι ισχυρά γραμμική (Plainis and Murray 2000). Οι καταγραφές αυτές έγιναν με σκοπό να υπολογιστεί, για τον κάθε εξεταζόμενο ξεχωριστά, το contrast σε κάθε χωρική συχνότητα που ισοδυναμεί με το contrast  $C=20\%$  στους 4 c/deg, ώστε να έχουν την ίδια αντίδραση στους οπτικούς χρόνους και στην ευαισθησία αντίληψης. Στο σχήμα 2.5 απεικονίζεται ένα παράδειγμα αυτού του είδους μετρήσεων.





**Σχ.2.5: Χρόνοι αντίδρασης σε μειούμενο contrast.**

Η εξίσωση που περιγράφει την ευθεία στο παραπάνω σχήμα είναι η ακόλουθη:

$$RT = \text{Slope} * 1/C + b$$

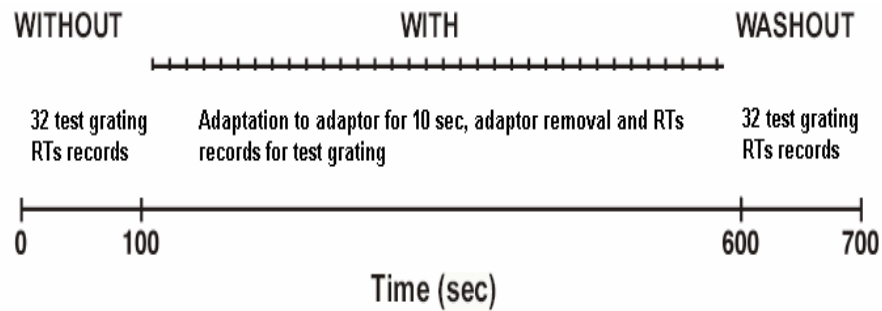
όπου RT είναι ο χρόνος αντίδρασης, Slope είναι η κλίση της ευθείας, 1/C το αντίστροφο του contrast και b ο σταθερός όρος.

Θέτοντας όπου C την τιμή 0.2 (20%) στην συνάρτηση που προέκυψε για τους 4 c/deg, βρέθηκε ο αντίστοιχος χρόνος αντίδρασης RT. Λύνοντας την εξίσωση της ευθείας της κάθε χωρικής συχνότητας ως προς C και θέτοντας την τιμή RT που προέκυψε στο προηγούμενο βήμα, βρέθηκε για κάθε χωρική συχνότητα το ισοδύναμο contrast. Με τις ίδιες μετρήσεις δίνεται η δυνατότητα να υπολογιστεί και η ποσότητα RT-gain. Το μέγεθος RT-gain είναι το αντίστροφο της κλίσης της ευθείας που απεικονίζεται στο σχήμα 2.5. Ο υπολογισμός του δίνει τη δυνατότητα να μεταφραστεί η αλλαγή στους χρόνους αντίδρασης σε αλλαγή της ευαισθησίας, για τιμές contrast μεγαλύτερες της ουδού (suprathreshold).

Στο τρίτο μέρος των μετρήσεων άλλαζε ο προσανατολισμός του adaptor. Η χωρική του συχνότητα ήταν 4 c/deg και το contrast  $C_M = 20\%$ . Οι προσανατολισμοί που χρησιμοποιήθηκαν ήταν  $0^\circ, 45^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 85^\circ, 88^\circ, 90^\circ, 92^\circ, 95^\circ, 100^\circ, 110^\circ$  και  $135^\circ$  όταν ο προσανατολισμός του test grating ήταν  $90^\circ$ , ενώ όταν ο προσανατολισμός του test ήταν  $0^\circ$  οι προσανατολισμοί του adaptor ήταν αντίστοιχα  $0^\circ, 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 178^\circ, 175^\circ, 170^\circ, 160^\circ$  και  $135^\circ$ .

Κάθε σετ μετρήσεων αποτελούνταν από 32 καταγραφές απλών χρόνων αντίδρασης (WITHOUT), 32 καταγραφές RTs έπειτα από 10 sec προσαρμογή στο adapting grating και τέλος 32 καταγραφές RTs για το test χωρίς να χρησιμοποιείται το adapting. Οι εξεταζόμενοι καλούνταν να αποκριθούν όσο το δυνατό πιο γρήγορα

σε κάθε εμφάνιση του test grating. Το χρονικό διάστημα προβολής του test στην οθόνη ήταν 340 msec ενώ το χρονικό διάστημα που μεσολαβούσε από την εξαφάνιση του test μέχρι την επανεμφάνιση του κυμαινόταν από 1500 ως 2500 msec. Το ίδιο χρονικό διάστημα μεσολαβούσε για την εμφάνιση του test grating έπειτα από την εξαφάνιση του adaptor. Η διαδικασία απεικονίζεται στο σχήμα 2.6.



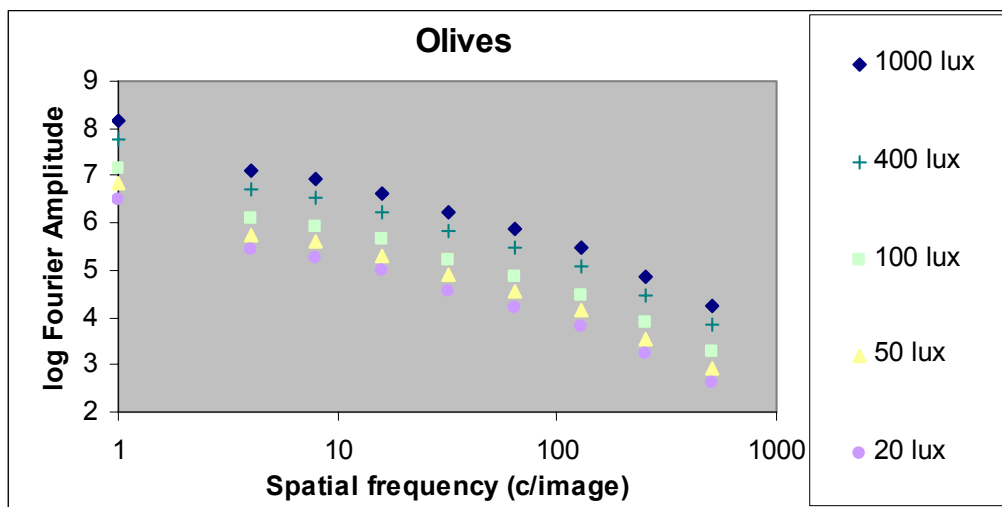
**Σχ.2.6: Πειραματική διαδικασία**

Από τις καταγραφές που έγιναν διατηρηθήκαν μόνο όσες από αυτές εμπεριέχονταν στα όρια δυο τυπικών αποκλίσεων γύρω από τη μέση τιμή ( $-2 SD < 95\%$  των καταγραφών  $< 2 SD$ ). Στις μετρήσεις έγινε exponential και gaussian best-fitting χρησιμοποιώντας το Curve Fitting Toolbox του Matlab.

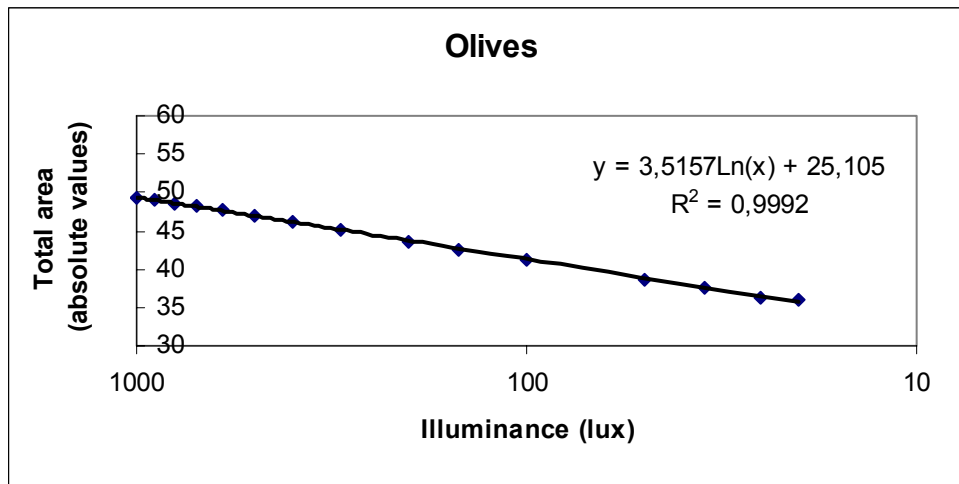
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 3.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ

Οι εικόνες, έπειτα από την γραμμικοποίηση τους, επεξεργασθήκαν με τους αλγόριθμους που αναπτύχθηκαν (βλ. Παράρτημα 4). Αναλύθηκε το φασματικό πλάτος των εικόνων, αφενός για την κατανομή του ανά χωρική συχνότητα, λαμβάνοντας τις μέσες τιμές αυτού για όλους τους προσανατολισμούς και αφετέρου για την κατανομή του ανά προσανατολισμό, λαμβάνοντας τις μέσες τιμές του για όλες τις χωρικές συχνότητες. Έπειτα, οι τιμές του φασματικού πλάτους που προέκυψαν κανονικοποιήθηκαν. Η κανονικοποίηση των τιμών του πλάτους για την ανάλυση ως προς τις χωρικές συχνότητες, έγινε συναρτήσει της μέγιστης φωτεινότητας, ενώ για τους προσανατολισμούς συναρτήσει της τιμής του πλάτους στον προσανατολισμό  $90^{\circ}$  της εκάστοτε μέγιστης φωτεινότητας. Στο τέλος, επιλέχθηκαν οι φωτεινότητες που ήταν κοινές για όλα τα σετ εικόνων και ελήφθησαν οι μέσοι όροι των τιμών του φασματικού πλάτους από όλες τις εικόνες. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο για τις χωρικές συχνότητες όσο και για τους προσανατολισμούς παρατίθενται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχ.3.1: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν τις εικόνες Olives. Οι ενδιάμεσοι φωτισμοί παραλήφθηκαν χάριν ευκολίας αντίληψης. Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα)

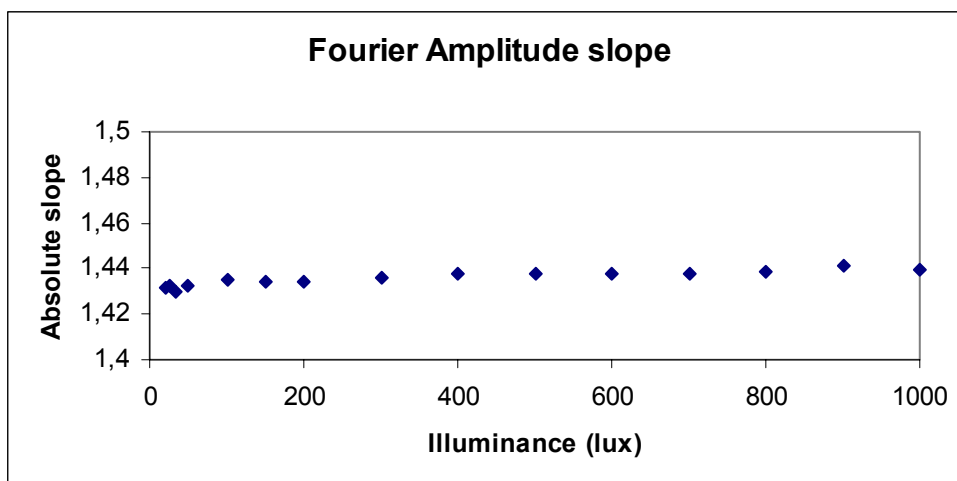


Σχ.3.2: Εμβαδό, συνολικά για όλες τις χωρικές συχνότητες, που περικλείεται από τις καμπύλες κατανομής του φασματικού πλάτους ανά οκτάβα συναρτήσεως του φωτισμού. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν τις εικόνες Olives. Περιλαμβάνονται όλοι οι φωτισμοί. Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).

Παρατηρώντας το σχήμα 3.1 βλέπουμε ότι η τιμή του φασματικού πλάτους είναι μεγάλη στις χαμηλές χωρικές συχνότητες και μειώνεται σχεδόν γραμμικά όσο αυξάνεται η χωρική συχνότητα. Η ίδια κατανομή παρατηρείται και όσο μειώνεται η φωτεινότητα. Η κλίση της γραμμικής μείωσης που παρατηρείται (εδώ ίση με 1.43) παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από την φωτεινότητα στην οποία λήφθηκε η εικόνα. Το ίδιο ισχύει και για τις ενδιάμεσες φωτεινότητες που έχουν παραληφθεί (αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε εικόνα και για όλες τις φωτεινότητες παρατίθενται στο παράρτημα 5).

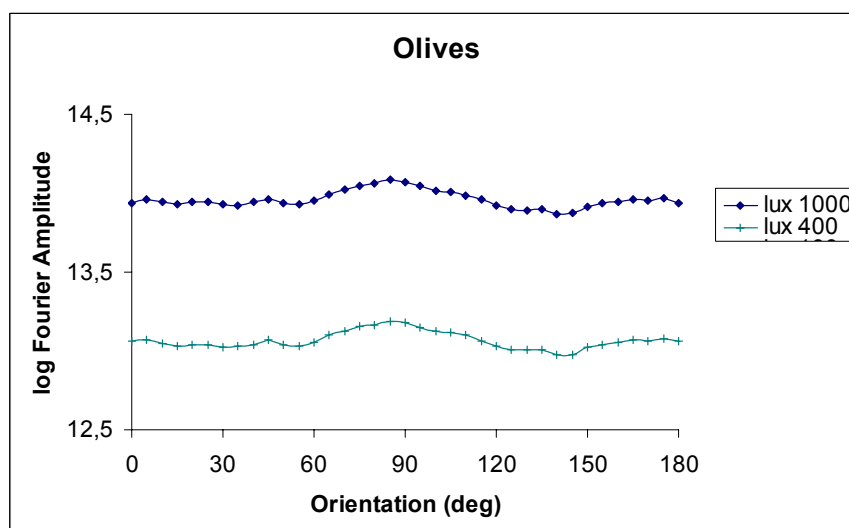
Από το σχήμα 3.2, που απεικονίζει το εμβαδό που περικλείεται από τις καμπύλες κατανομής σε σχέση με το φωτισμό, παρατηρούμε ότι η μείωση του φωτισμού προκαλεί μείωση του φασματικού πλάτους. Μάλιστα, όταν ο φωτισμός παρασταθεί σε λογαριθμικό άξονα η μείωση του πλάτους είναι γραμμική (βλ. εξίσωση στο γράφημα).

Στο σχήμα 3.3 απεικονίζεται η σταθερότητα της κλίσης του πλάτους σε σχέση με την φωτεινότητα.

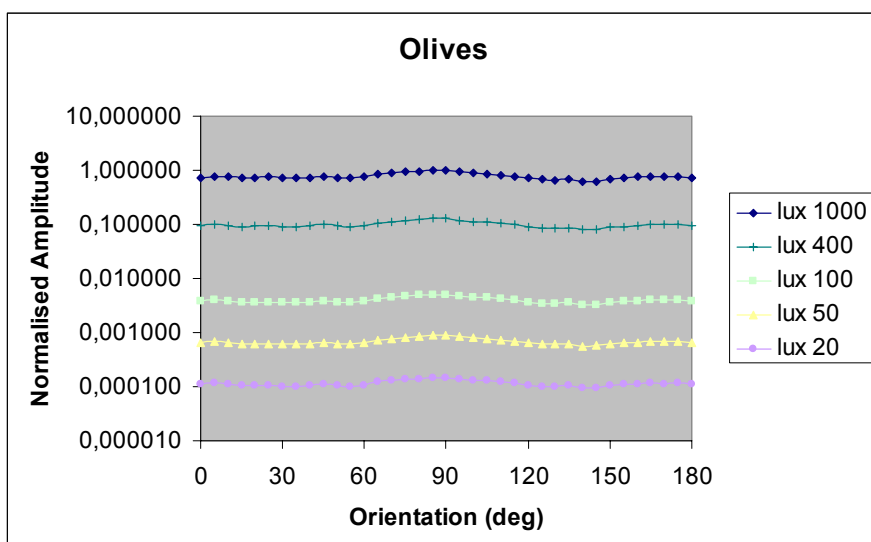


Σχ.3.3: Μεταβολή της κλίσης του φασματικού πλάτους σε σχέση με τον φωτισμό.

Στο γράφημα 3.4 απεικονίζεται ενδεικτικά σε απόλυτη κλίμακα το πλάτος σε σχέση με τον προσανατολισμό για δυο φωτισμούς. Στο γράφημα 3.5 απεικονίζονται οι κανονικοποιημένες τιμές του πλάτους συναρτήσει του προσανατολισμού.

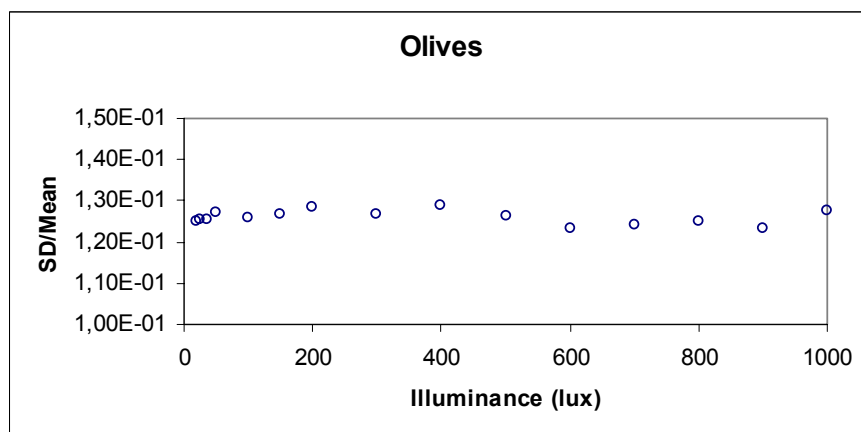


Σχ. 3.4: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν τις εικόνες Olives. Οι ενδιάμεσοι φωτισμοί παραλήφθηκαν χάριν ευκολίας αντίληψης. Ο κάθετος άξονας είναι σε απόλυτη κλίμακα).



**Σχ. 3.5:** Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται είναι κανονικοποιημένα και αφορούν τις εικόνες Olives. Οι ενδιάμεσοι φωτισμοί παραλήφθηκαν χάριν ευκολίας αντίληψης. Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).

Εν αντιθέσει με την κατανομή του πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας, δεν παρατηρείται συγκεκριμένη κατανομή ανά προσανατολισμό. Για αυτή την εικόνα υπάρχει μεγαλύτερη ενέργεια σε σχεδόν κάθετο προσανατολισμό, ενώ άλλες εικόνες παρουσιάζουν «προτίμηση» σε άλλους προσανατολισμούς (βλ. Παράρτημα 5). Σε μειούμενη φωτεινότητα έχουμε μείωση του πλάτους με ταυτόχρονη διατήρηση της μορφής της κατανομής. Το ίδιο παρατηρήθηκε για όλες τις φωτεινότητες και για όλες τις εικόνες (βλ. Παράρτημα 5). Η σταθερότητα της μορφής της κατανομής γίνεται αντιληπτή από το ακόλουθο σχήμα, όπου απεικονίζεται ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους ανά προσανατολισμό, σε σχέση με την μείωση του φωτισμού.

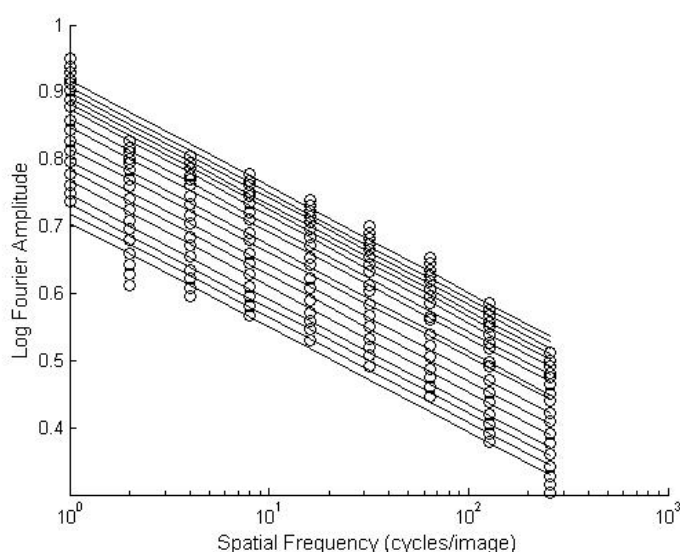


**Σχ.3.6:** Λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους ανά προσανατολισμό σε σχέση με την μείωση του φωτισμού.

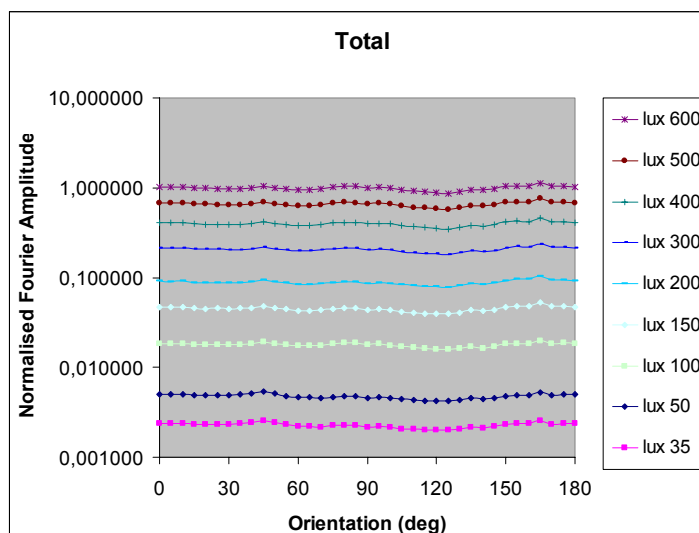
Το ότι ο προαναφερθείς λόγος παραμένει σχεδόν σταθερός, μπορεί να ερμηνευτεί σαν διατήρηση της κατανομής του πλάτους ανά προσανατολισμό όσο μειώνεται ο περιβαλλοντικός φωτισμός.

Συνοψίζοντας από τα παραπάνω σχήματα, μπορούμε να πούμε ότι μια φυσική σκηνή έχει υψηλότερη ενέργεια σε χαμηλές χωρικές συχνότητες ανεξαρτήτως προσανατολισμού, ενώ η ενέργεια μειώνεται γραμμικά όσο αυξάνεται η χωρική συχνότητα για συγκεκριμένη φωτεινότητα. Επίσης, μια φυσική σκηνή παρουσιάζει επιλεκτικότητα κατανομής της ενέργειας της σε τυχαίους προσανατολισμούς, ανάλογα με το περιεχόμενο της. Η μείωση της φωτεινότητας προκαλεί μείωση της τιμής του πλάτους χωρίς να επηρεάζει την κατανομή του, είτε ανά χωρική συχνότητα είτε ανά προσανατολισμό.

Ωστόσο, τα παραπάνω ισχύουν για καθεμιά εικόνα ξεχωριστά. Ένας από τους στόχους της παρούσης εργασίας ήταν να δείξει αν ο τρόπος κατανομής του φασματικού πλάτους ισχύει και για όλες τις εικόνες. Λόγω του ότι οι σκηνές που αθροίστηκαν είχαν διαφορετικές απόλυτες τιμές πλάτους, για την σωστή απεικόνιση του αποτελέσματος χρειάστηκε να γίνει κανονικοποίηση. Η κανονικοποίηση των τιμών ανά χωρική συχνότητα έγινε με τον ίδιο τρόπο όπως και για κάθε εικόνα ξεχωριστά, ενώ οι τιμές ανά προσανατολισμό κανονικοποιήθηκαν ως προς τον προσανατολισμό  $90^\circ$  της μέγιστης, κοινής για όλες τις εικόνες, φωτεινότητας (στην περίπτωση αυτή ο μέγιστος κοινός φωτισμός ήταν 600 lux). Στα ακόλουθα σχήματα απεικονίζεται το φασματικό πλάτος των εικόνων ανά χωρική συχνότητα και ανά προσανατολισμό.



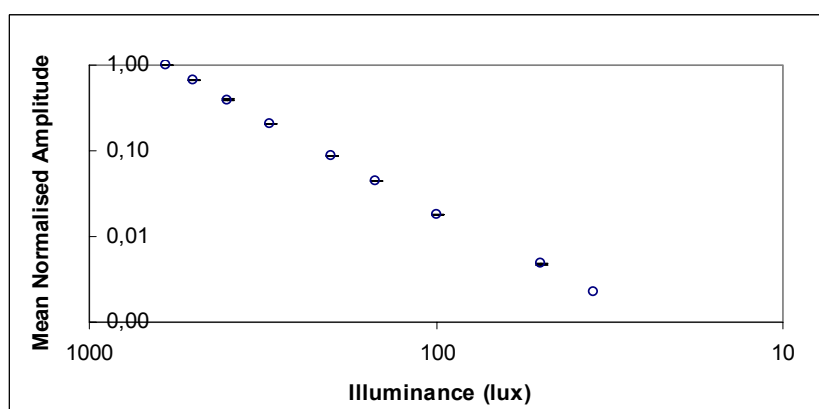
**Σχ.3.7α: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν μέσες τιμές για όλες τις εικόνες. Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).**



**Σχ.3.7β:** Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται είναι κανονικοποιημένα και αφορούν μέσες τιμές για όλες τις εικόνες. Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Δεξιά στο γράφημα απεικονίζονται και οι τιμές του περιβαλλοντικού φωτισμού που ήταν κοινές για όλες οι εικόνες).

Όπως παρατηρούμε από τα σχήματα 3.7α και 3.7β η κατανομή του φασματικού πλάτους ανά χωρική συχνότητα και ανά προσανατολισμό για συνδυασμό διαφορετικών φυσικών σκηνών είναι παρόμοια με αυτή μιας μόνο φυσικής σκηνής. Και πάλι υπάρχει μεγαλύτερη ενέργεια σε χαμηλές συχνότητες και μειώνεται γραμμικά όσο αυτές αυξάνουν. Η κατανομή του πλάτους ανά προσανατολισμό είναι τυχαία, ενώ η μείωση της φωτεινότητας επηρεάζει την τιμή του πλάτους χωρίς να μεταβάλλει την κατανομή του.

Από την μελέτη που κάναμε για να δούμε τη συνάρτηση που περιγράφει τη μείωση του πλάτους λόγω της μείωσης της φωτεινότητας, προέκυψε το γράφημα 3.8.

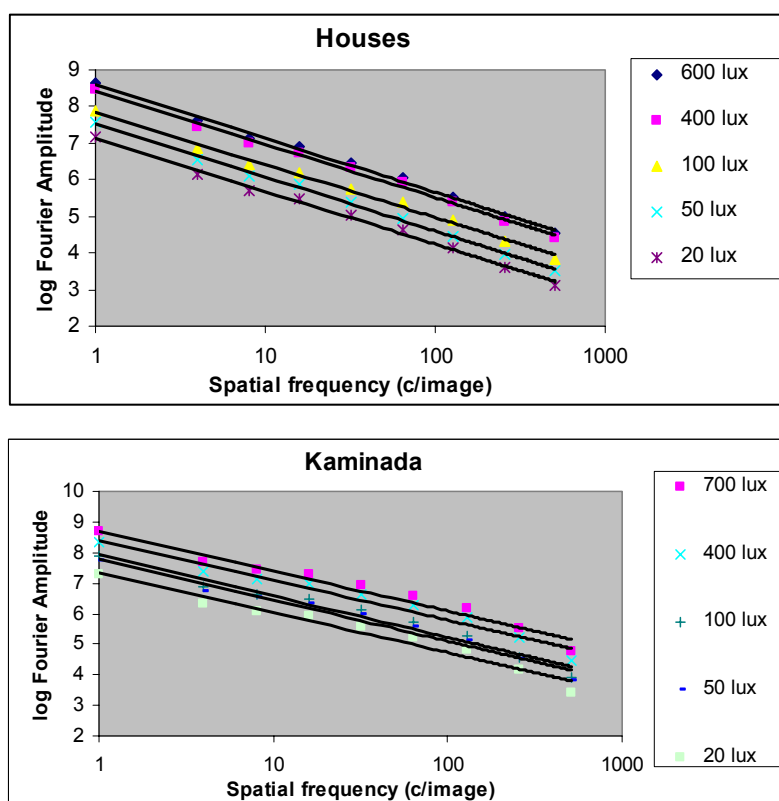


**Σχ.3.8:** Μείωση της τιμής του πλάτους συναρτήσκει της μείωσης του φωτισμού. Οι μέσες τιμές του πλάτους προέκυψαν από τις κανονικοποιημένες τιμές αυτού. Στο σχήμα απεικονίζονται και οι τυπικές αποκλίσεις.



Παρατηρώντας το σχήμα 3.8 βλέπουμε ότι η μείωση του φασματικού πλάτους σε σχέση με τη μείωση του φωτισμού περιγράφεται από μια γραμμική σχέση, όταν αυτή παρασταθεί σε λογαριθμικούς άξονες.

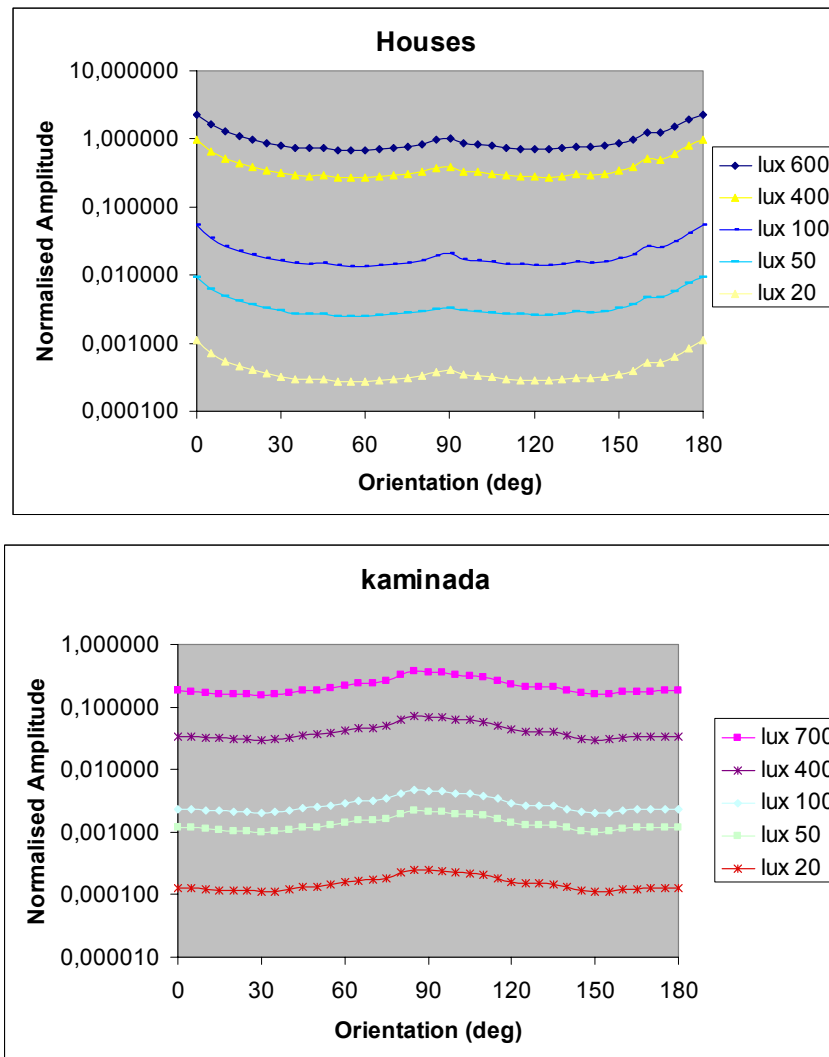
Ωστόσο, πέρα από τις φυσικές σκηνές που αποτελούν το υλικό μελέτης αυτής της εργασίας και για μια πρώτη επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων μας, έγινε λήψη και δυο σετ εικόνων που αποτελούσαν ανθρώπινες κατασκευές (carpentered scenes). Ενδεικτικά, στα ακόλουθα σχήματα απεικονίζεται το φασματικό πλάτος των εικόνων αυτών για να τονιστεί η διαφορά των «ανθρωπίνων» κατασκευών από τις φυσικές σκηνές.



**Σχ.3.9: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν τις εικόνες Houses και Kaminada. Οι ενδιάμεσοι φωτισμοί παραλήφθηκαν χάριν ευκολίας αντίληψης. Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα)**

Παρατηρώντας το σχήμα 3.9 βλέπουμε ότι το φασματικό πλάτος σε μια μη φυσική σκηνή κατανέμεται ανά οκτάβα με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στις φυσικές σκηνές. Και εδώ μειώνεται γραμμικά όσο αυξάνει η χωρική συχνότητα ενώ η μείωση του φωτισμού επιφέρει αλλαγές μόνο στην απόλυτη τιμή του πλάτους. Η κλίση της γραμμικής μείωσης και εδώ είναι σταθερή και ανεξάρτητη από το επίπεδο φωτισμού.

Στο σχήμα 3.10 παρατίθεται η κατανομή του φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό.



**Σχ. 3.10: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν τις εικόνες Houses και Kaminada. Οι ενδιάμεσοι φωτισμοί παραλήφθηκαν χάριν ευκολίας αντίληψης. Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).**

Μια διαφορά που προκύπτει ανάμεσα στις φυσικές και μη σκηνές είναι στο πως κατανέμεται η ενεργεία ανά προσανατολισμό. Κοιτώντας το σχήμα 3.10 παρατηρείται ότι μια μη φυσική σκηνή έχει σημαντικά περισσότερη ενεργεία σε συγκεκριμένους προσανατολισμούς ( $90^0$ ,  $180^0$ ) από ότι στους υπόλοιπους. Αντίθετα, οι φυσικές σκηνές παρουσιάζουν «προτίμηση» σε προσανατολισμούς, ανάλογα με το περιεχόμενό τους.

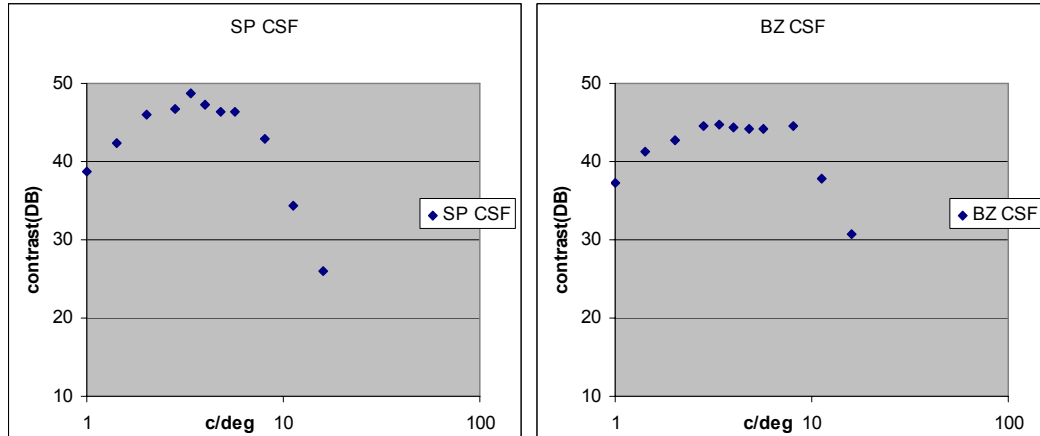
Περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο, όπου θα γίνει και σύγκριση αυτών με αποτελέσματα άλλων ερευνών.

### 3.2 Ψυχοφυσικές μελέτες επιλεκτικότητας προσανατολισμού και χωρικής συχνότητας

Οι ψυχοφυσικές μελέτες που διενεργήθηκαν για την διερεύνηση της επιλεκτικότητας προσανατολισμού και χωρικής συχνότητας περιλάμβαναν πολλά διαφορετικά είδη μετρήσεων. Οι μετρήσεις αυτές, όπως π.χ. μετρήσεις ευαισθησίας φωτεινής αντίθεσης και χρόνοι αντίδρασης σε μειούμενο contrast, ήταν απαραίτητες για να καθορισθούν οι παράμετροι των ερεθισμάτων και να μπορούν να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα.

#### 3.2.1 Ψυχοφυσικές μελέτες επιλεκτικότητας προσανατολισμού

Μια από τις κυριότερες παραμέτρους που έπρεπε να καθορισθεί ήταν η χωρική συχνότητα του test grating στην οποία θα γίνονταν οι μετρήσεις αλλά και η τιμή του contrast. Για αυτό το λόγο πρώτα υπολογίστηκε η καμπύλη φωτεινής ευαισθησίας CSF των δυο εξεταζόμενων στους προσανατολισμούς του test. Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζονται οι CSF των δυο εξεταζόμενων. Οι τιμές αποτελούν μέσους όρους τριών μετρήσεων. Η μέθοδος εύρεσης της ουδούς που χρησιμοποιήθηκε ήταν η μέθοδος της «ρύθμισης» (method of adjustment).

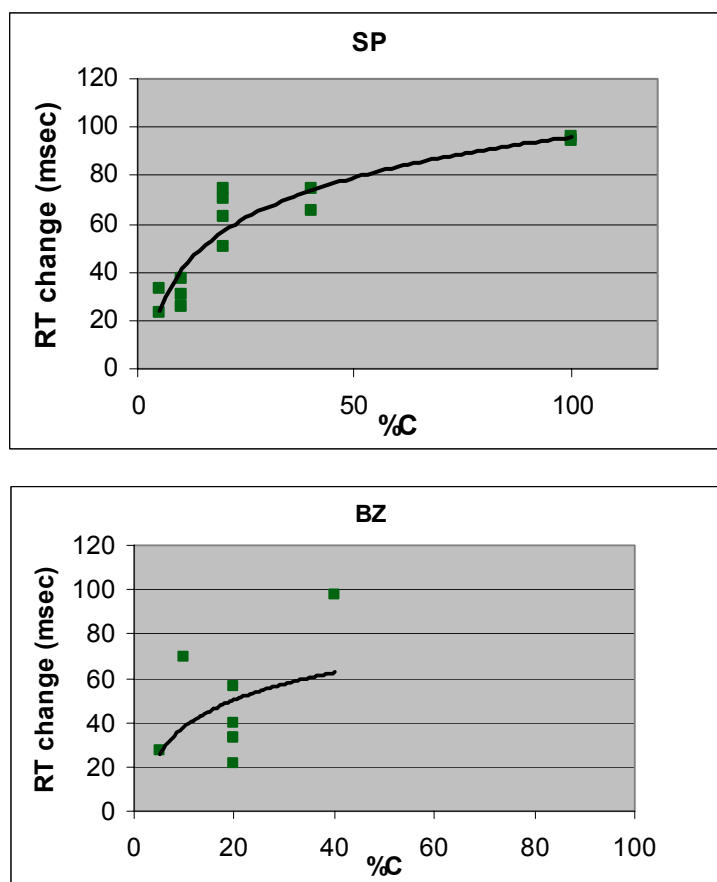


Σχ.3.11: Οι καμπύλες ευαισθησίας των δυο εξεταζόμενων για 90° προσανατολισμό του grating. Τα αποτελέσματα προέκυψαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ρύθμισης για την εύρεση της ουδούς. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα)

Και οι δυο εξεταζόμενοι έδειξαν την μέγιστη ευαισθησία τους στους 4 c/deg, χωρική συχνότητα που επιλέχθηκε τελικά ως συχνότητα του test grating. Το contrast του test επιλέχθηκε να είναι 4 φορές μεγαλύτερο (suprathreshold) από το contrast που αντιστοιχούσε στους 4 c/deg του καθενός. Για τον μεν εξεταζόμενο SP η τιμή

αυτή του contrast ήταν 1.786%, ενώ για τον BZ 2.767% όταν ο προσανατολισμός του test grating ήταν 90°.

Αφού επιλέχθηκε το contrast και η χωρική συχνότητα για το test grating, έπρεπε να καθοριστούν τα ίδια μεγέθη και για το adapting grating. Η υπόθεση ήταν ότι στην περίπτωση που το adapting grating έχει την ίδια χωρική συχνότητα με το test (4 c/deg) θα προκληθεί η μέγιστη νευρωνική προσαρμογή. Χρησιμοποιώντας ένα adapting grating 4 c/deg υπολογίστηκε η αύξηση στους χρόνους αντίδρασης έπειτα από προσαρμογή για adapting contrast που μεταβαλλόταν από 5 ως 100 %. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων για τους δυο εξεταζόμενους απεικονίζονται στα γραφήματα 3.12.

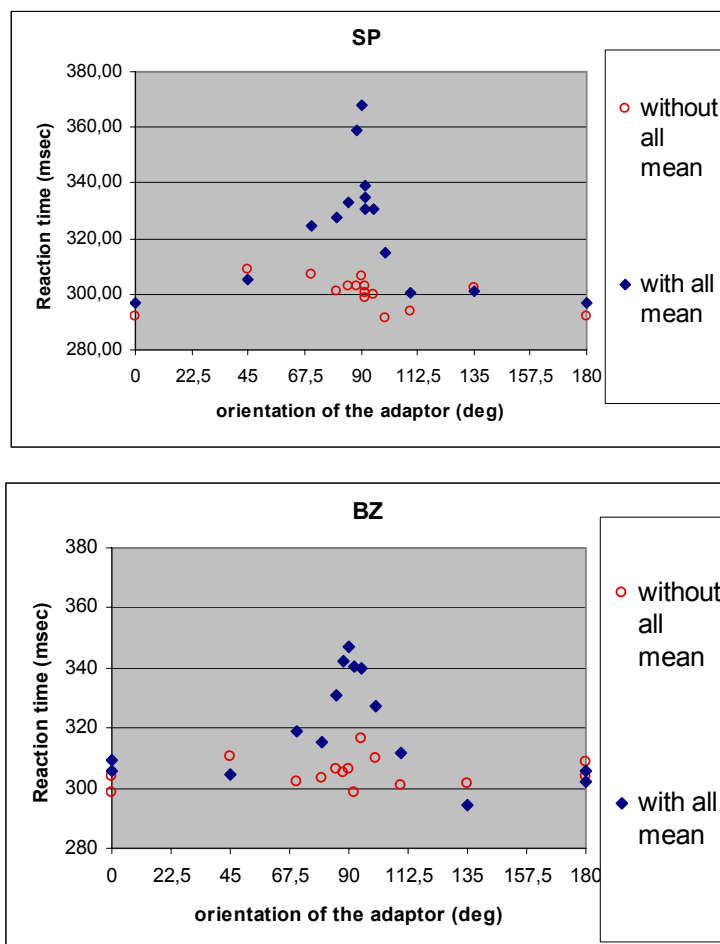


**Σχ.3.12: Αλλαγή στους χρόνους αντίδρασης καθώς αυξάνεται το contrast του adaptor. Κάθε μέτρηση αποτελεί μέσο όρο τουλάχιστον 28 χρόνων αντίδρασης.**

Κατά τις μετρήσεις παρατηρήθηκε ότι όταν το contrast του adaptor ήταν μεγαλύτερο από 20% και οι δυο εξεταζόμενοι εμφάνιζαν δυσκολία στην αντίληψη του test. Αυτό οφείλεται στο ότι το contrast ήταν τόσο υψηλό, που λόγω του after-effect οι εξεταζόμενοι δυσκολεύονταν να αντιληφθούν το test grating. Ο όρος after-effect χρησιμοποιείται για να περιγράψει την συνεχή αντίληψη ενός ερεθίσματος, συνήθως υψηλού contrast και/ή φωτεινότητας, ακόμα και μετά την έκθεση του. Έτσι στις

μετρήσεις επιλεκτικότητας προσανατολισμού επιλέχθηκε για μεγαλύτερη ακρίβεια και χαμηλότερο θόρυβο η τιμή 20% για το contrast του adaptor.

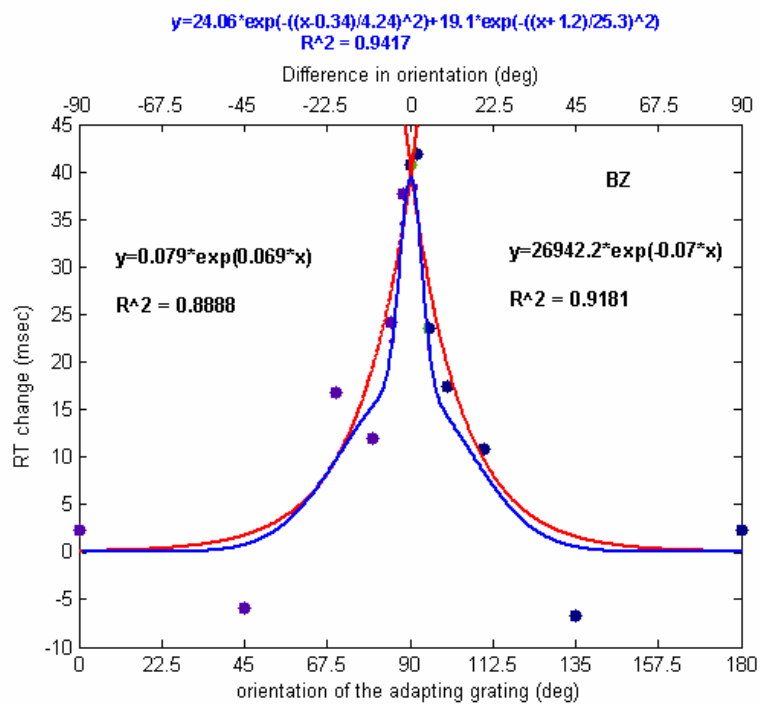
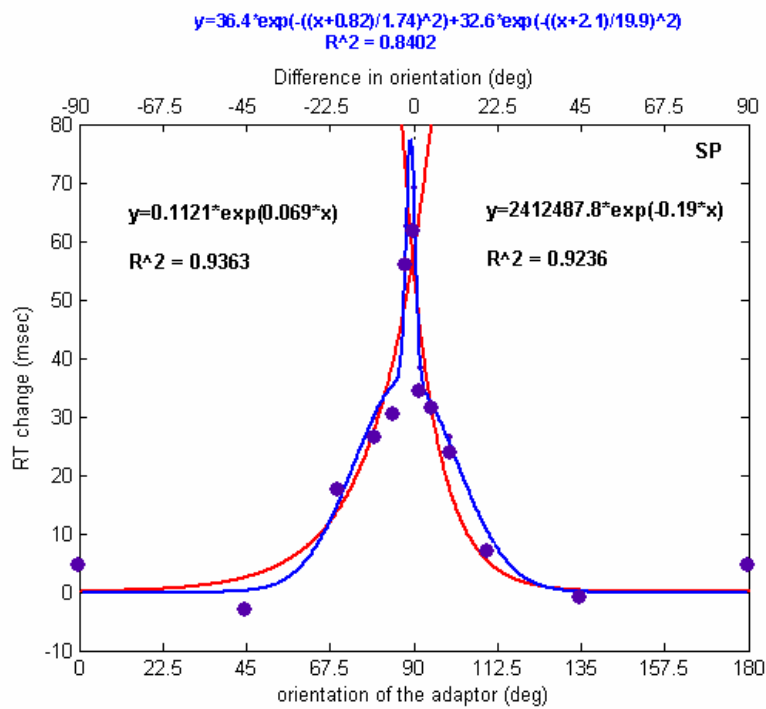
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τους δυο εξεταζόμενους, όταν ο προσανατολισμός του test ήταν  $90^{\circ}$ , παρατίθενται σε απόλυτη τιμή στα γραφήματα 3.13.



**Σχ.3.13:** Χρόνοι αντίδρασης των εξεταζόμενων. Με κόκκινο απεικονίζονται οι χρόνοι αντίδρασης χωρίς προσαρμογή ενώ με μπλε οι χρόνοι έπειτα από προσαρμογή στο adaptor. Σε ορισμένους προσανατολισμούς απεικονίζονται περισσότερες της μιας μετρήσεις. Κάθε μέτρηση αποτελεί μέσο όρο τουλάχιστον 28 χρόνων αντίδρασης.

Παρατηρώντας τα σχήματα βλέπουμε ότι για τον μεν εξεταζόμενο SP, η τυπική απόκλιση των τιμών χωρίς προσαρμογή είναι μικρή (περίπου 10 msec), εν αντιθέσει με τον εξεταζόμενο BZ που εμφάνισε σχεδόν διπλάσια τυπική απόκλιση.

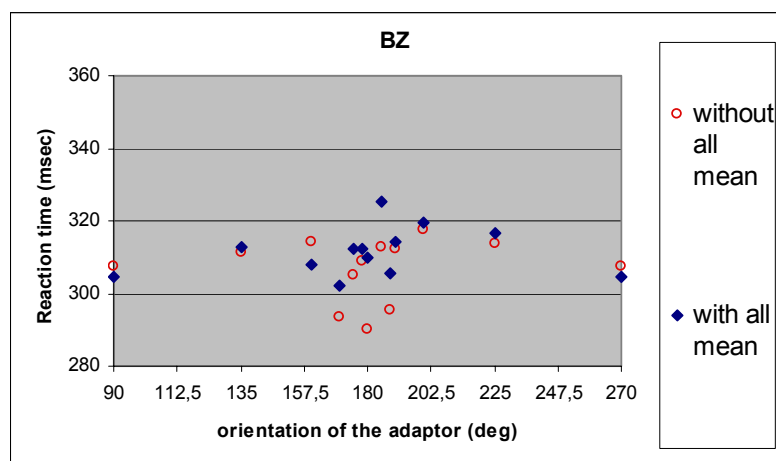
Οι διαφορές στους χρόνους αντίδρασης λόγω της προσαρμογής (With-Without) απεικονίζονται στα γραφήματα 3.14.



**Σχ.3.14:** Αλλαγή στους χρόνους αντίδρασης καθώς μεταβάλλεται ο προσανατολισμός του adaptor. Οι tuning curves που απεικονίζονται προέκυψαν από exponential (κόκκινο) και gaussian (μπλε) best-fitting που έγινε με χρήση του Matlab. Με μαύρο απεικονίζονται οι εξισώσεις των exponential και με μπλε η εξίσωση της gaussian function. Ο πάνω οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο Gaussian μοντέλο και ο κάτω στο Exponential.

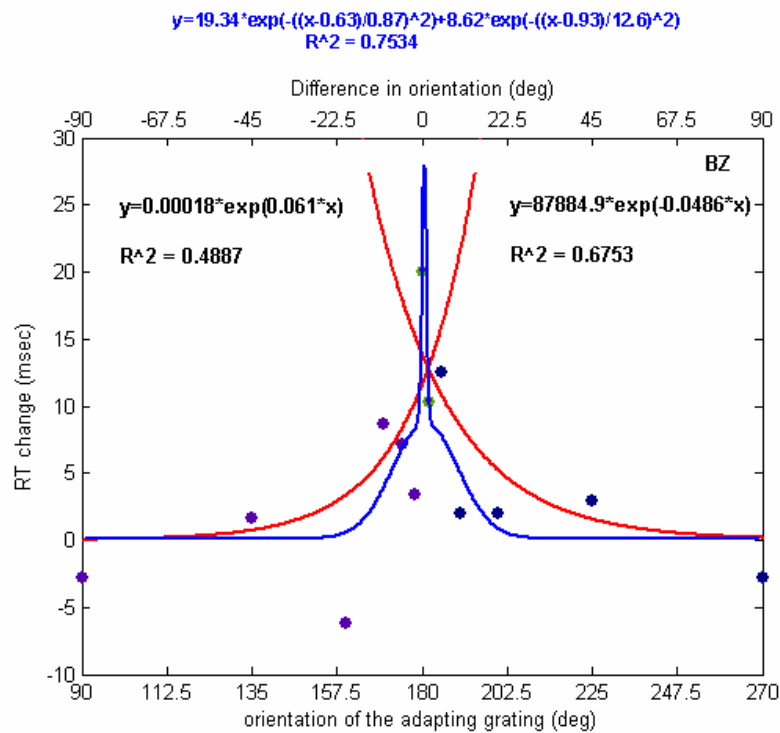
Μελετώντας τα γραφήματα προκύπτει ότι καθώς αυξάνει η διαφορά ανάμεσα στον προσανατολισμό του adapting και του test grating τόσο μικρότερη είναι η αλλαγή στους χρόνους αντίδρασης. Μάλιστα η μείωση της αλλαγής των χρόνων αντίδρασης γίνεται εκθετικά (βλ. tuning curves στο σχήμα 3.14). Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση αποτελεί και η συμμετρία των αποτελεσμάτων και για τους δυο εξεταζόμενους. Από τις καμπύλες δόθηκε η δυνατότητα να επιβεβαιωθεί η θεωρία των νευρωνικών καναλιών. Το εύρος (Full Width Half Maximum, FWHM) του καναλιού των  $90^{\circ}$  για τον εξεταζόμενο SP βρέθηκε ίσο με  $12,8^{\circ}$  ενώ για τον BZ ίσο με  $19,6^{\circ}$ .

Στον εξεταζόμενο BZ έγιναν μετρήσεις επιλεκτικότητας προσανατολισμού και όταν ο προσανατολισμός του test grating είναι  $180^{\circ}$ . Από την CSF του εξεταζόμενου στον προσανατολισμό αυτό, το contrast για το test ( $4 \times \text{threshold}_{4 \text{ c/deg}}$ ) προέκυψε ίσο με 8,3572%. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στα ακόλουθα γραφήματα.



**Σχ.3.15α:** Χρόνοι αντίδρασης για προσανατολισμό του test  $180^{\circ}$ . Με κόκκινο απεικονίζονται οι χρόνοι αντίδρασης χωρίς προσαρμογή ενώ με μπλε οι χρόνοι έπειτα από προσαρμογή στο adaptor. Σε ορισμένους προσανατολισμούς απεικονίζονται περισσότερες της μιας μετρήσεις. Κάθε μέτρηση αποτελεί μέσο όρο τουλάχιστον 28 χρόνων αντίδρασης.

Από το γράφημα παρατηρείται ότι η τυπική απόκλιση των χρόνων αντίδρασης χωρίς προσαρμογή (Without) είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή που εμφάνισε ο εξεταζόμενος για προσανατολισμό του test grating ίσο με  $90^{\circ}$ .



**Σχ.3.15β: Αλλαγή στους χρόνους αντίδρασης καθώς μεταβάλλεται ο προσανατολισμός του adaptor. Οι tuning curves που απεικονίζονται προέκυψαν από exponential (κόκκινο) και gaussian (μπλε) best-fitting που έγινε με χρήση του Matlab. Με μαύρο απεικονίζονται οι εξισώσεις των exponential και με μπλε η εξίσωση της gaussian function. Ο πάνω οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο Gaussian μοντέλο και ο κάτω στο Exponential.**

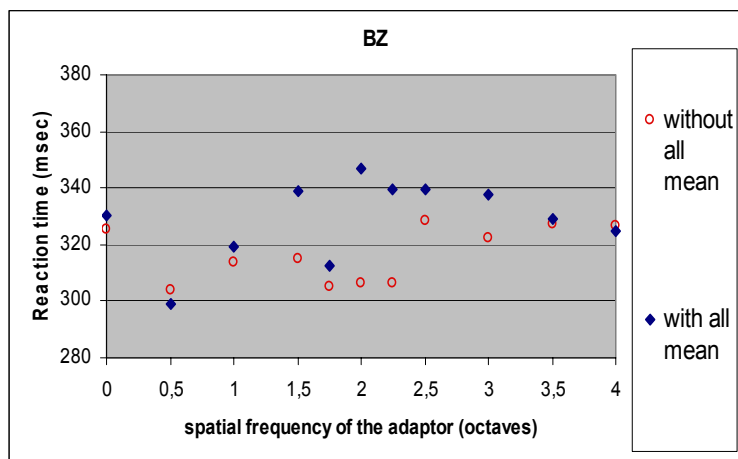
Από αυτό το γράφημα βλέπουμε ότι η αλλαγή στους χρόνους αντίδρασης μεταβάλλεται, όσο μεγαλώνει η διαφορά ανάμεσα στους προσανατολισμούς του test και του adaptor, με τον ίδιο τρόπο όπως και όταν το test ήταν προσανατολισμένο στις 90°. Η αλλαγή μειώνεται εκθετικά όσο απομακρύνεται το adapting από το test grating ενώ το εύρος του καναλιού βρέθηκε ίσο με 25,2°.

### 3.2.2 Ψυχοφυσικές μελέτες επιλεκτικότητας χωρικής συχνότητας

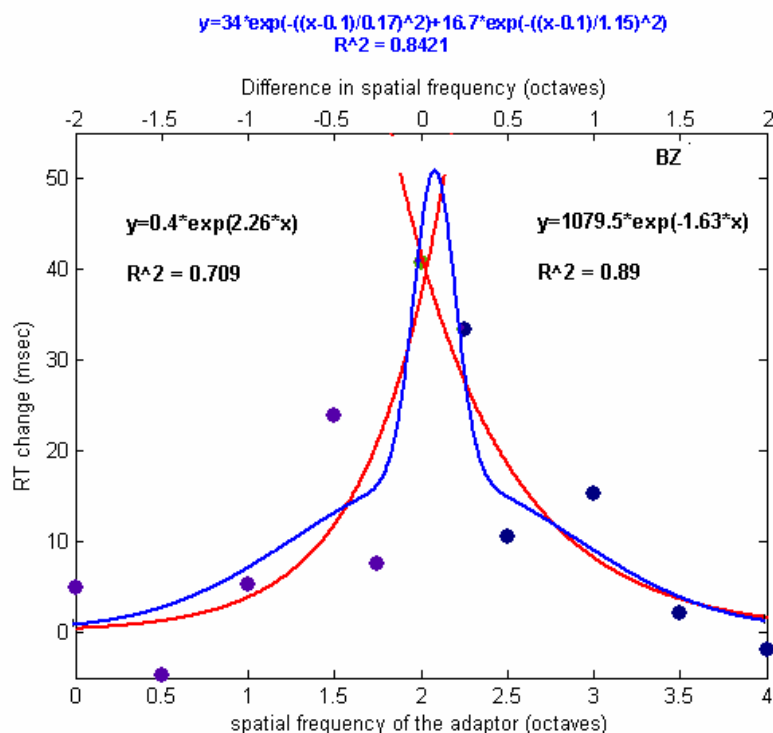
Και στις μελέτες αυτές η χωρική συχνότητα του test επιλέχθηκε να είναι ίση με 4 c/deg. Ο προσανατολισμός και των δυο gratings ήταν 90°.

Στον εξεταζόμενο BZ χρησιμοποιήθηκε αρχικά σταθερό adapting contrast σε όλες τις χωρικές συχνότητες, ίσο με 20%. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στα σχήματα 3.16α και 3.16β.





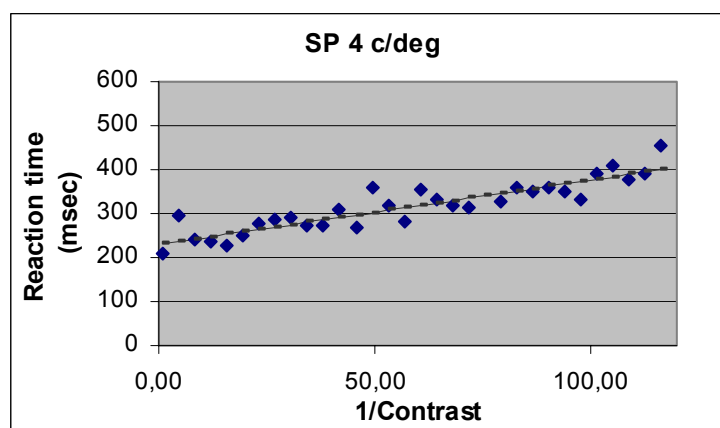
Σχ.3.16α: Χρόνοι αντίδρασης για σταθερό contrast 20%. Με κόκκινο απεικονίζονται οι χρόνοι αντίδρασης χωρίς προσαρμογή ενώ με μπλε οι χρόνοι έπειτα από προσαρμογή στο adaptor. Σε ορισμένες χωρικές συχνότητες απεικονίζονται περισσότερες της μιας μετρήσεις. Κάθε μέτρηση αποτελεί μέσο όρο τουλάχιστον 28 χρόνων αντίδρασης.



Σχ.3.16β: Αλλαγή στους χρόνους αντίδρασης καθώς μεταβάλλεται η χωρική συχνότητα του adaptor. Το adapting contrast σε όλες τις περιπτώσεις ήταν ίσο με 20%. Οι tuning curves που απεικονίζονται προέκυψαν από exponential (κόκκινο) και gaussian (μπλε) best-fitting που έγινε με χρήση του Matlab. Με μαύρο απεικονίζονται οι εξισώσεις των exponential και με μπλε η εξίσωση της gaussian function. Ο πάνω οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο Gaussian μοντέλο και ο κάτω στο Exponential.

Από τις γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι η αλλαγή στους χρόνους αντίδρασης μειώνεται εκθετικά όσο μεγαλώνει η διαφορά της χωρικής συχνότητας ανάμεσα στο test και το adapting grating. Από τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται η θεωρία των νευρωνικών καναλιών για την επιλεκτικότητα χωρικής συχνότητας. Το FWHM του καναλιού βρέθηκε ίσο με 0.7 της οκτάβας.

Ωστόσο, από μια τυπική καμπύλη CSF ενός εξεταζόμενου (βλ. Σχ.3.11) προκύπτει ότι όταν μεταβάλλεται η χωρική συχνότητα μεταβάλλεται και η ουδός του contrast. Έτσι, ενώ στη μελέτη της επιλεκτικότητας προσανατολισμού επιλέχθηκε μια σταθερή τιμή contrast για το adaptor, δεν μπορεί να γίνει το ίδιο για τις διάφορες χωρικές συχνότητες. Χρειάζεται λοιπόν να ακολουθηθεί μια διαφορετική προσέγγιση για την εύρεση του contrast που αντιστοιχεί σε κάθε χωρική συχνότητα, ώστε να προκαλείται «ισοδύναμη» προσαρμογή. Για την εύρεση του contrast του adaptor σε κάθε χωρική συχνότητα μετρήθηκαν χρόνοι αντίδρασης σε βαθμιαία μειούμενο contrast (32 μετρήσεις) από 100% έως το  $2 \times C_{\min}$  για κάθε μια χωρική συχνότητα ξεχωριστά. Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται ενδεικτικά μια τέτοια μέτρηση για τον εξεταζόμενο SP στους 4 c/deg.



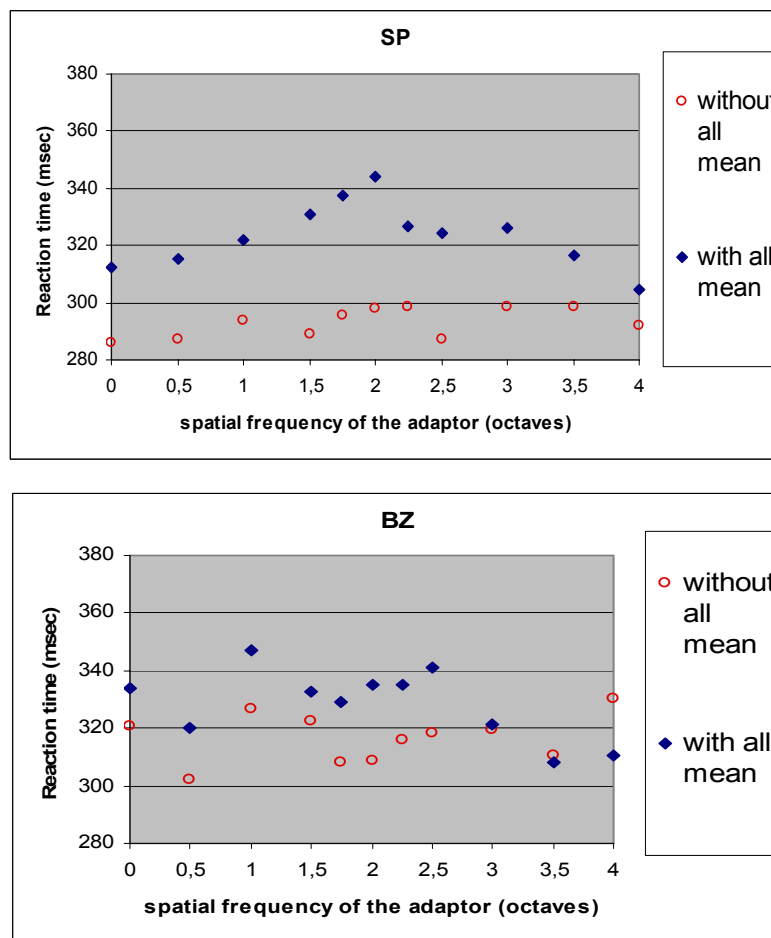
**Σχ.3.17: Χρόνοι αντίδρασης σε βαθμιαία μειούμενο contrast από 100% έως το  $2 \times$  threshold της συγκεκριμένης χωρικής συχνότητας.**

Από παρόμοιες μετρήσεις και για τους δυο εξεταζόμενους και σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.2.5, προέκυψαν οι τιμές contrast για το adaptor σε κάθε χωρική συχνότητα που ισοδυναμούν με contrast ίσο με 20% στους 4 c/deg. Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται οι τιμές του ισοδύναμου contrast ανά χωρική συχνότητα.

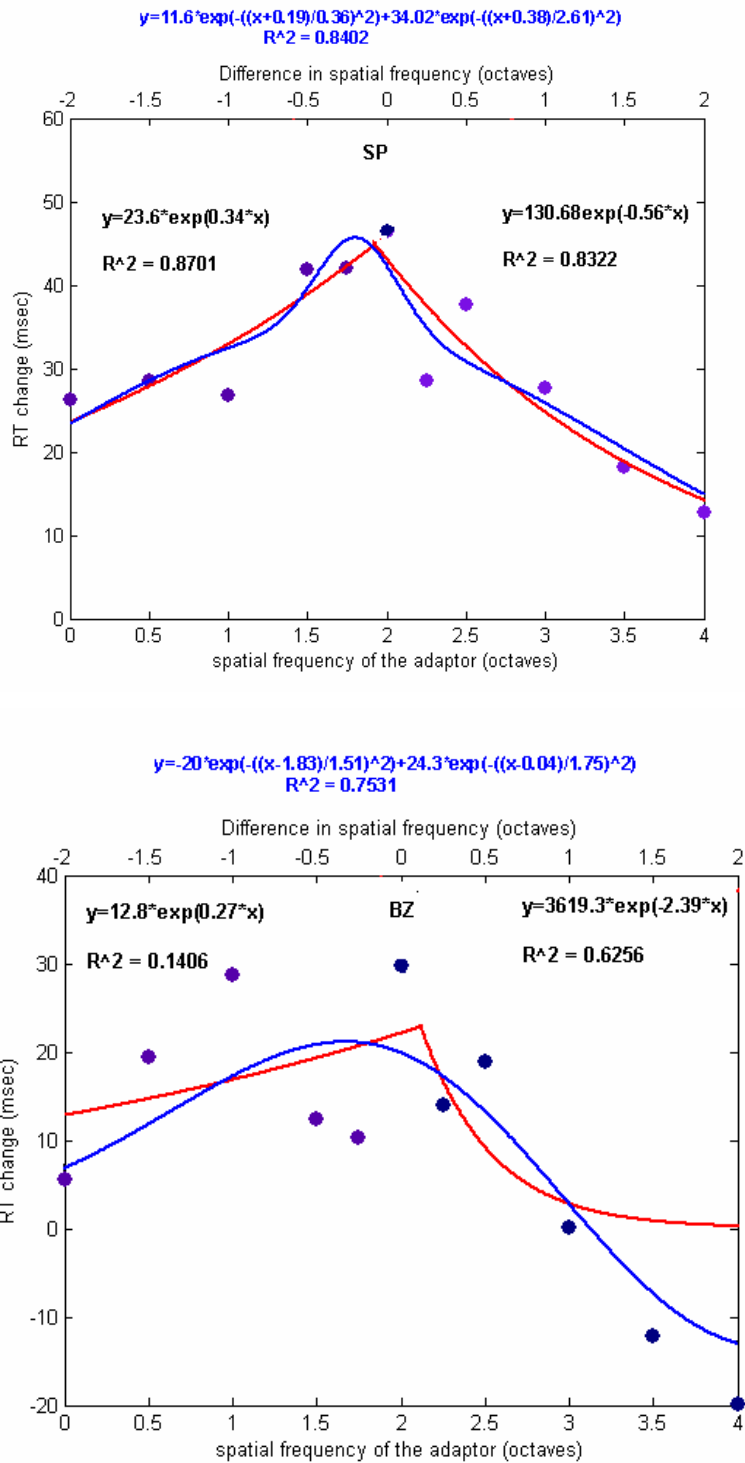
Πιν.3.1: Τιμές contrast ανά χωρική συχνότητα. Η κάθε τιμή ισοδυναμεί με contrast 20% στους 4 c/deg.

		Χωρική συχνότητα (οκτάβες)										
		0	0,5	1	1,5	1,75	2	2,25	2,5	3	3,5	4
SP	Ισοδύναμο Contrast (%)	54,2	35,6	23,3	21,6	17,2	20,0	22,4	22,4	32,9	89,3	100
BZ	Ισοδύναμο Contrast (%)	45,6	28,7	24,0	19,5	19,1	20,0	20,5	20,3	19,8	43,0	95,7

Θέτοντας έτσι το contrast του adaptor σύμφωνα με τις παραπάνω τιμές προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα, όσον αφορά την επιλεκτικότητα χωρικής συχνότητας που εμφάνιζαν οι δυο εξεταζόμενοι.



Σχ.3.18: Χρόνοι αντίδρασης των εξεταζόμενων. Με κόκκινο απεικονίζονται οι χρόνοι αντίδρασης χωρίς προσαρμογή ενώ με μπλε οι χρόνοι έπειτα από προσαρμογή στο adaptor. Σε ορισμένες χωρικές συχνότητες απεικονίζονται περισσότερες της μιας μετρήσεις. Κάθε μέτρηση αποτελεί μέσο όρο τουλάχιστον 28 χρόνων αντίδρασης.



**Σχ.3.19:** Αλλαγή στους χρόνους αντίδρασης καθώς μεταβάλλεται η χωρική συχνότητα του adaptor. Οι tuning curves που απεικονίζονται προέκυψαν από exponential (κόκκινο) και gaussian (μπλε) best-fitting που έγινε με χρήση του Matlab. Με μαύρο απεικονίζονται οι εξισώσεις των exponential και με μπλε η εξίσωση της gaussian function. Ο πάνω οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο Gaussian μοντέλο και ο κάτω στο Exponential.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο εξεταζόμενος BZ εμφάνισε και πάλι μεγαλύτερη διασπορά στους χρόνους αντίδρασης χωρίς προσαρμογή (Without) σε σχέση με τον εξεταζόμενο SP. Η αλλαγή στους χρόνους αντίδρασης μειώνεται και εδώ εκθετικά, όσο μεγαλώνει η διαφορά της χωρικής συχνότητας ανάμεσα στο test και το adapting grating. Η μεταβολή που παρατηρείται επιβεβαιώνει κατά ένα μέρος τη θεωρία των νευρωνικών καναλιών για την επιλεκτικότητα χωρικής συχνότητας.

Για το χωρικό κανάλι των 4 c/deg που εξετάστηκε, το FWHM του εξεταζόμενου SP βρέθηκε ίσο με 1.57 οκτάβες, ενώ για τον BZ ίσο με 1.15 οκτάβες.

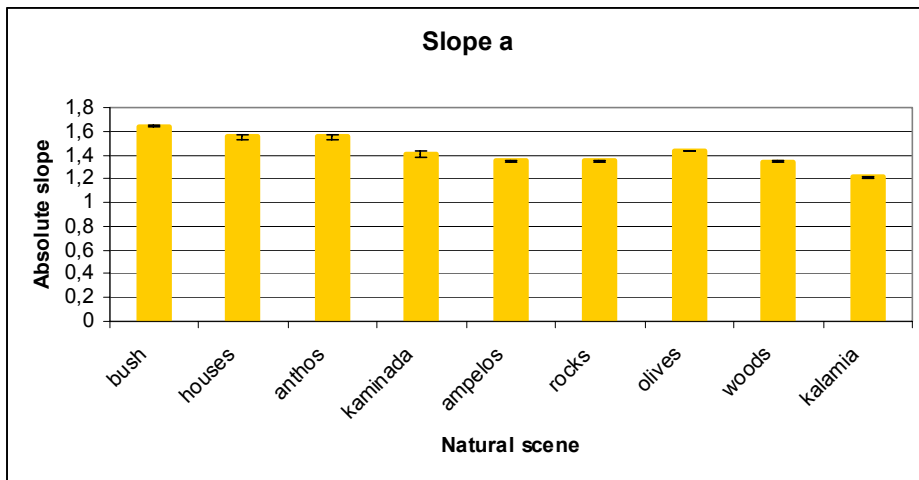
Ωστόσο, και για τους δυο εξεταζόμενους προκύπτει μια ασυμμετρία στη μορφή των tuning curves. Η καμπύλη των χαμηλών χωρικών συχνοτήτων δείχνει μεταβολή πιο αργή σε σχέση με τη μεταβολή που παρατηρείται στις υψηλές χωρικές συχνότητες. Περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξήγηση της ασυμμετρίας αυτής θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### 4.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ

Το πρώτο μέρος της εργασίας περιλάμβανε λήψη και επεξεργασία φυσικών σκηνών με σκοπό τη μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών τους, που αφορούν την οπτική τους επεξεργασία και την αξιολόγηση της μεταβολής τους σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

Κατά την μελέτη της κατανομής του φασματικού πλάτους ανά χωρική συχνότητα, παρατηρήθηκε ότι οι χαμηλές συχνότητες μιας σκηνής έχουν περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τις υψηλές. Η μείωση του πλάτους, όσο αυξάνει η χωρική συχνότητα, όταν παρασταθεί σε λογαριθμικούς άξονες είναι γραμμική. Έτσι επιβεβαιώθηκε ο νόμος **Amplitude(f)  $\propto f^{-a}$**  που ισχύει για τις φυσικές σκηνές. Οι τιμές της κλίσης  $a$  που προέκυψαν για την κάθε εικόνα (βλ.Σχ.4.1) βρίσκονται εντός των ορίων που έχουν διαμορφωθεί από αποτελέσματα άλλων ερευνών (για βιβλιογραφία βλ. Πιν.1.2).

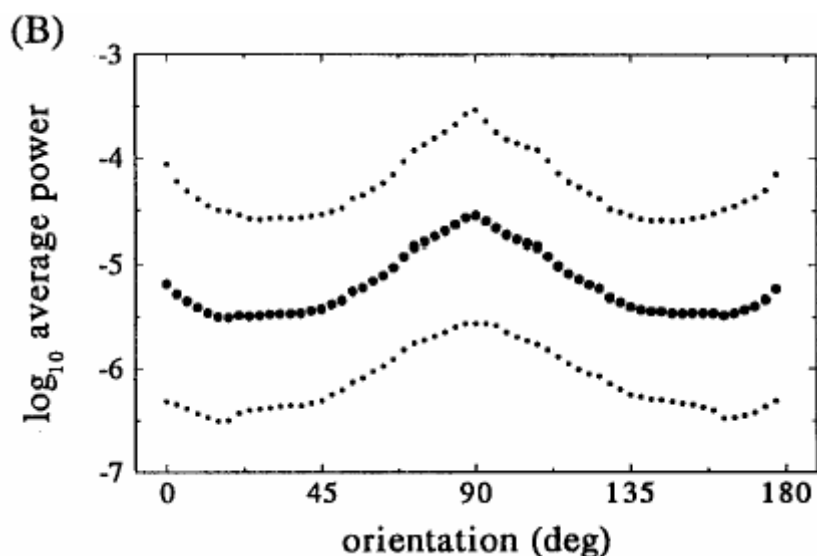


Σχ.4.1: Τιμές κλίσης για κάθε εικόνα ξεχωριστά. ( Οι τιμές που απεικονίζονται είναι οι μέσες τιμές από όλους τους φωτισμούς. Στο γράφημα απεικονίζεται και η τυπική απόκλιση για όλες τις φωτεινότητες).

Κατά την μείωση του φωτισμού παρατηρήθηκε ότι η κλίση της ευθείας που περιγράφει την κατανομή του πλάτους ανά χωρική συχνότητα παραμένει ίδια (βλ. τυπικές αποκλίσεις στο σχήμα 4.1). Το μόνο μέγεθος που μεταβάλλεται από την ελάττωση του φωτισμού είναι η τιμή του φασματικού πλάτους, δηλαδή ένα μέρος της οπτικής πληροφορίας. Μάλιστα, από τα αποτελέσματα μας δείχτηκε ότι η μείωση

αυτή περιγράφεται πολύ ικανοποιητικά από μια γραμμική σχέση όταν παρίσταται σε λογαριθμικούς άξονες (βλ. Σχ. 3.8).

Έχει βρεθεί ότι το φασματικό πλάτος των φυσικών εικόνων έχει διαφορετική κατανομή και ανά προσανατολισμό. Οι Van Schhaf et al. το 1996 έδειξαν ότι στις φυσικές εικόνες υπάρχει περισσότερη ενέργεια σε κάθετους και οριζόντιους προσανατολισμούς από ότι σε πλάγιους (Σχ.4.2). Η διαδικασία που ακολούθησαν ήταν να υπολογίσουν τις μέσες τιμές του πλάτους από διάφορες εικόνες για όλες τις χωρικές συχνότητες σε διαφορετικούς προσανατολισμούς.



Σχ.4.2: Κατανομή του πλάτους ανά προσανατολισμό, αθροισόμενο για όλες τις χωρικές συχνότητες. Η μεσαία καμπύλη είναι η μέση τιμή και οι άλλες αποτελούν το όριο δυο τυπικών αποκλίσεων γύρω από αυτές (Van Schhaf et al. 1996)

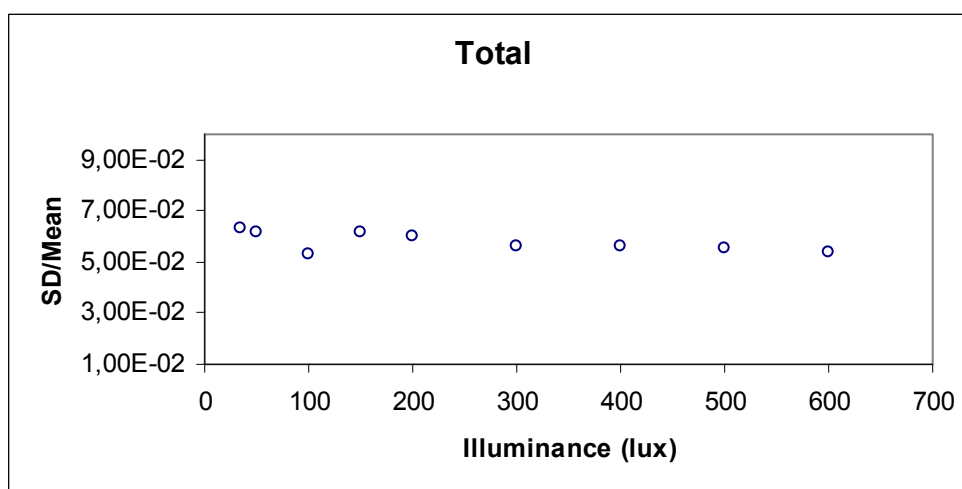
Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης ωστόσο (βλ.Σχ.3.7.β) δεν έδειξαν παρόμοια κατανομή για όλες τις εικόνες. Από την μελέτη μας προέκυψε ότι οι «φυσικές» σκηνές εμφανίζουν «προτίμηση» σε προσανατολισμούς που εξαρτώνται από το περιεχόμενό τους. Περισσότερη ενέργεια σε οριζόντιους και κάθετους προσανατολισμούς έδειξαν μόνο οι εικόνες που απεικόνιζαν ανθρώπινες κατασκευές (βλ. Παράρτημα 5, εικόνες Houses και Kamínada). Στις εικόνες που απεικόνιζαν φυσικά τοπία το πλάτος είχε μεγαλύτερη τιμή σε τυχαίους προσανατολισμούς, ανάλογα με το περιεχόμενο της κάθε εικόνας.

Η διαφορά αυτή που εμφανίζεται μεταξύ της έρευνας των Van Schhaf et al. και της δικής μας μελέτης μπορεί να οφείλεται στο διαφορετικό τρόπο επεξεργασίας των εικόνων. Οι Van Schhaf et al. χρησιμοποίησαν Kaiser – Bessel window με παράμετρο ίση με 2 ενώ εμείς χρησιμοποιήσαμε Hamming window (για ανασκόπηση βλ. Harris, 1978). Επίσης χρησιμοποίησαν και διαφορετική προσέγγιση για την αφαίρεση του dc component των εικόνων, ενώ μελέτησαν την ισχύ και όχι το πλάτος

των εικόνων. Τέλος, η διαφορά μπορεί να οφείλεται και στο ότι χρησιμοποίησαν πολύ μεγαλύτερο αριθμό εικόνων σε σχέση με εμάς.

Ωστόσο, για πιο έγκυρη σύγκριση μεταξύ των δυο μελετών θα ήταν καλό οι εικόνες να επεξεργασθούν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που ακολουθήθηκε από τους Van Schhaf et al.

Η κατανομή του πλάτους ανά προσανατολισμό σε μειούμενο φωτισμό έδειξε παρόμοια συμπεριφορά με αυτή ανά χωρική συχνότητα. Η μείωση του φωτισμού μειώνει αντίστοιχα την τιμή του πλάτους (βλ. Σχ.3.8), χωρίς να μεταβάλλει τον τρόπο κατανομής (βλ. Σχ.4.3).



**Σχ.4.3:** Λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους ανά προσανατολισμό σε σχέση με την μείωση του φωτισμού. Οι τιμές προέρχονται από όλες τις εικόνες.

Παρατηρώντας το σχήμα βλέπουμε ότι οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών του πλάτους παραμένουν σχεδόν σταθερές, ανεξάρτητα από το επίπεδο φωτισμού. Αυτό ερμηνεύεται σαν σταθερότητα της μορφής της κατανομής σε σχέση με τη μείωση του φωτισμού.

Παρόλα αυτά, τα παραπάνω αφορούν το φασματικό πλάτος των εικόνων, μιας και μέχρι πρότινος, θεωρούνταν ότι στην αναγνώριση μιας φυσικής εικόνας παίζει ρόλο μόνο το πλάτος και όχι η φάση. Νεότερες έρευνες (*Oppenheim and Lim 1981, Piotrowski and Campbell 1982, Shapley et al. 1990, Bex et al. 2002, Thomson et al. 1999, Tadmor et al. 1993, Felsen et al. 2005, May et al. 1990, Balboa et al. 2003, Morgan et al. 1991*) με χρήση υβριδικών εικόνων (εικόνες που συνδυάζουν πλάτος από μια εικόνα και φάση από άλλη) απέδειξαν ότι και η φάση παίζει σημαντικό ρόλο στην αναγνώριση μιας φυσικής εικόνας.

Οι Felsen et al. απέδειξαν το 2005 ότι η ικανότητα καλύτερης ανίχνευσης που παρατηρείται στους σύνθετους νευρώνες (complex cells) του οπτικού φλοιού, όταν τα

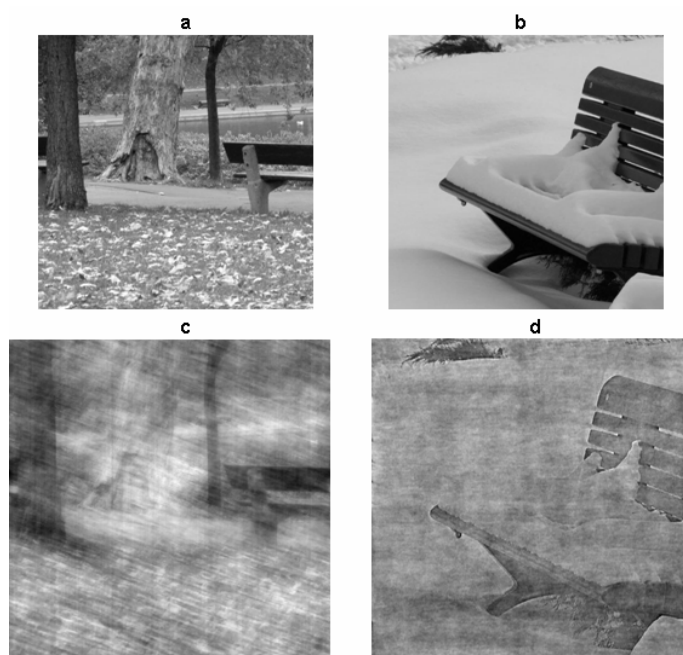


ερεθίσματα είναι φυσικές εικόνες, οφείλεται περισσότερο στη φάση των εικόνων και όχι στο πλάτος τους. Στην ίδια έρευνα έδειξαν ότι η ικανότητα ανίχνευσης των νευρώνων στον αμφιβληστροειδή και στον LGN εξαρτάται από το πλάτος των εικόνων, ενώ των νευρώνων στον V1 και από τη φάση. Και οι May et al. το 1990, καταγράφοντας RTs με χρήση φυσικών εικόνων και εικόνων στις οποίες είχαν μεταβάλλει τη φάση αλλά είχαν διατηρήσει το πλάτος, έδειξαν ότι οι οπτικοί χρόνοι αυξάνονταν στις εικόνες με αλλαγμένη φάση. Η αύξηση των χρόνων μάλιστα εξαρτώταν από το πλήθος των υψηλών συχνοτήτων που περιείχε η εικόνα.

Στο παρακάτω παράδειγμα γίνεται εμφανής η σημασία της φάσης στην αναγνώριση μιας εικόνας.

Παράδειγμα:

Αν κατασκευάσουμε μια υβριδική εικόνα, θα δούμε ότι επικρατεί η φάση έναντι του πλάτους στη μορφή της νέας εικόνας, παρά την παραμόρφωση που εισάγεται.



**Εικ.4.4:** Η υβριδική εικόνα c περιέχει τη φάση της εικόνας a και το amplitude της εικόνας b. Το αντίστροφο ισχύει για την εικόνα d. Η παραμόρφωση των υβριδικών εικόνων οφείλεται στην διαφορετική τιμή της κλίσης a για καθεμιά από τις αρχικές εικόνες.

Ωστόσο, η επικράτηση της φάσης στα χαρακτηριστικά μιας υβριδικής εικόνας δεν συμβαίνει πάντα (Juvells et al. 1991). Υπάρχουν περιπτώσεις όπου το πλάτος είναι κυρίαρχο, όπως σε υβριδικές εικόνες που προέκυψαν από το πλάτος ενός grating και τη φάση μιας φυσικής εικόνας.

Από τα προαναφερθέντα για την φάση αντιλαμβανόμαστε ότι στο μέλλον θα ήταν καλό να διεξαχθεί μελέτη των στατιστικών χαρακτηριστικών της φάσης και ανά

χωρική συχνότητα και ανά προσανατολισμό σε μειούμενο φωτισμό. Από τα συμπεράσματα που θα προκύψουν θα είμαστε πιο σίγουροι για το τι συμβαίνει στις φυσικές σκηνές, ώστε να μπορούν αυτές να χρησιμοποιηθούν ως ερεθίσματα σε ψυχοφυσικές μελέτες για την διερεύνηση της συμπεριφοράς της όρασης κατά την μετάβαση από φωτοπικές σε μεσοπικές ή ακόμα και σε σκοτοπικές συνθήκες.

Μια μελλοντική πρόκληση αποτελεί και ο συσχετισμός των στατιστικών χαρακτηριστικών των φυσικών σκηνών με αποτελέσματα ψυχοφυσικών μελετών για την επιλεκτικότητα χωρικής συχνότητας και προσανατολισμού που εμφανίζουν οι νευρώνες. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να εκφραστεί η χωρική κατανομή του πλάτους των εικόνων σε  $c/deg$  και όχι σε  $c/image$ , ώστε να ο συσχετισμός να γίνει μεταξύ όμοιων μεγεθών. Από το τελευταίο θα δοθεί η δυνατότητα να γίνει αντιληπτός ο ρόλος του περιβάλλοντος στο οποίο εξελίσσεται το οπτικό μας σύστημα στη διαμόρφωση των νευροφυσιολογικών χαρακτηριστικών αυτού.

#### **4.2 Ψυχοφυσικές μελέτες επιλεκτικότητας χωρικής συχνότητας και προσανατολισμού**

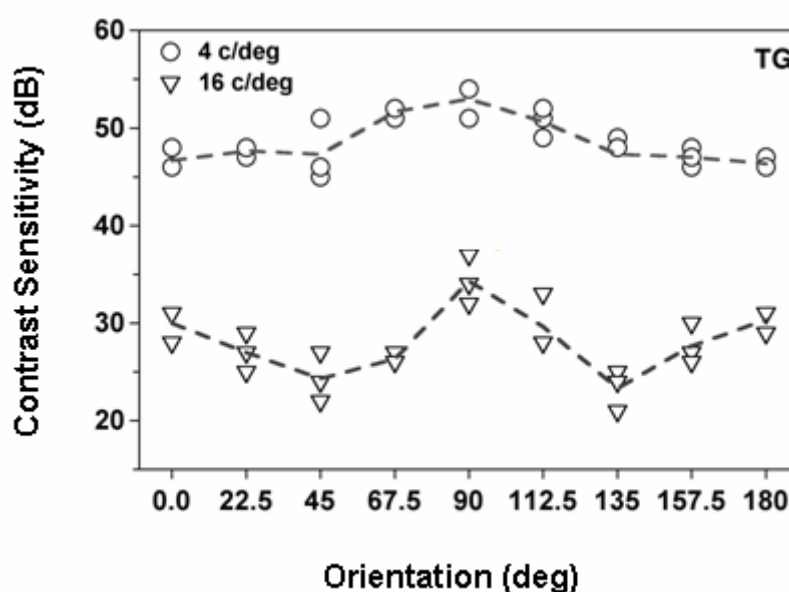
Οι ψυχοφυσικές μελέτες που διενεργήθηκαν, για την διερεύνηση της επιλεκτικότητας προσανατολισμού και χωρικής συχνότητας των νευρώνων, έγιναν με σκοπό να δούμε αν οι απλοί χρόνοι αντίδρασης μπορούν να μας δώσουν ασφαλή συμπεράσματα σε σχέση με το φαινόμενο της νευρωνικής προσαρμογής, χαρακτηριστικό των νευρώνων όταν εκτίθενται σε contrast μεγαλύτερο της ουδούς (suprathreshold, >10%).

Όσον αφορά την επιλεκτικότητα προσανατολισμού, τα αποτελέσματα και των δυο εξεταζόμενων, για προσανατολισμό του test ίσο με  $90^{\circ}$ , επιβεβαίωσαν τη θεωρία των πολλαπλών επικαλυπτόμενων νευρωνικών καναλιών. Και οι δυο εξεταζόμενοι επέδειξαν μεγάλη αύξηση στους χρόνους αντίδρασης έπειτα από προσαρμογή σε grating με κοντινό σε αυτόν του test προσανατολισμό. Η αύξηση αυτή μειωνόταν εκθετικά όσο μεγαλύτερη ήταν η διαφορά του προσανατολισμού του adaptor από αυτόν του test grating. Το εύρος του καναλιού που μελετήθηκε βρέθηκε για τον μεν SP ίσο με  $12,8^{\circ}$  ενώ για τον BZ  $19,6^{\circ}$ . Παρόμοια μεταβολή των χρόνων αντίδρασης παρατηρήθηκε και στα αποτελέσματα του BZ όταν ο προσανατολισμός του test ήταν  $180^{\circ}$ . Το εύρος του καναλιού βρέθηκε να είναι  $25,2^{\circ}$ .

Μια πρώτη παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι η διαφορά στις τιμές του εύρους για τους δυο εξεταζόμενους. Το εύρος των καναλιών για τον κάθε άνθρωπο διαμορφώνεται από το περιβάλλον στο οποίο ζει και τα ερεθίσματα που δέχτηκε κατά την εξέλιξη του οπτικού του συστήματος. Παρόλο που η εξέλιξη του οπτικού συστήματος του ανθρώπου έγινε σε διάστημα χιλιάδων χρόνων, μπορούμε

να υποθέσουμε ότι εξέλιξη του οπτικού συστήματος γίνεται και σε μικρότερη χρονικά κλίμακα. Έτσι, είναι λογικό ο κάθε εξεταζόμενος να εμφανίζει διαφορετικό εύρος αλλά και διαφορετική μεταβολή στους χρόνους αντίδρασης για το ίδιο νευρωνικό κανάλι.

Επίσης, από τις μετρήσεις στον BZ προέκυψε ότι τα νευρωνικά κανάλια δεν έχουν το ίδιο εύρος. Το κανάλι για προσανατολισμό  $180^{\circ}$  είναι ευρύτερο σε σχέση με το κανάλι για  $90^{\circ}$ . Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με βάση αποτελέσματα ερευνών (Σαπουντζής Π., 2005) που συσχετίζουν το εύρος του κάθε καναλιού με τη χωρική συχνότητα του ερεθίσματος. Έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει διαφορά στο εύρος των καναλιών του ίδιου εξεταζόμενου ανάλογα με τη χωρική συχνότητα του ερεθίσματος (βλ. Σχ.4.5).



Σχ.4.5: Διαφορά στην ευαισθησία προσανατολισμού ανάλογα με τη χωρική συχνότητα του ερεθίσματος (Σαπουντζής Π. 2005)

Παρατηρώντας το σχήμα 4.5 βλέπουμε ότι όταν το ερέθισμα έχει χωρική συχνότητα 4 c/deg, ο εξεταζόμενος εμφανίζει μεγαλύτερη ευαισθησία στις  $90^{\circ}$  που μπορεί να μεταφραστεί σε μικρότερο εύρος καναλιού για τον συγκεκριμένο προσανατολισμό. Αντίθετα, όταν το ερέθισμα έχει 16 c/deg παρατηρείται σχεδόν ίδια ευαισθησία και στις  $90^{\circ}$  και στις  $180^{\circ}$ . Από το τελευταίο συμπεραίνουμε ότι σε χωρική συχνότητα 4 c/deg το εύρος των καναλιών ( $90^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$ ) θα διέφερε, εν αντιθέσει με τους 16 c/deg που τα δυο κανάλια θα είχαν σχεδόν ίδιο εύρος.

Στη μελέτη της επιλεκτικότητας χωρικής συχνότητας τα αποτελέσματα έδειξαν παρόμοια μεταβολή όπως και στον προσανατολισμό. Όταν η χωρική συχνότητα του adaptor ήταν κοντά σε αυτή του test, τότε η αύξηση στους χρόνους αντίδρασης μετά από την προσαρμογή ήταν μέγιστη. Η μεταβολή αυτή μειωνόταν εκθετικά όσο μεγάλωνε η διαφορά στις χωρικές συχνότητες των δυο gratings. Το εύρος του

καναλιού των 4 c/deg που μελετήθηκε βρέθηκε για τον SP ίσο με 1,57 οκτάβες και για τον BZ 1,15 οκτάβες. Και από αυτά τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκε η θεωρία των νευρωνικών καναλιών για την επιλεκτικότητα χωρικής συχνότητας.

Ωστόσο, κάτι ενδιαφέρον που προέκυψε από τα αποτελέσματα και των δυο εξεταζόμενων είναι η παρουσία μιας ασυμμετρίας στη μορφή του καναλιού. Παρατηρήθηκε ότι οι χαμηλές χωρικές συχνότητες προκαλούν μεγαλύτερη προσαρμογή από ότι οι υψηλές. Αυτό φαίνεται από το ότι η μεταβολή στους χρόνους αντίδρασης μειώνεται με μικρότερο ρυθμό όσο η χωρική συχνότητα του adaptor είναι μικρότερη αυτής του test σε σχέση με το ρυθμό μείωσης που παρατηρείται για υψηλότερες του test συχνότητες.

Μια ερμηνεία της ασυμμετρίας αυτής μπορεί να δοθεί αναλογιζόμενοι ότι τα νευρωνικά κανάλια δεν έχουν το ίδιο εύρος. Αυτό σημαίνει ότι σε κάποιες χωρικές συχνότητες από αυτές που εξεταστήκαν, λόγω της αλληλοεπικάλυψης των καναλιών (κάτι το οποίο προκύπτει από τη θεωρία των πολλαπλών αλληλεπικαλυπτόμενων νευρωνικών καναλιών), μπορεί να ενεργοποιηθήκαν περισσότερα του ενός κανάλια. Άρα ο αριθμός των νευρώνων που προσάρμοσαν ήταν μεγαλύτερος, με αποτέλεσμα να φαίνεται ισχυρότερη η επίδραση της προσαρμογής.

Επίσης, μια δεύτερη ερμηνεία δίνεται και από τις τιμές του «ισοδύναμου» contrast που προέκυψαν για την κάθε χωρική συχνότητα. Το «ισοδύναμο» contrast ήταν μικρότερο για τις χαμηλές συχνότητες σε σχέση με τις ισαπέχουσες υψηλές. Έχοντας και υπόψη ότι περισσότεροι νευρώνες είναι συντονισμένοι σε χαμηλές και μεσαίες χωρικές συχνότητες (το συμπέρασμα προκύπτει από μια τυπική καμπύλη ευαισθησίας αντίθεσης), η ασυμμετρία που εμφανίζεται στις μετρήσεις, δηλαδή ισχυρότερη προσαρμογή προκαλούν οι χαμηλές συχνότητες, είναι αναμενόμενη.

Όμως και το contrast που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις απαιτεί σχολιασμό. Για την επιλογή του contrast στις μελέτες προσανατολισμού, μετρήθηκε η απόκριση των εξεταζόμενων έπειτα από προσαρμογή σε διαφορετική τιμή contrast, υψηλότερη της ουδούς. Και οι δυο εξεταζόμενοι εμφάνισαν after-effect όταν το contrast υπερέβη την τιμή 20%, δηλαδή οι νευρώνες χρειάζονταν περισσότερο χρόνο να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να παρουσιαστεί δυσκολία στην αντίληψη του test grating. Έτσι η τιμή που επιλέχθηκε για το contrast ήταν 20%, που αποτελούσε το σημείο μετάβασης προς το after-effect βάσει των μετρήσεων μας.

Αντίθετα, στη μελέτη των χωρικών συχνοτήτων, απαιτήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση εύρεσης του contrast του adaptor λόγω της μορφής της CSF. Οι πρώτες μετρήσεις που έγιναν στον BZ χρησιμοποιώντας σταθερό contrast, έδειξαν μεν παρόμοια μεταβολή όπως και σε αυτές με το «ισοδύναμο» contrast, αλλά και το

εύρος του καναλιού προέκυψε μικρότερο και δεν εμφανίστηκε η ασυμμετρία των άλλων αποτελεσμάτων. Έπειτα, χρησιμοποιώντας το «ισοδύναμο» contrast για κάθε χωρική συχνότητα, οι tuning curves που προέκυψαν είχαν διαφορετική μορφή. Η ανάγκη υπολογισμού του contrast ξεχωριστά για κάθε συχνότητα ήρθε στο προσκήνιο από το ότι, λόγω της διαφορετικής ευαισθησίας σε κάθε χωρική συχνότητα, το αποτέλεσμα της προσαρμογής δεν είναι ίδιο.

Ένα ωστόσο σχόλιο πρέπει να γίνει και για τις τιμές  $R^2$  των tuning curves. Οι μικρές τιμές που εμφανίζονται σε κάποια γραφήματα οφείλονται στο ότι τα exponential και τα Gaussian μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη τις αρνητικές τιμές που τυχόν παρατηρούνται στα δεδομένα.

Η εργασία αυτή επικεντρώθηκε σε μια χωρική συχνότητα και δυο διαφορετικούς προσανατολισμούς για το test grating. Παρόλα αυτά, μια πλήρης μελέτη των νευροφυσιολογικών χαρακτηριστικών του οπτικού συστήματος απαιτεί μετρήσεις και σε άλλες χωρικές συχνότητες και προσανατολισμούς. Μια συνέχεια αυτής της εργασίας θα πρέπει να περιλαμβάνει μια ευρεία γκάμα τιμών για τις παραπάνω παραμέτρους του test, ώστε να προκύψουν πλήρη συμπεράσματα χρησιμοποιώντας την καταγραφή χρόνων αντίδρασης σαν πειραματική μέθοδο.

Καλό θα ήταν επίσης, στις μελέτες για τον προσανατολισμό, να χρησιμοποιηθεί και μια ίδια προσέγγιση εύρεσης του contrast, αντίστοιχη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τις χωρικές συχνότητες. Η ανάγκη υιοθέτησης αυτής της μεθόδου προκύπτει από τα αποτελέσματα για την ουδό για τους δυο προσανατολισμούς στους οποίους εξετάστηκε ο BZ. Λόγω διαφορετικής CSF για τις  $90^\circ$  και τις  $180^\circ$ , η ουδός είχε διαφορετική τιμή. Συνεπώς, πρέπει να διερευνηθεί το «ισοδύναμο» contrast για όλους τους προσανατολισμούς στην ίδια χωρική συχνότητα, ώστε να είμαστε σίγουροι ότι προκαλείται ίδιο αποτέλεσμα προσαρμογής από κάθε προσανατολισμό. Μια άλλη παρατήρηση που συνάγει στην χρήση αυτής της μεθόδου εύρεσης του contrast είναι και η συμμετρία που παρουσιάστηκε στα αποτελέσματα των δυο εξεταζόμενων. Αντίστοιχη συμμετρία στα αποτελέσματα παρουσιάστηκε και στην μελέτη της επιλεκτικότητας χωρικής συχνότητας που έγινε στον εξεταζόμενο BZ. Με χρήση σταθερής τιμής contrast για την κάθε χωρική συχνότητα τα αποτελέσματα ήταν συμμετρικά, κάτι το οποίο αναιρέθηκε από τη μορφή των αποτελεσμάτων που εμφάνισαν και οι δυο εξεταζόμενοι με την χρήση του «ισοδύναμου» contrast.

Τέλος, μια συσχέτιση με τα στατιστικά χαρακτηριστικά των φυσικών σκηνών θα ήταν χρήσιμη για την μελέτη του τρόπου με τον οποίο επιδρά το περιβάλλον, που εξελίσσεται ένας άνθρωπος, στη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών του οπτικού του συστήματος.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1**

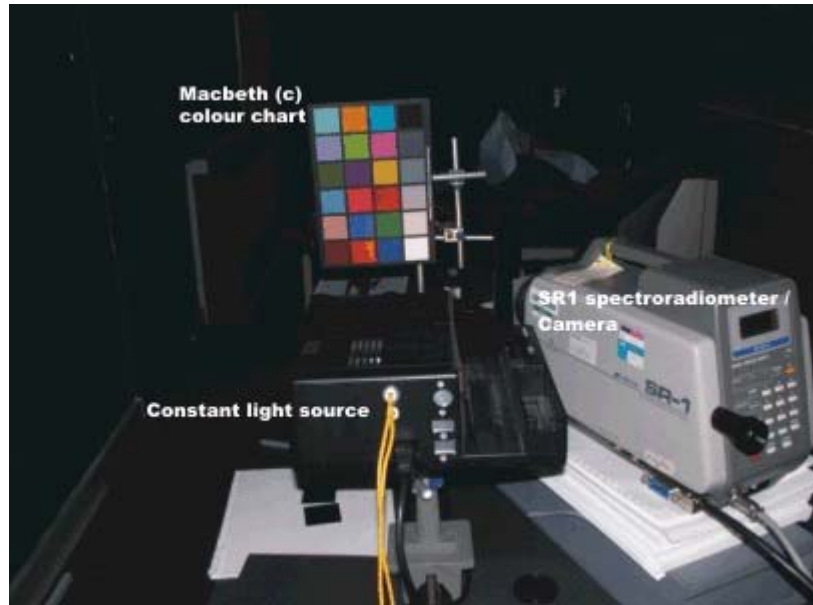
### **Βαθμονόμηση φωτογραφικής μηχανής**

Η διαδικασία της βαθμονόμησης είναι ιδιαίτερα σημαντική και για τη χρήση των φυσικών σκηνών σαν ερεθίσματα σε ψυχοφυσικές δοκιμασίες, αλλά και για την επεξεργασία των εικόνων, ώστε να διερευνηθεί η στατιστική τους δομή. Οι τιμές φωτεινότητας της εικόνας που χρησιμοποιείται ως ερέθισμα, πρέπει να αποτελούν γραμμικό ανάλογο των τιμών της φωτεινότητας της πραγματικής σκηνής. Λόγω του ότι, από κατασκευής της φωτογραφικής μηχανής, η συνάρτηση που συσχετίζει τις αποκρίσεις καθενός από τους RGB αισθητήρες με την εισερχόμενη φωτεινότητα (συνάρτηση γάμμα) δεν είναι γραμμική, σκοπός της βαθμονόμησης είναι η εκτίμηση της συνάρτησης γάμμα (gamma function) και η αφαίρεση της, έτσι ώστε η συσχέτιση των αποκρίσεων των αισθητήρων της κάμερας, με την εισερχόμενη φωτεινότητα να είναι γραμμική.

Η μέθοδος βαθμονόμησης της ψηφιακής μηχανής Nikon Coolpix 5700 που περιγράφεται παρακάτω, αναπτύχθηκε στο τμήμα Πειραματικής Ψυχολογίας του Πανεπιστημίου του Bristol, από τους C. Alejandro Parraga και Tom Troscianko (2003).

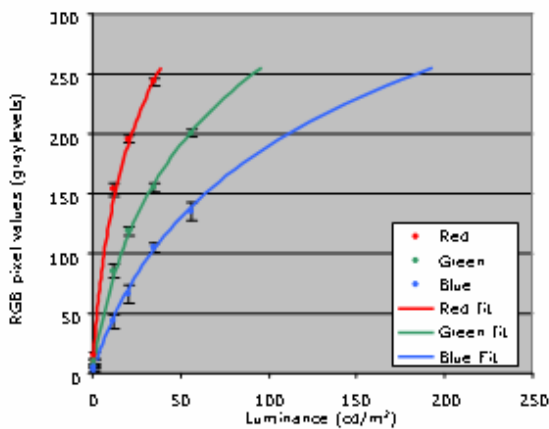
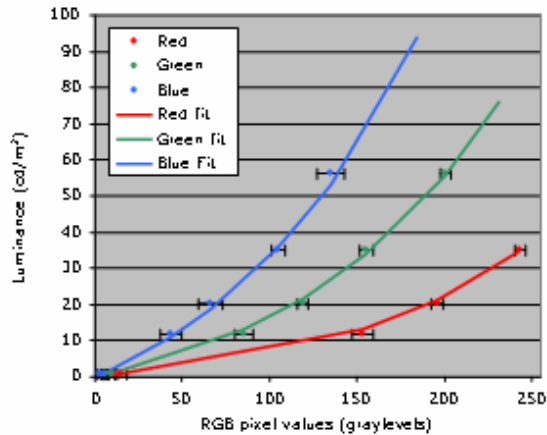
### **Εκτίμηση της συνάρτησης γάμμα**

Για τον υπολογισμό της συνάρτησης γάμμα της κάμερας χρησιμοποιείται σαν φωτεινή πηγή μία συνεχής πηγή (Tugstent-holgen lamp(Osram HLX 64657FGX-24V,250W)) συνδεδεμένη σε σταθεροποιητή τάσης (DC power supply, type SP020-Vinculum products). Το κέντρο της φωτεινής δέσμης που προέρχεται από την πηγή φωτίζει έναν έγχρωμο πίνακα Macbeth (Macbeth (c) chart-Kollmorgen Instruments Corporation), που αποτελείται από 24 τετράγωνα διαφορετικής ανακλαστικότητας. Ένα σπεκτροραδιόμετρο (SR) (Topcon Model SR1 με εύρος φασματικής ακτινοβολίας μεταξύ 380-760nm), εστιασμένο στο κέντρο καθενός από τα γκρι τετράγωνα του πίνακα, μετρά τη φωτεινότητα του. Η απόσταση του SR από τον πίνακα είναι τέτοια ώστε η μέτρηση να λαμβάνεται από το κέντρο κάθε τετραγώνου, χωρίς να περιλαμβάνονται τα όρια του. Στην περίπτωση που το SR έχει δύο μεγέθη διαφραγμάτων χρησιμοποιείται το μεγαλύτερο, που στην περίπτωση μας ήταν 2°. Στην εικόνα 1 απεικονίζεται η διαδικασία μέτρησης με το SR.



**Εικ. 1: Εξοπλισμός για τη μέτρηση της συνάρτησης γάμμα της κάμερας. (Σκοτεινό δωμάτιο, Τμήμα Πειραματικής Ψυχολογίας, Πανεπιστήμιο του Bristol)**

Στη συνέχεια, τοποθετώντας την κάμερα έτσι ώστε να είναι εστιασμένη στο ίδιο σημείο με το SR, λαμβάνονται εικόνες του καθενός γκρι τετραγώνου του πίνακα Macbeth. Η κάμερα ρυθμίζεται στη μέγιστη μεγέθυνση (maximum zoom,  $f = 7.4$ ) και οι εικόνες λαμβάνονται για διάφορους χρόνους έκθεσης (integration times,  $IT=4,2,1,1/2,1/4$ ). Στην περίπτωση μας λήφθηκαν μετρήσεις φωτεινότητας με το SR για όλα τα τετράγωνα του πίνακα και φωτογραφήθηκε ολόκληρος ο πίνακας με  $ITs=1/2,1/4$ . Τα τετράγωνα του πίνακα πρέπει να βρίσκονται στο κέντρο της εικόνας, ώστε να αποφεύγονται οι παραμορφώσεις λόγω εκτροπών από το περιφερικό τμήμα του φακού της κάμερας. Επιλέγεται το κεντρικό τμήμα (διαστάσεων  $10 \times 10$  pixels, ώστε να αντιστοιχεί στη διάμετρο του διαφράγματος του SR) της εικόνας κάθε τετραγώνου και υπολογίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για καθεμία από τις R,G,B τιμές φωτεινότητας. Οι τιμές για τις R,G,B αποκρίσεις παριστάνονται γραφικά στο σχήμα 2, συναρτήσει της φωτεινότητας.



**Σχ. 2:** Οι συναρτήσεις γάμμα για τους RGB αισθητήρες της κάμερας. Η φωτεινότητα συναρτήσει των RGB τιμών (πάνω) και οι τιμές RGB συναρτήσει της φωτεινότητας (κάτω).

Όταν η φωτεινότητα  $L$  παρασταθεί γραφικά συναρτήσει των RGB τιμών  $s$  (Σχ. 2, πάνω), τα σημεία παρεμβάλλονται από μια συνάρτηση γάμμα:

$$L = a(b^s + 1), \text{ (Εξ. 1)}$$

όπου  $a$ ,  $b$  ελεύθερες παράμετροι. Το  $a$  αποτελεί εκτίμηση της κλίσης ή του gain της συνάρτησης και το  $b$  της επιτάχυνσης. Για την παράμετρο  $b$  επιλέγεται μία μοναδική τιμή, έτσι ώστε η παραπάνω συνάρτηση να παρεμβάλλεται βέλτιστα και στις τρεις RGB καμπύλες. Στην περίπτωση της δικής μας κάμερας η τιμή του  $b$  για βέλτιστη παρεμβολή ισούται με 1.01. οι τιμές  $a$  των RGB αισθητήρων επηρεάζονται από την επιλογή 'white balance' της κάμερας. Όταν το 'white balance' είναι ρυθμισμένο στο 'cloudy', τα gains συμπεριφέρονται έτσι ώστε μια ουδέτερη γκρι επιφάνεια, εκτεθειμένη σε εξωτερικό φωτισμό, να παράγει παρόμοια αποτελέσματα και για τους



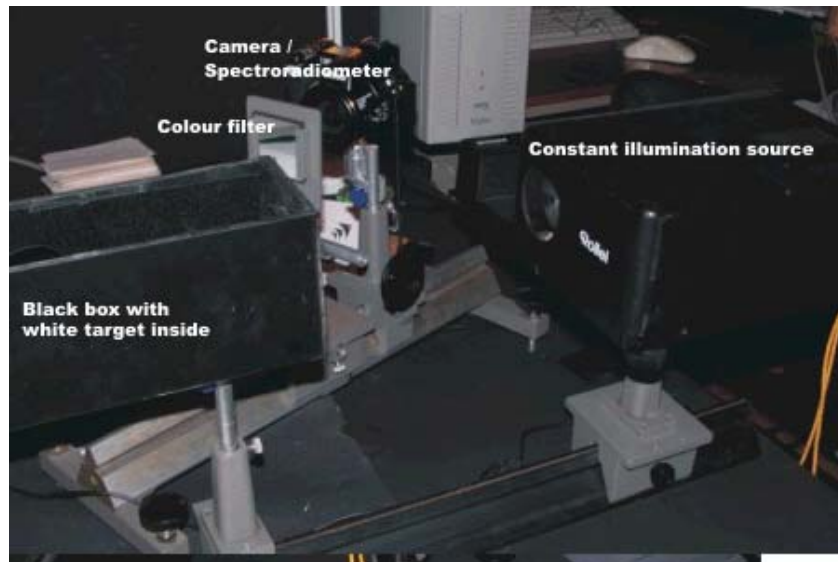
τρεις RGB αισθητήρες. Αν το εξωτερικό φως έχει όμως ομοιόμορφο φάσμα, όπως η φωτεινή πηγή που χρησιμοποιήθηκε, περιέχει περισσότερα υψηλά μήκη κύματος. Αν λοιπόν οι RGB τιμές των rixel παρασταθούν συναρτήσει της φωτεινότητας (Σχ.2 κάτω), το βάρος στα μεγαλύτερα μήκη κύματος έχει ως αποτέλεσμα την αντίστροφη διάταξη των καμπύλων.

Με δεδομένο ότι η φωτεινή πηγή δεν έχει επίπεδο φάσμα, οι gain παράμετροι πρέπει να διορθωθούν ώστε να εξισωθούν με τις RGB αποκρίσεις σε ομοιόμορφο φάσμα φωτός.

### **Εκτίμηση της φασματικής ευαισθησίας των αισθητήρων της φωτογραφικής μηχανής**

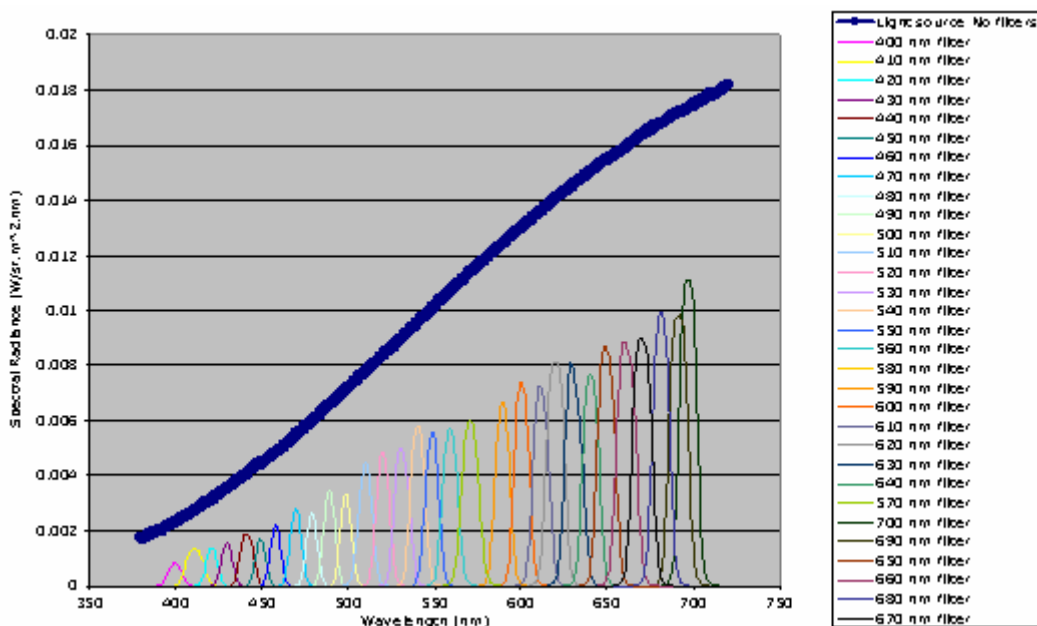
Στην ενότητα αυτή περιγράφεται πώς υπολογίζονται οι συναρτήσεις φασματικής ευαισθησίας των RGB αισθητήρων και πώς εκτιμάται για κάθε αισθητήρα ο λόγος της απόκρισης σε ομοιόμορφο φάσμα φωτός προς την απόκριση στον φωτισμό που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης περιγράφεται πώς χρησιμοποιείται ο λόγος αυτός για τον υπολογισμό των παραμέτρων  $a$ .

Οι φασματικές ευαισθησίες των αισθητήρων της κάμερας στο ορατό φάσμα (400 – 700 nm) μετρώνται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο 31 χρωματικών φίλτρων (Ealing Electro-Optics, Watford). Τα φίλτρα αυτά καλύπτουν το εύρος 400-700 nm με βήμα 10 nm. Η φωτεινή πηγή φωτίζει ένα μαύρο κουτί στο οποίο έχουν ανοιχτεί δύο οπές. Η μια οπή χρησιμεύει στο να φωτίζει η πηγή το στόχο και η άλλη, κάθετη στην προηγούμενη, στο να λαμβάνονται μετρήσεις με το SR και εικόνες με την κάμερα. Στο εσωτερικό του κουτιού είναι τοποθετημένος ένας λευκός στόχος μέγιστης ανακλαστικότητας και το κουτί έχει επενδυθεί εσωτερικά με μαύρο ύφασμα, ώστε να μην ανακλάται φως από τα τοιχώματα. Ο στόχος αποτελείται από κυανοκρυλική (cyanocrylate) κολλώδη πούδρα (παρόμοια με το πρότυπο λευκό Kodak-Eastman, 99% ανακλαστικότητα στο ορατό φάσμα). Η ουσία αυτή παράγει ένα Λαμπερτιανό (Lambertian) προφίλ διάχυσης του φωτός και παρουσιάζει προσεγγιστικά ομοιόμορφη συνάρτηση ανάκλασης στο ορατό φάσμα. Ένα μαύρο πανί, που φτάνει μέχρι το κουτί, τοποθετείται ανάμεσα στον προβολέα και την κάμερα ή το SR.



Εικ.3: Εξοπλισμός για τη μέτρηση της φασματικής ευαισθησίας της φωτογραφικής μηχανής. (Σκοτεινό δωμάτιο, Τμήμα Πειραματικής Ψυχολογίας, Πανεπιστήμιο του Bristol)

Το SR αρχικά εστιάζεται στο κέντρο του λευκού στόχου με το μικρό διάφραγμα ( $0.2^\circ$ ), και στη συνέχεια λαμβάνεται μέτρηση χωρίς κανένα φίλτρο με το μεγάλο διάφραγμα ( $2^\circ$ ), ώστε να καλύπτεται ο λευκός στόχος. Στη συνέχεια, τοποθετούνται με τη σειρά τα φίλτρα μπροστά από το SR και λαμβάνονται μετρήσεις, ενώ στο τέλος λαμβάνεται μια ακόμα μέτρηση χωρίς φίλτρο. Στο σχήμα 4 παριστάνεται γραφικά η ακτινοβολία της φωτεινής πηγής, αφού ανακλαστεί στο λευκό στόχο και μετρηθεί μετά το πέρασμα από τα φίλτρα.



**Σχ.4: Φασματική ακτινοβολία των 31 φίλτρων για τη πηγή φωτισμού που χρησιμοποιήθηκε. Η παχιά γραμμή παρουσιάζει το φασματικό περιεχόμενο του φωτός όπως μετρήθηκε χωρίς φίλτρο.**

Έπειτα λαμβάνονται μία σειρά από φωτογραφίες, αντικαθιστώντας το SR με τη φωτογραφική μηχανή (τα εστιακά τους σημεία πρέπει να βρίσκονται στην ίδια θέση). Οι φωτογραφίες λαμβάνονται με τη μέγιστη μεγέθυνση (max zoom) της κάμερας.

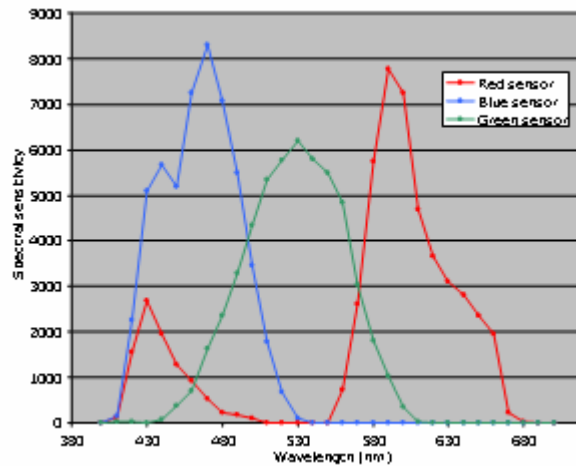
Αρχικά λαμβάνεται μία φωτογραφία του στόχου χωρίς φίλτρο και η κάμερα ρυθμίζεται στο 'aperture priority, A'. Στη ρύθμιση αυτή επιτρέπεται στο χρήστη να επιλέξει το μέγεθος του διαφράγματος ( $f=7.4$ ), ενώ η κάμερα ρυθμίζει αυτόματα τον χρόνο έκθεσης (integration time, IT). Για τις φωτογραφίες με τα πρώτα έξι φίλτρα ρυθμίζεται από τον χρήστη ο χρόνος έκθεσης σύμφωνα με τον Πίνακα 1, και το  $f$  μεταβάλλεται αυτόματα. Οι υπόλοιπες φωτογραφίες λαμβάνονται με  $f = 7.4$  (μέγιστο) και επιτρέποντας στο χρόνο έκθεσης να μεταβάλλεται από την κάμερα. Στο τέλος, λαμβάνονται άλλες δύο εικόνες (με  $f = 7.4$ ), μια χωρίς κανένα φίλτρο και μία με το καπάκι της μηχανής. Η λήψη με το καπάκι βοηθά στο να διαπιστωθεί αν οι αισθητήρες της κάμερας παράγουν θόρυβο (οφείλεται στα ηλεκτρονικά στοιχεία της κάμερας και φαίνεται σαν άσπρα pixels), για να αφαιρεθεί στη συνέχεια.

**Πιν. 1: Χρόνος έκθεσης για τις λήψεις με τα έξι πρώτα φίλτρα**

Filter peak (nm)	Integration Time T (sec)	1/T
400	<b>8.00</b>	0.125
410	<b>4.00</b>	0.25
420	<b>1.00</b>	1.00
430	<b>0.50</b>	2.00
440	<b>0.50</b>	2.00
450	<b>0.25</b>	4.00

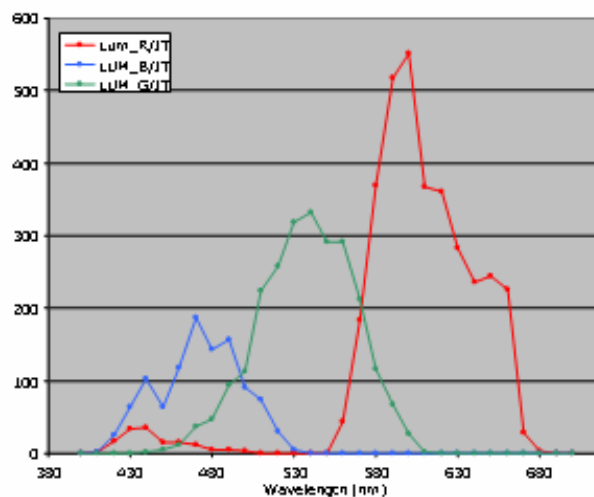
Στη συνέχεια, οι RGB τιμές του κεντρικού τμήματος των εικόνων αθροίζονται, όπως παραπάνω, και καταγράφεται ο χρόνος έκθεσης (IT) για κάθε εικόνα. Οι RGB τιμές, με και χωρίς τα φίλτρα, διορθώνονται από τη συνάρτηση γάμμα (Εξ. 1), με την παράμετρο  $a$  να έχει την ίδια τιμή για τους τρεις αισθητήρες, και στη συνέχεια διαιρείται με τη χρόνο έκθεσης. Η τιμή  $a$  στην περίπτωση μας είναι ίση με 1.21. Η τιμή αυτή αποτελεί την τιμή που αντιστοιχεί στον πράσινο αισθητήρα ( $a_G = 1.21$ ).

Οι διορθωμένες από τη συνάρτηση γάμμα RGB τιμές διαιρούνται με τις μετρήσεις ακτινοβολίας, για να υπολογιστούν οι φασματικές ευαισθησίες των RGB αισθητήρων για το μήκος κύματος κάθε φίλτρου. Με χρήση αριθμητικών μεθόδων, τα χωρία κάτω από τις RGB καμπύλες εξισώνονται, ώστε να παραχθούν ίσες αποκρίσεις με αυτές σε φως ομοιόμορφου φάσματος. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 5.



**Σχ.5: Φασματική ευαισθησία των RGB αισθητήρων της κάμερας**

Για να αντισταθμιστεί η χρήση του προβολέα πυρακτώσεως αντί για λευκό φως, οι RGB ευαισθησίες που απεικονίζονται στο σχήμα 5, πολλαπλασιάζονται με το φάσμα του ανακλώμενου φωτός από το λευκό στόχο. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 6.



**Σχ.6: Φασματικές ευαισθησίες των RGB αισθητήρων, διορθωμένες για το φωτισμό που χρησιμοποιήθηκε**

Από το σχήμα 6 υπολογίζονται οι παράμετροι  $a$ , ως οι λόγοι των εμβαδών των χωρίων που περικλείονται από τις καμπύλες του κόκκινου και μπλε αισθητήρα  $\sum R$ ,  $\sum B$ , προς το εμβαδόν του χωρίου που περικλείεται από τη καμπύλη του πράσινου αισθητήρα  $\sum G$ .

Για τον κόκκινο λοιπόν αισθητήρα η παράμετρος  $a$  υπολογίζεται ως

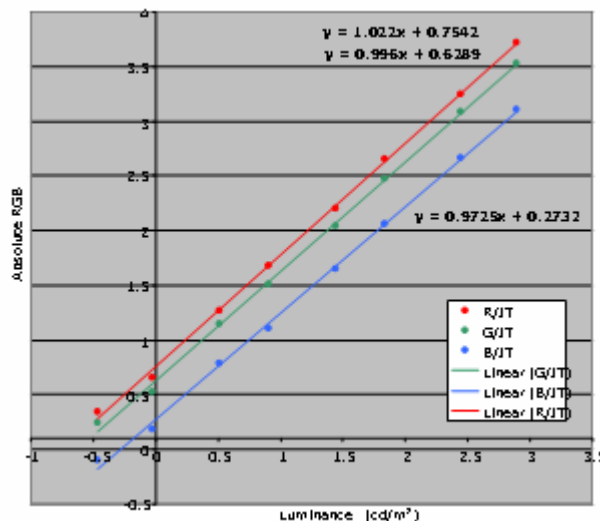
$$a_R = \frac{\sum R}{\sum G}$$

και για τον μπλε αισθητήρα ως

$$a_B = \frac{\sum B}{\sum G}$$

Στην περίπτωση μας οι παράμετροι είχαν τις τιμές,  $a_R = 0.8341$  και  $a_B = 1.8751$ .

Για τον τελικό έλεγχο της βαθμονόμησης ελήφθησαν μετρήσεις με το SR από το κέντρο του λευκού στόχου. Μπροστά στο SR τοποθετήθηκαν ουδέτερης πυκνότητας (neutral density, ND) φίλτρα με τιμές 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, εκφρασμένες σε λογαριθμικές μονάδες, και μετρήθηκε η φωτεινότητα μέσα από κάθε φίλτρο. Έπειτα το SR αντικαταστάθηκε από την κάμερα και από το κεντρικό κομμάτι κάθε εικόνας, υπολογίστηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για κάθε RGB αισθητήρα. Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται το γράφημα της εξόδου (output) της κάμερας συναρτήσει της φωτεινότητας σε λογαριθμικούς άξονες.



Σχ.7: Η σχέση μεταξύ των RGB τιμών (διαιρεμένες με τον χρόνο έκθεσης) και της φωτεινότητας

Οι τιμές αυτές διορθωθήκαν από τη συνάρτηση γάμμα, με χρήση των παραμέτρων που υπολογίστηκαν παραπάνω και διαιρέθηκαν με χρόνο έκθεσης για κάθε εικόνα. Όπως φαίνεται οι κλίσεις των γραμμών είναι κοντά στη μονάδα και η μορφή τους είναι γραμμική.

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι οι αισθητήρες της φωτογραφικής μηχανής φτάνουν σε κορεσμό όταν η τιμή φωτεινότητας των pixels είναι μικρότερη του 5 και μεγαλύτερη του 250. Συνεπώς, οι γραμμικοποιημένες τιμές δεν ισχύουν για φωτεινότητες εκτός αυτών των ορίων.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

### Ρυθμίσεις φωτογραφικής μηχανής

Οι ρυθμίσεις που είχε η φωτογραφική μηχανή κατά τη λήψη των εικόνων παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

ΡΥΘΜΙΣΗ	ΕΠΙΛΟΓΗ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
<i>Resolution</i>	<b>HI (2560 x 1920)</b>	Η πραγματική εικόνα
<i>Format</i>	<b>TIF</b>	Χωρίς συμπίεση
<i>ISO rating</i>	<b>200</b>	Ρυθμίζει την ευαισθησία της κάμερας. Ισοδυναμεί με ένα ISP 200 φιλμ.
<i>Digital zoom</i>	<b>Off</b>	
<i>White balance</i>	<b>Cloudy</b>	Διατηρεί τα φυσικά χρώματα σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού. Η επιλογή "cloudy" είναι κατάλληλη για διάφορες εξωτερικές συνθήκες φωτισμού.
<i>Aperture range</i>	<b>F7.4</b>	Μέγιστο zoom.
<i>Flash</i>	<b>Off</b>	
<i>Mode / Exposure</i>	<b>Aperture priority</b>	Το διάφραγμα ρυθμίζεται στο μέγιστο F7.4 , που μεγιστοποιεί το βάθος πεδίου, επιτρέποντας στο μεγαλύτερο μέρος της σκηνής να είναι εστιασμένη. Με αυτή την επιλογή ο χρόνος έκθεσης (integration time) ρυθμίζεται αυτόματα.
<i>Metering</i>	<b>Spot / Matrix</b>	

<i>Saturation control</i>	<b>Normal</b>
<i>Lens Image sharpening</i>	<b>Normal</b>
<i>Autobracketing</i>	<b>Off</b>
<i>Noise reduction</i>	<b>Off</b>

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

#### Μονοδιάστατος μετασχηματισμός Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier αποτελεί την επέκταση της ανάλυσης με σειρές Fourier και σε μη περιοδικές συναρτήσεις. Μπορεί να εφαρμοστεί σε μια οποιαδήποτε απόλυτα ολοκληρώσιμη συνάρτηση (Continuous Fourier Transform, CFT) ή ακόμα και σε ένα σύνολο σημείων (Discrete Fourier Transform, DFT). Στο κεφάλαιο αυτό, που έχει να κάνει με σύνολα σημείων που συνθέτουν μια εικόνα, θα ασχοληθούμε κυρίως με τον DFT.

Ο μονοδιάστατος μετασχηματισμός Fourier μιας διακριτής συνάρτησης  $f(x)$ ,  $x=0,1,2,\dots,M-1$ , ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F(f) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-i2\pi fx/M}, \quad f=0,1,2,\dots,M-1.$$

Αν μια πραγματική συνάρτηση  $\varphi(x)$  μετασχηματιστεί μέσω Fourier, το αποτέλεσμα που θα προκύψει είναι μιγαδική συνάρτηση της συχνότητας  $f$ . Η μορφή της μιγαδικής αυτής συνάρτησης είναι:

$$F(f) = R(f) + iI(f)$$

με το  $R(f)$  να αποτελεί το πραγματικό της μέρος και το  $I(f)$  το φανταστικό.

Ως γνωστό, μια μιγαδική συνάρτηση όπως η παραπάνω μπορεί να εκφραστεί και σε εκθετική μορφή:

$$F(f) = \text{Amplitude}(f) e^{i\text{Phase}(f)}$$

όπου,

$$\text{Amplitude}(f) = |F(f)| = \sqrt{R^2(f) + I^2(f)} \quad \text{και}$$

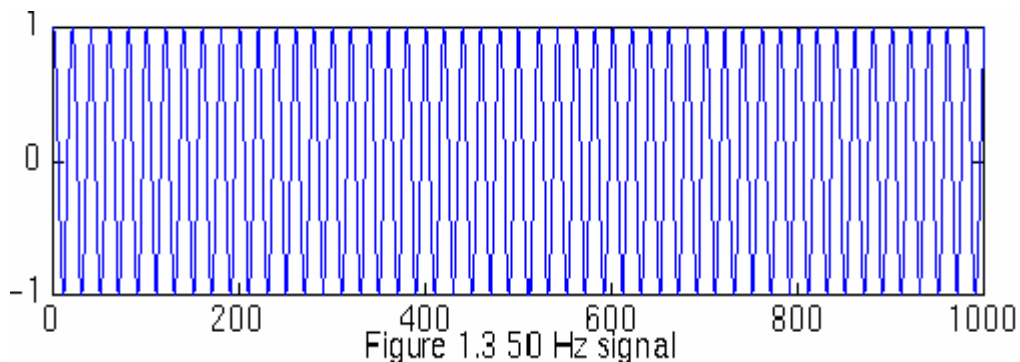
$$Phase(f) = \tan^{-1} \left[ \frac{I(f)}{R(f)} \right].$$

Το  $Amplitude(f)$  ονομάζεται φασματικό πλάτος (**amplitude spectrum** ή Fourier amplitude) της συνάρτησης, η  $Phase(f)$  φασματική φάση (**phase spectrum**), ενώ η ποσότητα  $|F(f)|^2$  φασματική ισχύς (**power spectrum**).

Αν μία συνάρτηση εξαρτάται από μία χωρική μεταβλητή  $x$ , ο μετασχηματισμός Fourier την μετατρέπει σε συνάρτηση (χωρικής) συχνότητας  $f$  ( $f = x^{-1}$ ). Αν η μεταβλητή της συνάρτησης είναι χρονική ( $t$ ), ο μετασχηματισμός Fourier έχει σαν αποτέλεσμα την μετατροπή σε συνάρτηση χρονικής συχνότητας ( $\omega = t^{-1}$ ). Συνοψίζοντας, ο μετασχηματισμός Fourier δείχνει από ποιες συχνότητες αποτελείται η μετασχηματιζόμενη συνάρτηση και πόσο ισχυρές είναι αυτές. Παρακάτω παρατίθενται κάποια παραδείγματα που δείχνουν ξεκάθαρα την λειτουργία που επιτελεί ο μετασχηματισμός Fourier.

Παράδειγμα 1:

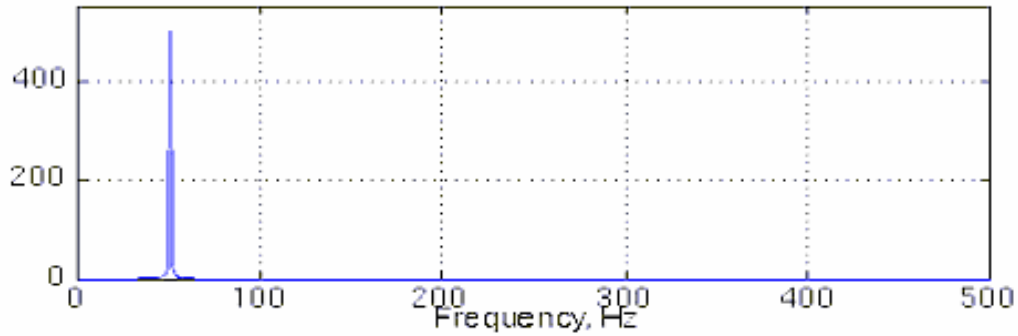
Έστω το ακόλουθο σήμα εισόδου:



**Σχ.1: Ημιτονοειδές σήμα συχνότητας 50 Hz**

Όπως βλέπουμε, το σήμα αυτό είναι ημιτονοειδές με συχνότητα 50 Hz. Συνεπώς, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το σήμα αποτελείται μόνο από μια αρμονική, τη θεμελιώδη. Η υπόθεση μας αποδεικνύεται μέσω του μετασχηματισμού Fourier.





**Σχ.2: Μετασχηματισμός Fourier του παραπάνω σήματος**

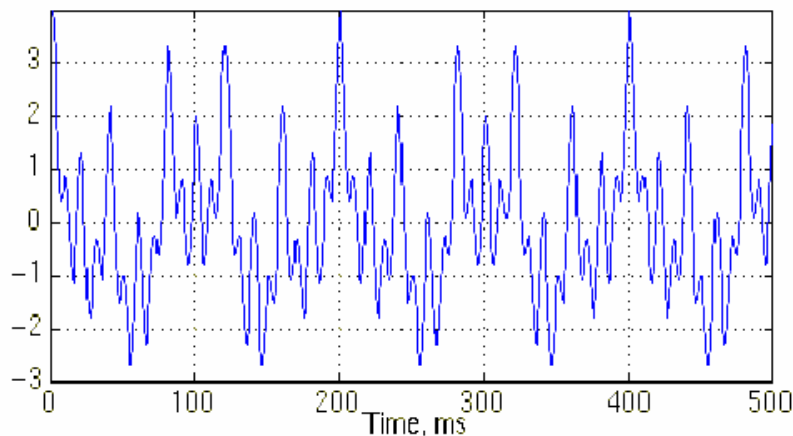
Ο μετασχηματισμός Fourier του σήματος δείχνει ότι το σήμα αποτελείται μόνο από τη θεμελιώδη αρμονική στα 50 Hz. Αυτό γίνεται ευκολότερα αντιληπτό μιας βλέπουμε ότι το φασματικό πλάτος έχει μόνο ένα μέγιστο στα 50 Hz.

Παράδειγμα 2:

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι έχουμε μια συνάρτηση που μας δίνει συνημίτονα των 10, 25, 50 και 100 Hz. Η συνάρτηση αυτή περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

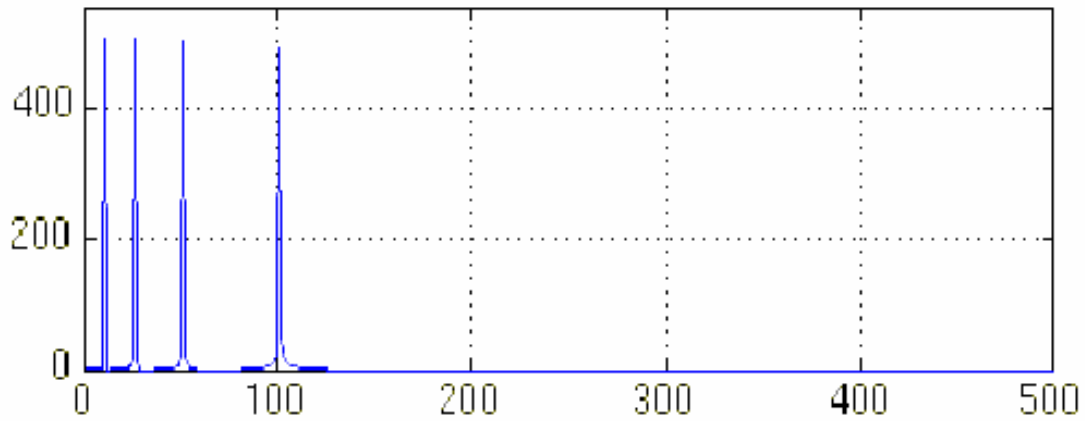
$$x(t)=\cos(2*\pi*10*t)+\cos(2*\pi*25*t)+\cos(2*\pi*50*t)+\cos(2*\pi*100*t), \quad (\text{Συν. 1})$$

Το σχήμα 3 μας δείχνει τη μορφή της συνάρτησης αυτής.



**Σχ.3: Το σήμα που περιγράφει την συνάρτηση 1**

Παρατηρώντας κάποιος το σήμα αυτό, δεν μπορεί να καταλάβει την σύνθεση του. Μετασχηματίζοντας με Fourier το σήμα, δίνεται η δυνατότητα να λυθεί το παραπάνω πρόβλημα.



**Σχ.4: Μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης 1**

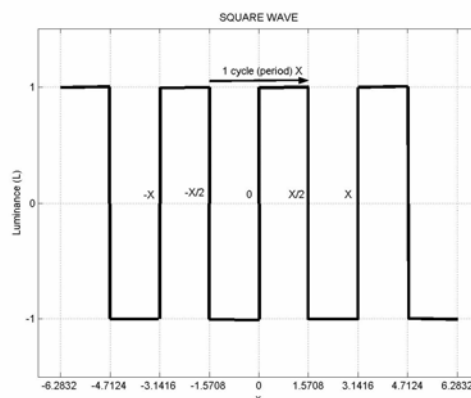
Βλέπουμε ότι το σήμα μας αποτελείται από 4 αρμονικές, στα 10, 25, 50 και 100 Hz. Μάλιστα, είναι εμφανές ότι η κάθε αρμονική έχει την ίδια ενέργεια με τις υπόλοιπες από το ότι και τα 4 μέγιστα είναι ισοϋψή.

Παράδειγμα 3:

Έστω τώρα μια τετραγωνική συνάρτηση της μορφής:

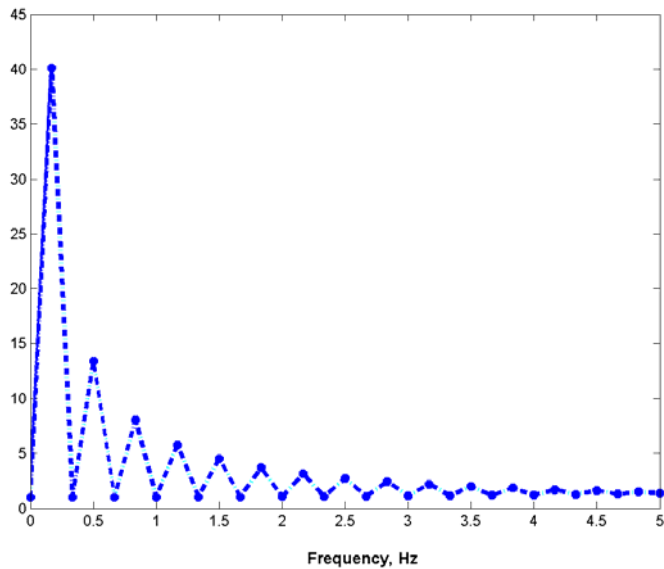
$$\frac{4}{\pi} (\sin \kappa\chi + \frac{1}{3} \sin 3\kappa\chi + \frac{1}{5} \sin 5\kappa\chi + \dots)$$

Περιέχει δηλαδή την θεμελιώδη αρμονική, που έχει και το μεγαλύτερο πλάτος, αλλά και άπειρες αρμονικές με συνεχώς μειούμενο πλάτος.



**Σχ.5: Τετραγωνική συνάρτηση**

Ο μετασχηματισμός Fourier της τετραγωνικής συνάρτησης απεικονίζεται στο σχήμα 6.



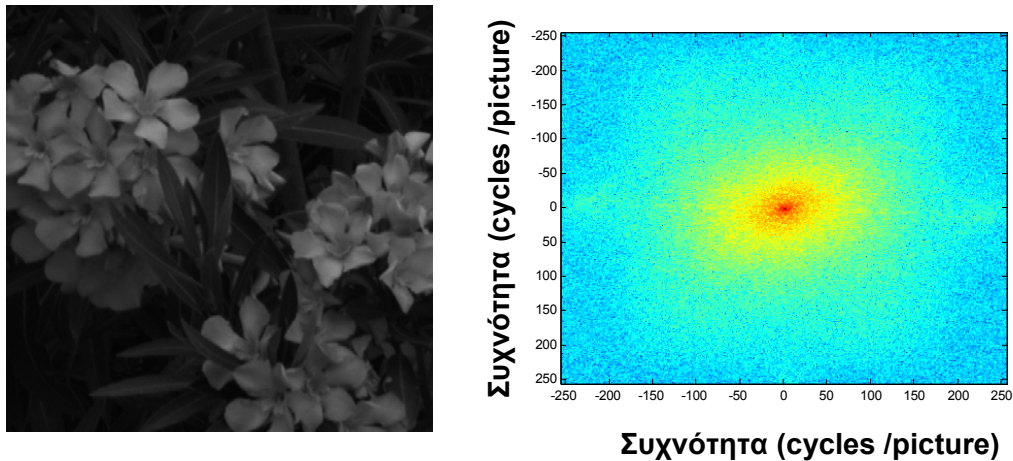
**Σχ.6: Μετασχηματισμός Fourier τετραγωνικής συνάρτησης**

Από το μετασχηματισμό Fourier αποδεικνύεται ότι η τετραγωνική συνάρτηση συντίθενται από άπειρες αρμονικές, με τη θεμελιώδη να έχει το μέγιστο πλάτος και το πλάτος συνεχώς να μειώνεται όσο μεγαλώνει η τάξη των αρμονικών.

### **Δυσδιάστατος μετασχηματισμός Fourier**

Πέρα όμως από το μονοδιάστατο μετασχηματισμό Fourier, υπάρχει και ο δυσδιάστατος. Δηλαδή, ένα δυσδιάστατος πίνακας σημείων, λόγω χάρη μια εικόνα, μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα πίνακα ίδιων διαστάσεων με τον αρχικό που περιέχει μιγαδικούς αριθμούς. Οι μιγαδικοί αυτοί αριθμοί αποτελούν τον μετασχηματισμό Fourier της εικόνας.

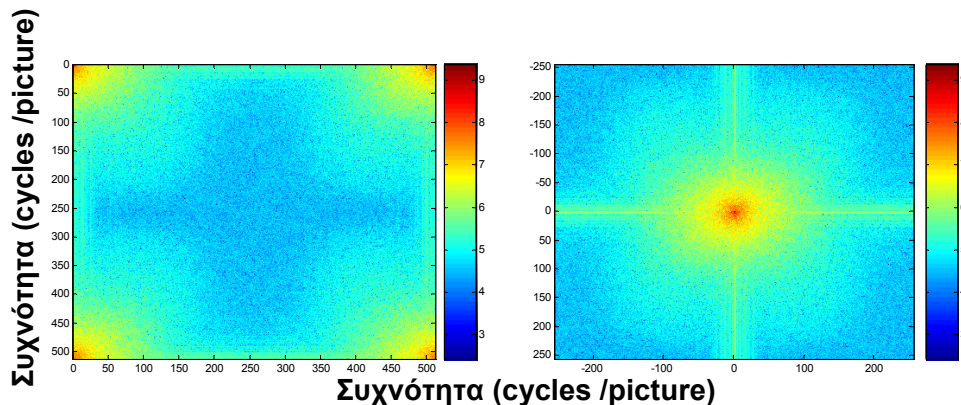
Για να εφαρμοστεί ο DFT σε μια εικόνα, εφαρμόζεται αρχικά ως μονοδιάστατος στις γραμμές της εικόνας και έπειτα ξαναεφαρμόζεται σαν μονοδιάστατος στις στήλες του αποτελέσματος που θα προκύψει. Η αναπαράσταση του DFT μιας εικόνας γίνεται είτε τρισδιάστατα είτε δυσδιάστατα, με επικρατέστερη τη δυσδιάστατη μορφή για λόγους ευκολίας. Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται μια εικόνα και ο δυσδιάστατος μετασχηματισμός Fourier αυτής.



**Σχ.7: Εικόνα (αριστερά) και ο μετασχηματισμός Fourier της (δεξιά)**

Οι διαστάσεις του πίνακα εκφράζονται σε  $\text{cycles/picture}$  ή  $\text{pixels}^{-1}$ . Το φασματικό πλάτος περιγράφεται από τον χρωματικό κώδικα της εικόνας και δεν έχει μονάδες.

Συνήθως, ο πίνακας που προκύπτει από τον μετασχηματισμό Fourier μιας εικόνας περιέχει στην περιφέρεια την πληροφορία για τις χαμηλές χωρικές συχνότητες και στο κέντρο την πληροφορία για τις υψηλές. Για λόγους ωστόσο και υπολογισμών αλλά και ευκολίας στην οπτική αντίληψη του φάσματος μπορεί η θέση των χαμηλών και των υψηλών συχνοτήτων να αντιστραφούν. Την διαφορά στα δυο φάσματα την περιγράφει το σχήμα 8.



**Σχ.8: Πληροφορία χαμηλών συχνοτήτων στην περιφέρεια (αριστερά) και στο κέντρο (δεξιά)**

Από το σχήμα παρατηρούμε ότι, πέραν της οπτικής ευκολίας που δίνεται από το δεύτερο γράφημα, αλλάζει και ο τρόπος αναπαράστασης των αξόνων, αν και συνεχίζουν να έχουν τις ίδιες διαστάσεις. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της αντιστροφής αυτής είναι ότι η ενέργεια των μηδενικών χωρικών συχνοτήτων αναπαρίστανται στο κέντρο  $(0,0)$ , εν αντιθέσει με την κανονική μορφή που αναπαρίσταται στην

περιφέρεια στη θέση (1,1) (υπόψιν η αλλαγή στους άξονες). Η τιμή του φασματικού πλάτους στο σημείο αυτό ισούται με:

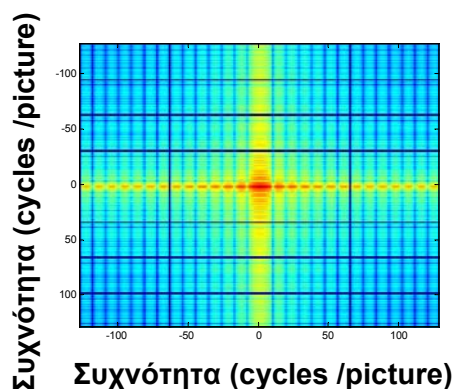
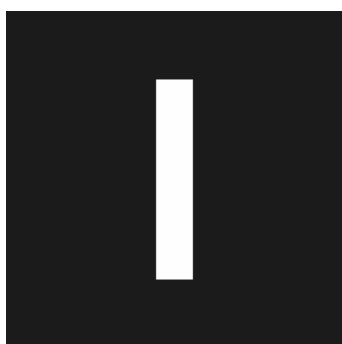
$$F(0,0) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y)$$

όπου M,N οι διαστάσεις του μετασχηματισμού. Η τιμή αυτή αποτελεί τη μέση τιμή της αρχικής συνάρτησης  $f(x, y)$ . Απλούστερα, αν  $f(x, y)$  είναι μία εικόνα, το μέτρο του φασματικού πλάτους στην αρχή των αξόνων ισούται με τη μέση τιμή των τιμών φωτεινότητας της εικόνας. Επειδή και οι δύο συχνότητες είναι μηδέν στο σημείο αυτό, το  $F(0,0)$  συχνά καλείται dc component του φάσματος.

Εντούτοις, από το μετασχηματισμό Fourier μιας εικόνας μπορούμε να αντλήσουμε και άλλα συμπεράσματα, όπως για παράδειγμα για τον προσανατολισμό των χωρικών συχνοτήτων. Το τελευταίο γίνεται αντιληπτό τα παραδείγματα που παρατίθενται πιο κάτω .

### Παράδειγμα 1:

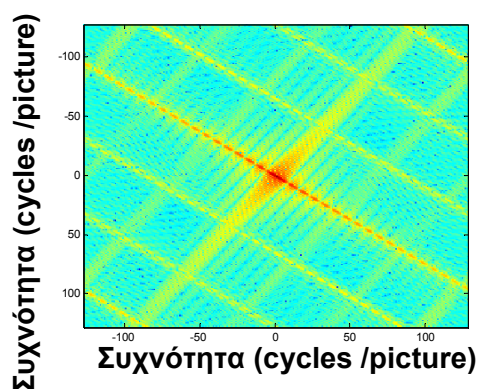
Ας εξετάσουμε την μορφή του DFT μιας απλής εικόνας που αποτελείται μόνο από δυο τιμές φωτεινότητας και έχει κάθετο προσανατολισμό.



**Σχ.9: Κάθετα προσανατολισμένη εικόνα (αριστερά) και ο DFT (δεξιά)**

Από το σχήμα παρατηρούμε ότι οι υψηλές οριζόντιες συχνότητες έχουν περισσότερη ενέργεια από ότι οι υψηλές κάθετες. Αυτό είναι αναμενόμενο, μιας και παρατηρώντας την εικόνα βλέπουμε ότι στην οριζόντια διεύθυνση υπάρχουν περισσότερες εναλλαγές φωτεινότητας από ότι στην κάθετη. Και ο προσανατολισμός της ενέργειας είναι στην κάθετη και οριζόντια διεύθυνση.

Έστω τώρα η παραπάνω εικόνα, προσανατολισμένη λοξά ως προς την κάθετη διεύθυνση.

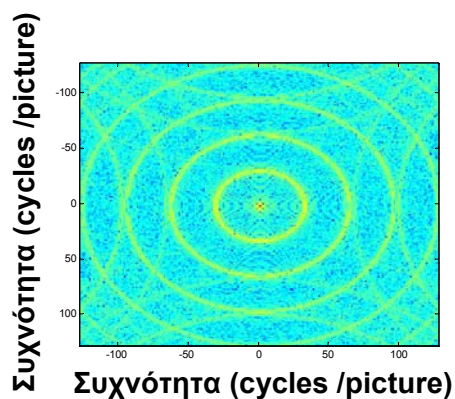
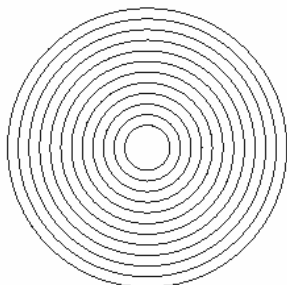


Σχ.10: Λοξά προσανατολισμένη εικόνα και ο DFT

Βλέπουμε τώρα ότι, όσον αφορά την κατανομή ενέργειας, περισσότερη ενέργεια βρίσκεται σε λοξούς προσανατολισμούς από ότι σε κάθετους ή οριζόντιους.

Παράδειγμα 2:

Έστω τώρα η παρακάτω εικόνα που δεν μπορεί να θεωρηθεί προσανατολισμένη.



Σχ.11: Μη προσανατολισμένη εικόνα

Ο DFT της εικόνας μας δείχνει ότι η ενέργεια κατανέμεται σχεδόν ισόποσα σε όλους τους προσανατολισμούς.

Συνοψίζοντας λοιπόν από τα δυο παραδείγματα, μια ακόμα δυνατότητα που δίνει ο DFT είναι να γνωρίζουμε πως προσανατολίζονται οι χωρικές συχνότητες στην εικόνα μας.

#### **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4**

##### **Κώδικες Matlab**

**1α. Ρουτίνα που γραμμικοποιεί τις εικόνες με τις παραμέτρους της κάμερας μας (Aphrodite)**

```
function Dummypic = rgb2linear(orig_pic, IT);

Dummypic = zeros(size(orig_pic));

params= [0.79691 1.01024 0.8000 1.24383 1.01023949 1 1.34526
         1.01024 0.95101771]; %Aphrodite

A = [params(1) params(4) params(7)];
b = params(5);
C = [params(3) params(6) params(9)];

for k=1:3 % Do each layer in turn
    Dummypic(:,:,k) = (A(k)*(b.^orig_pic(:,:,k)-C(k)))./IT;
end %k
```

**1β. Ρουτίνα που καλεί την παραπάνω συνάρτηση, αυξάνει το bit-depth των εικόνων από 8 σε 16 και τις μετατρέπει σε grayscale**

```
I = imread('orig_pic');
I = double(I);
%Image linearization
pic_linear = rgb2linear(I, IT);
% bit-depth increment
pic = uint16(pic_linear.*257);
%Conversion from RGB to grayscale
pic1 = rgb2gray(pic);
imwrite(pic1,'Linear_16bit_gray');
```

**2α. Ρουτίνα που σχεδιάζει ένα εκ περιστροφής σιγμοειδές φίλτρο (windowing function)**

```
function [H] = hammwindow(M) %Generates a Hamming window (M=image
dimension)
% Create the 1-dimentional window
x = [0: M-1];
hamm1d = 0.5*(1 + cos(2*pi*x/M));
% Copy rows to a matrix
H = zeros(M, M);
for i = 1:M
    H(i, :) = hamm1d;
end
% Transpose matrix
HT = H';
% Multiply matrix by the transposed
H = H.*HT;
% Normalise matrix values
H = H/max(H(:));
% Center the filter
H = fftshift(H);
```

**2β. Ρουτίνα που πολίζει την εικόνα με το παραπάνω φίλτρο και υπολογίζει τη μέση τιμή του φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό, αθροιζόμενο για όλες τις χωρικές συχνότητες.**

```
%Need to call function hammwindow.m
%angle of rotation
degstep = 5;
%number of rotations
rotations = (180/degstep)+1;
AmplOrient = zeros(rotations,34);
%Image reading
for i = 1: 17,
    j = int2str(i);
    imagename = ['orig_pic ',j,' gray(16 bit).tif'];
    I = imread(imagename);
```



```

[m,n] = size(I);
I = double(I);
%Profile Construction and multiplication with the image
[prof] = hammwindow(m);
I= I.*prof;
%Amplitude spectra of the image and subtraction of DC component
ImageFFT = fft2(I);
ImageFFT(1,1) = 0;
pic = fftshift(ImageFFT);
FFTAmpI = abs(pic);
%Calculation of mask array dimension
dim1 = (m/2)-0.5;
%Mask construction
[x1,y1] = meshgrid(-dim1:dim1);
z = sqrt((x1.^2)+(y1.^2));
mask =(z<=dim1);
%Out of the mask image values nullification
tAmplspectrum = FFTAmpI.* mask;
Amplspectrum = zeros(m+1,n+1);
for k=2:512
    for p=2:512
        Amplspectrum(k,p)=tAmplspectrum(k,p);
    end
end
%Calculation of mean amplitude/orientation
AmplOrient(1,2*i-1) = 0;
AmplOrient(1,2*i) = log(mean(Amplspectrum(256,:)));
for k=2:rotations
    step =(k-1)*degstep;
    temp = imrotate(Amplspectrum,step,'bilinear','crop');
    AmplOrient(k,2*i-1) = step;
    AmplOrient(k,2*i) = log(mean(temp(256,:)));
end
end%i
%Results recording in excel file
xlswrite('Filename.xls',AmplOrient,'Sheet_Name','Cell_name');

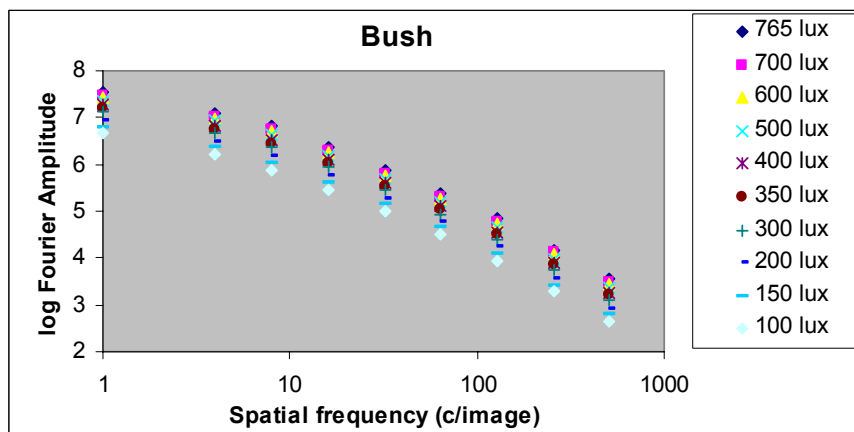
```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5

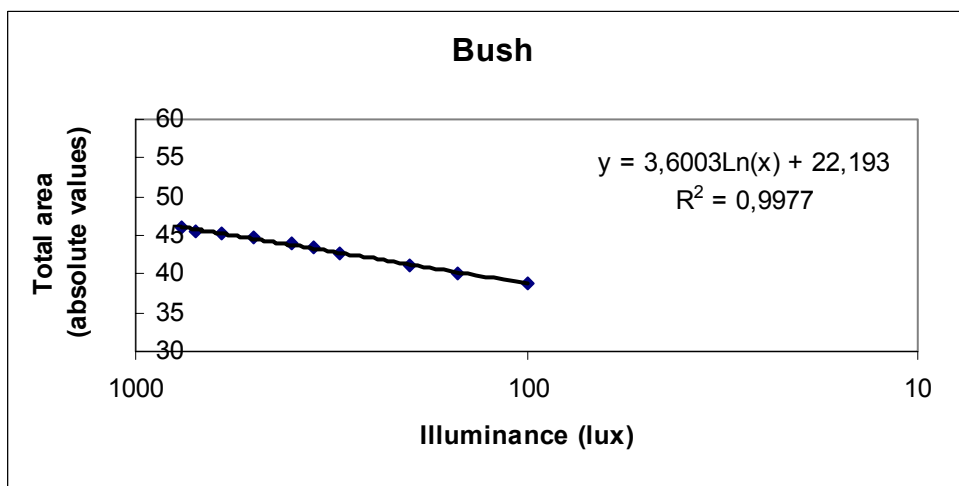
### Αποτελέσματα επεξεργασίας εικόνων

Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία κάθε εικόνας ξεχωριστά. Στα γραφήματα που παρουσιάζονται απεικονίζεται το φασματικό πλάτος των εικόνων σε μειούμενο φωτισμό, τόσο ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας όσο και ανά προσανατολισμό.

#### 1. Εικόνες Bush



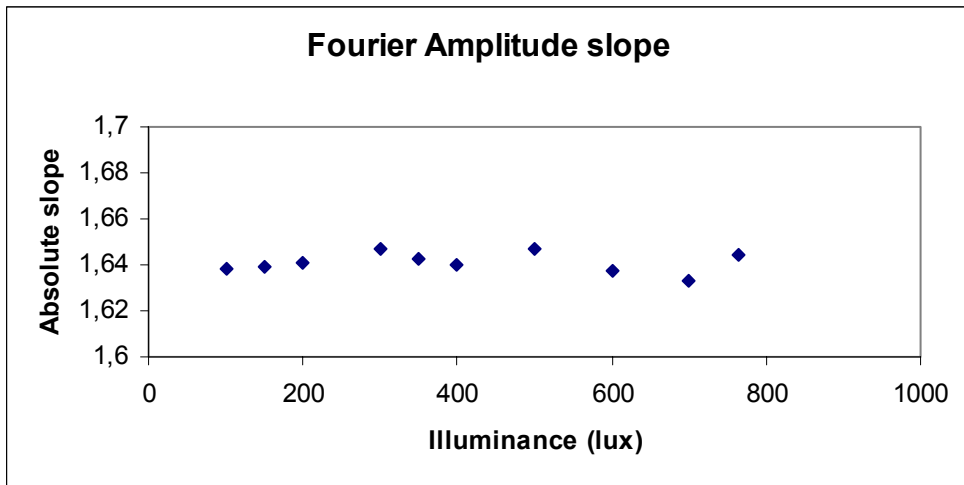
Σχ.1.1: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. Στο δεξιό μέρος του γραφήματος απεικονίζονται οι τιμές του περιβαλλοντικού φωτισμού σε lux. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα)



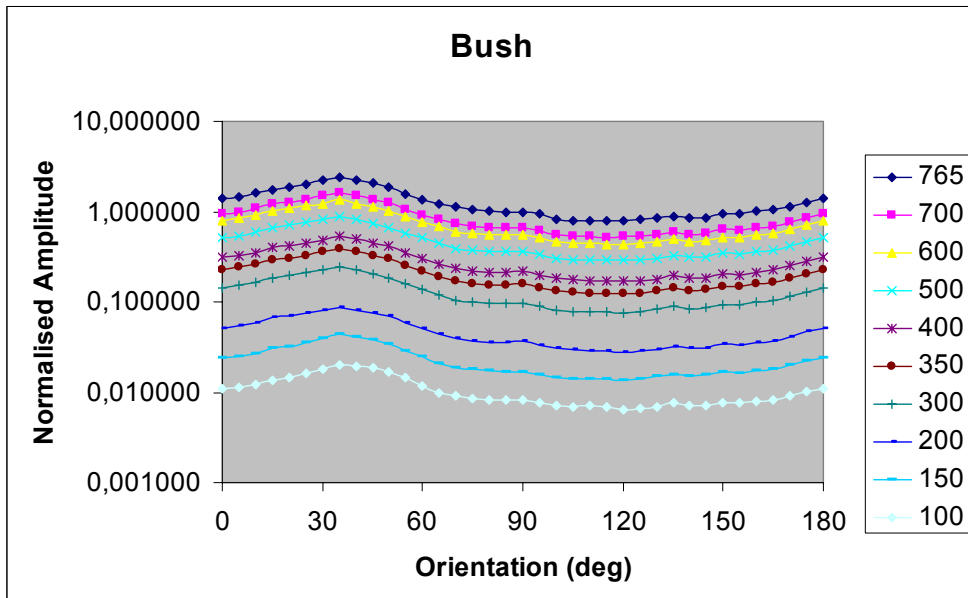
Σχ.1.2: Εμβαδό, συνολικά για όλες τις χωρικές συχνότητες, που περικλείεται από τις καμπύλες κατανομής του φασματικού πλάτους ανά οκτάβα συναρτήσει του φωτισμού. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).

Πιν.1: Τιμές κλίσης  $\alpha$  ανά φωτισμό λήψης

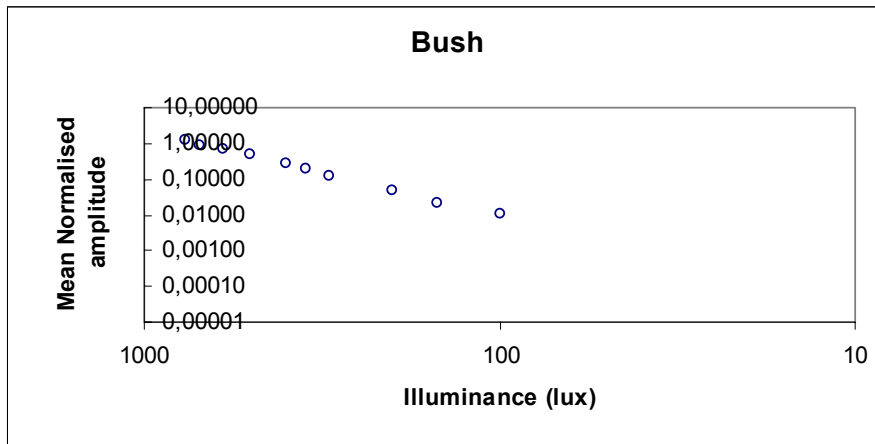
Φωτισμός (lux)	Slope $\alpha$
765	1,6444
700	1,6332
600	1,6377
500	1,6469
400	1,6402
350	1,6422
300	1,6468
200	1,6407
150	1,6389
100	1,638



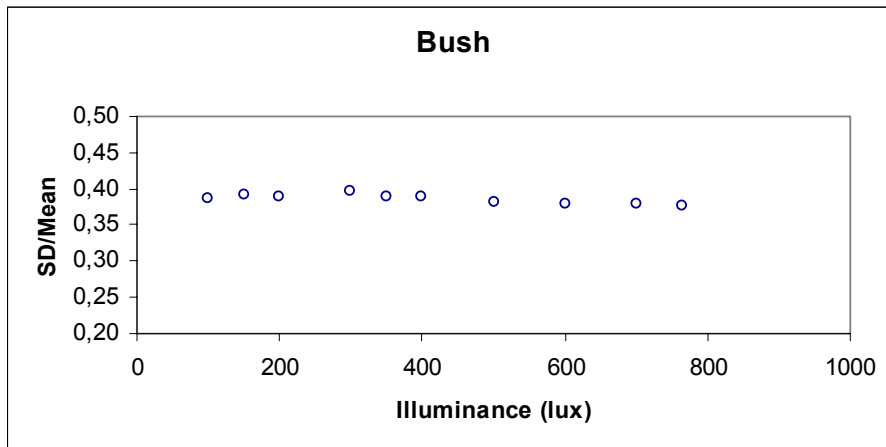
Σχ.1.3: Μεταβολή της κλίσης του φασματικού πλάτους σε σχέση με τον φωτισμό.



Σχ.1.4: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν κανονικοποιημένες τιμές. Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα.)

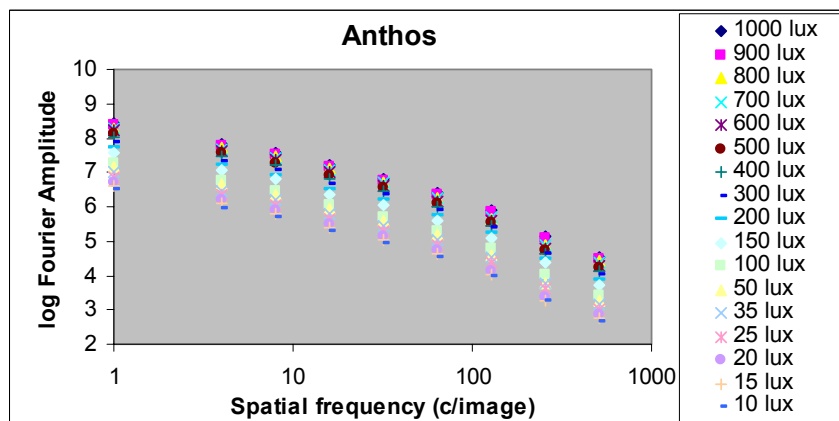


Σχ.1.5: Μείωση της τιμής του πλάτους συναρτήσει της μείωσης του φωτισμού. Οι μέσες τιμές του πλάτους προέκυψαν από τις κανονικοποιημένες τιμές αυτού.

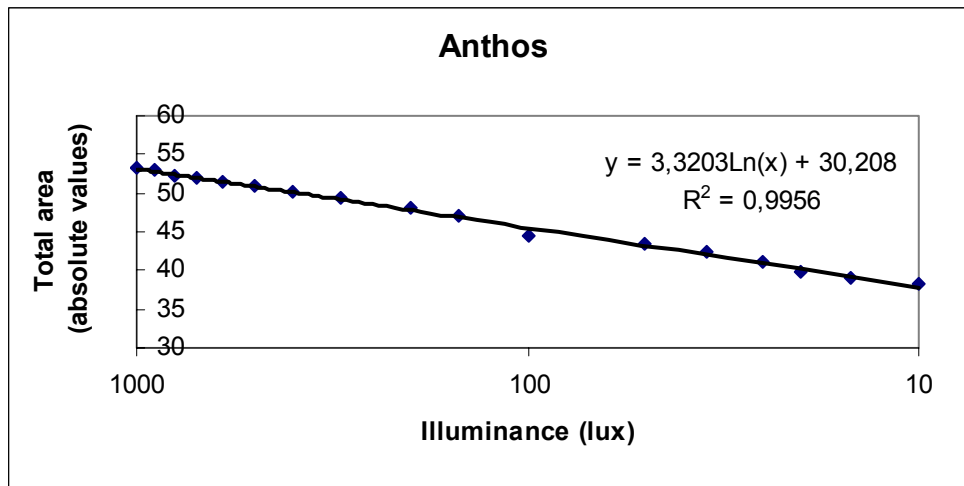


Σχ.1.6: Λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους ανά προσανατολισμό σε σχέση με την μείωση του φωτισμού.

## 2. Εικόνες Anthos



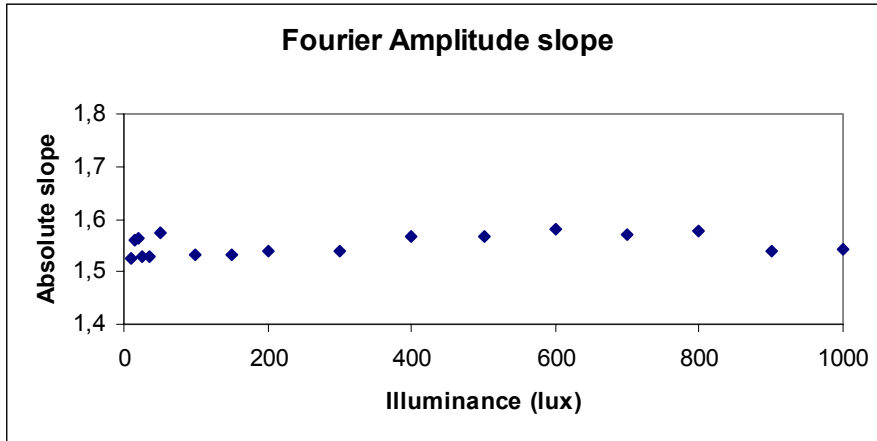
Σχ.2.1: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. Στο δεξιό μέρος του γραφήματος απεικονίζονται οι τιμές του περιβαλλοντικού φωτισμού σε lux. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα)



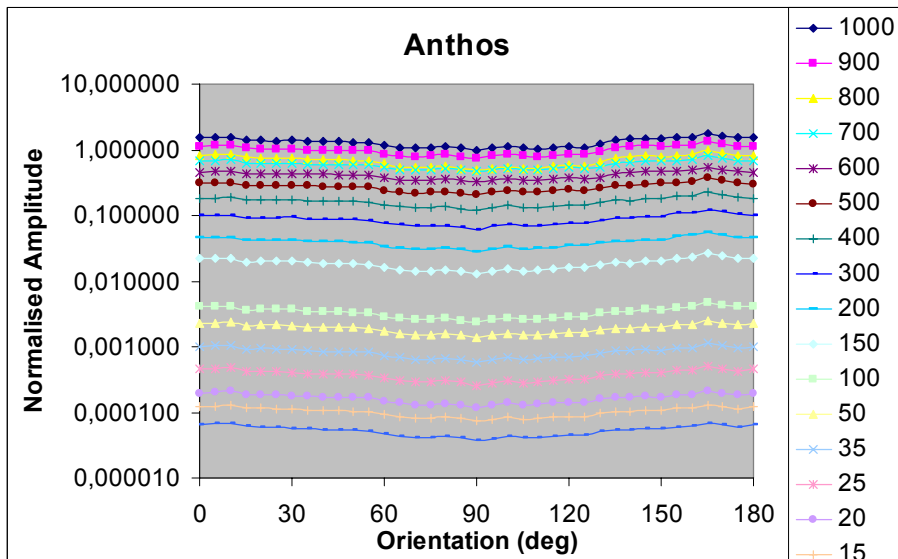
Σχ.2.2: Εμβαδό, συνολικά για όλες τις χωρικές συχνότητες, που περικλείεται από τις καμπύλες κατανομής του φασματικού πλάτους ανά οκτάβα συναρτήσεως του φωτισμού. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).

Πιν.2: Τιμές κλίσης a ανά φωτισμό λήψης

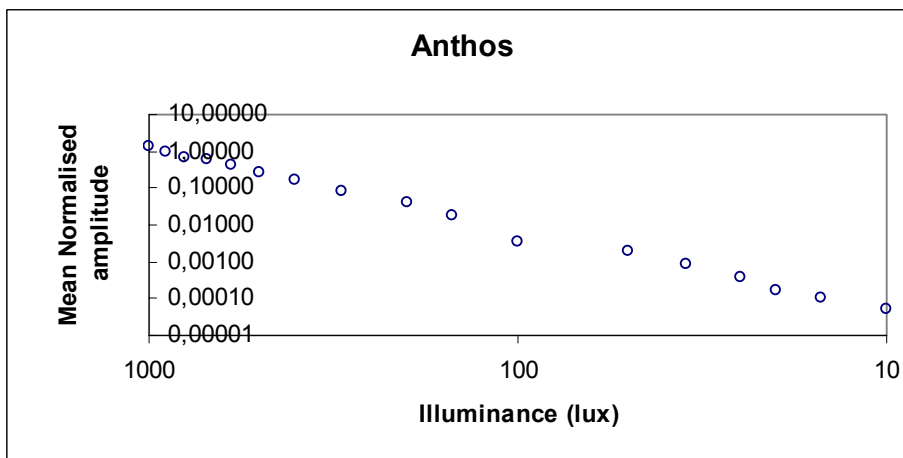
Φωτισμός (lux)	Slope a
1000	1,5411
900	1,5392
800	1,5785
700	1,5691
600	1,5807
500	1,5674
400	1,5685
300	1,5396
200	1,5383
150	1,5308
100	1,5327
50	1,5726
35	1,5293
25	1,5271
20	1,5633
15	1,5617
10	1,5236



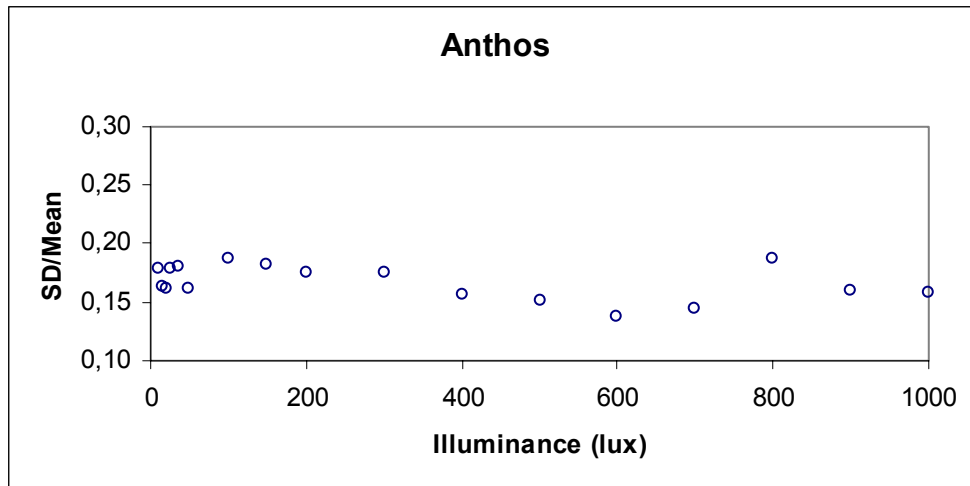
Σχ.2.3: Μεταβολή της κλίσης του φασματικού πλάτους σε σχέση με τον φωτισμό (Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).



Σχ.2.4: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν κανονικοποιημένες τιμές. Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα.).

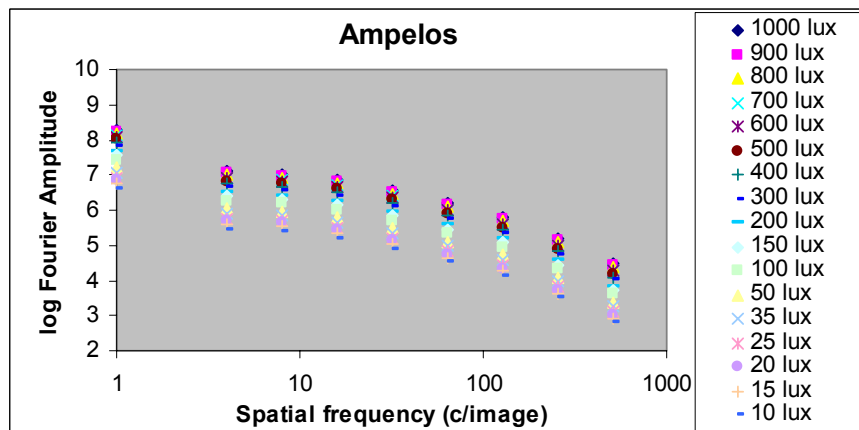


Σχ.2.5: Μείωση της τιμής του πλάτους συναρτήσει της μείωσης του φωτισμού. Οι μέσες τιμές του πλάτους προέκυψαν από τις κανονικοποιημένες τιμές αυτού.

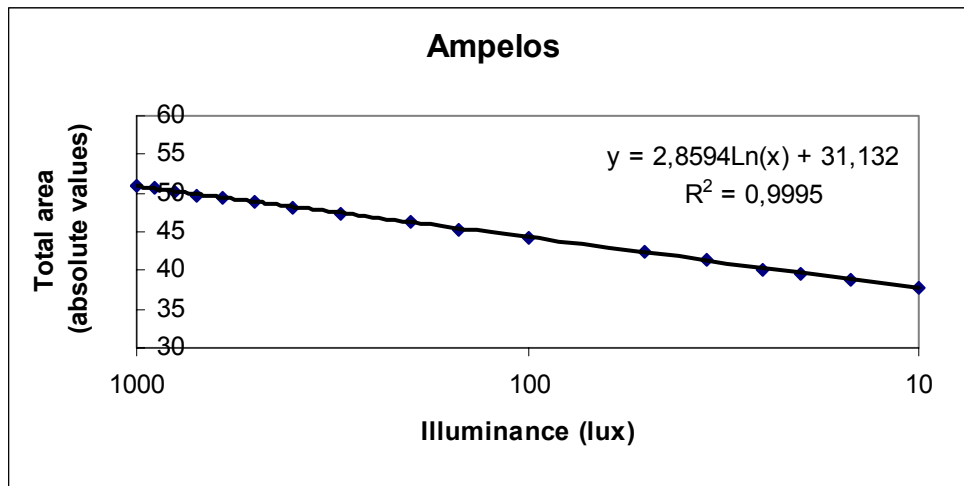


Σχ.2.6: Λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους ανά προσανατολισμό σε σχέση με την μείωση του φωτισμού.

### 3. Εικόνες Ampelos



Σχ.3.1: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. Στο δεξιό μέρος του γραφήματος απεικονίζονται οι τιμές του περιβαλλοντικού φωτισμού σε lux. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα)

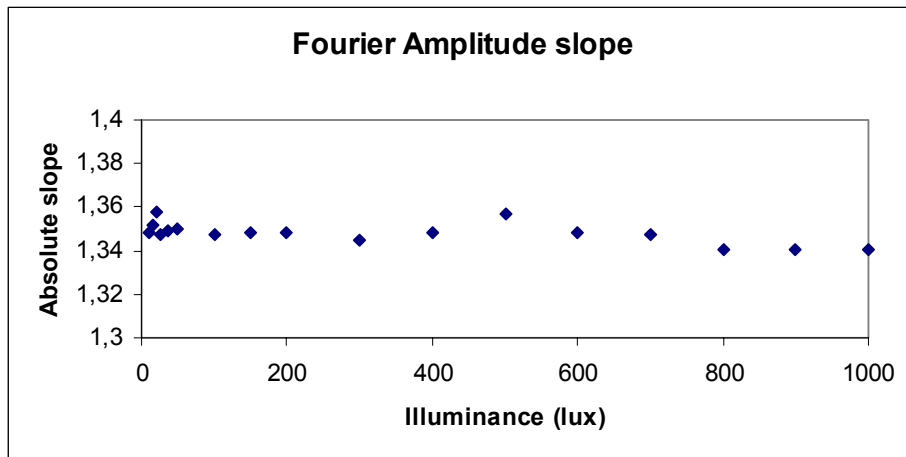


Σχ.3.2: Εμβαδό, συνολικά για όλες τις χωρικές συχνότητες, που περικλείεται από τις καμπύλες κατανομής του φασματικού πλάτους ανά οκτάβα συναρτήσεως του φωτισμού. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).

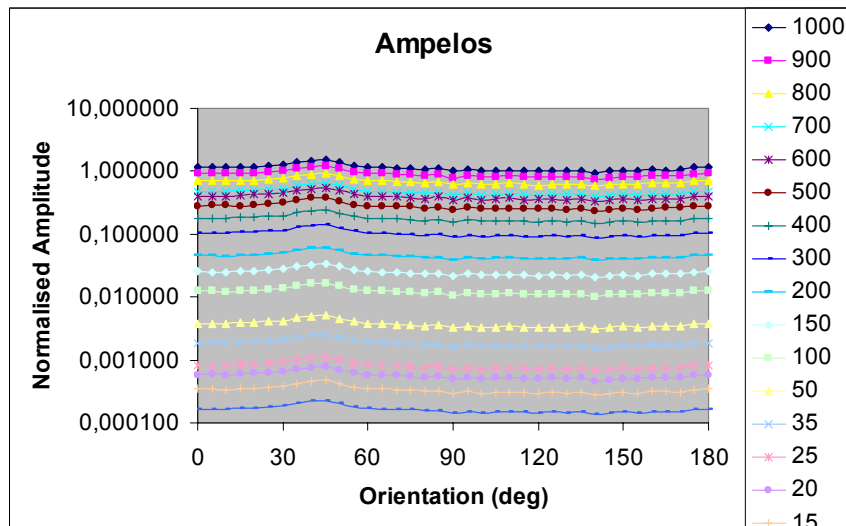
Πιν.3: Τιμές κλίσης  $a$  ανά φωτισμό λήψης

Φωτισμός (lux)	Slope $a$
1000	1,3402
900	1,3406
800	1,3406
700	1,3475
600	1,3485
500	1,3566
400	1,3481
300	1,3449
200	1,3484
150	1,3479
100	1,3476
50	1,3496
35	1,3494
25	1,3475
20	1,3576
15	1,3513
10	1,3481

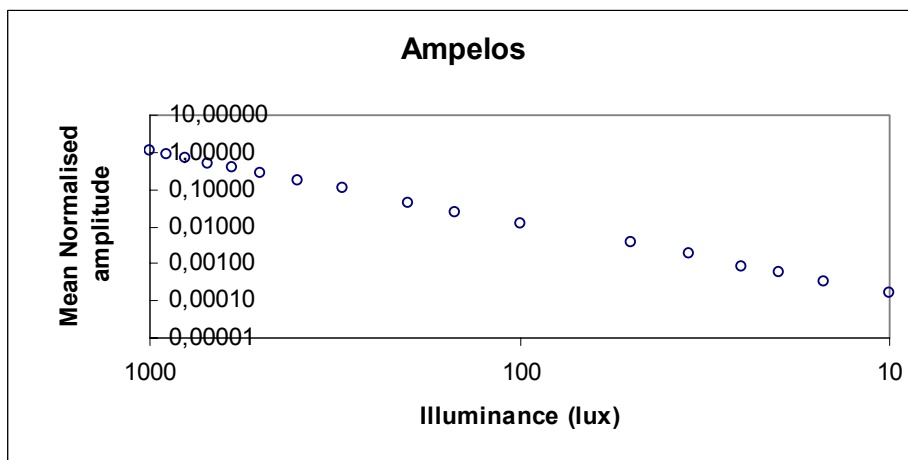




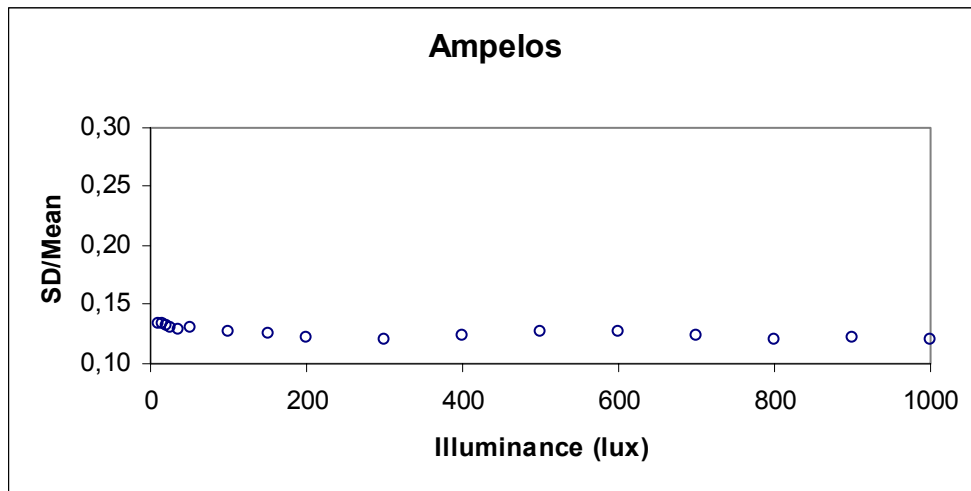
Σχ.3.3: Μεταβολή της κλίσης του φασματικού πλάτους σε σχέση με τον φωτισμό (Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).



Σχ.3.4: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν κανονικοποιημένες τιμές. Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα.).

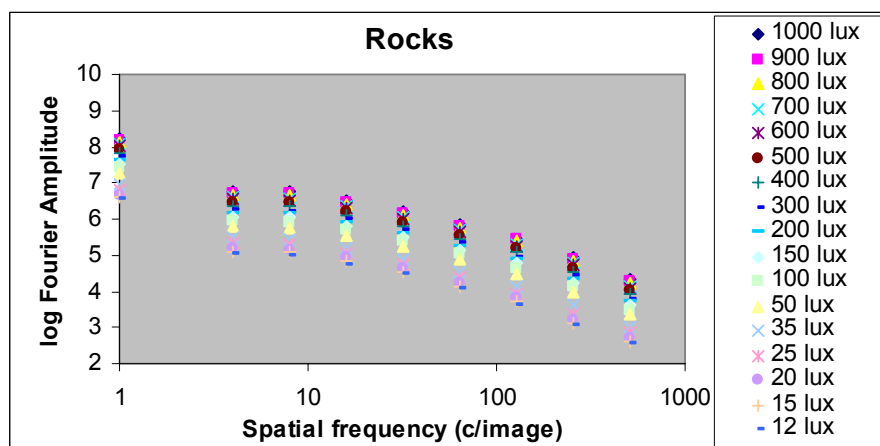


Σχ.3.5: Μείωση της τιμής του πλάτους συναρτήσει της μείωσης του φωτισμού. Οι μέσες τιμές του πλάτους προέκυψαν από τις κανονικοποιημένες τιμές αυτού.

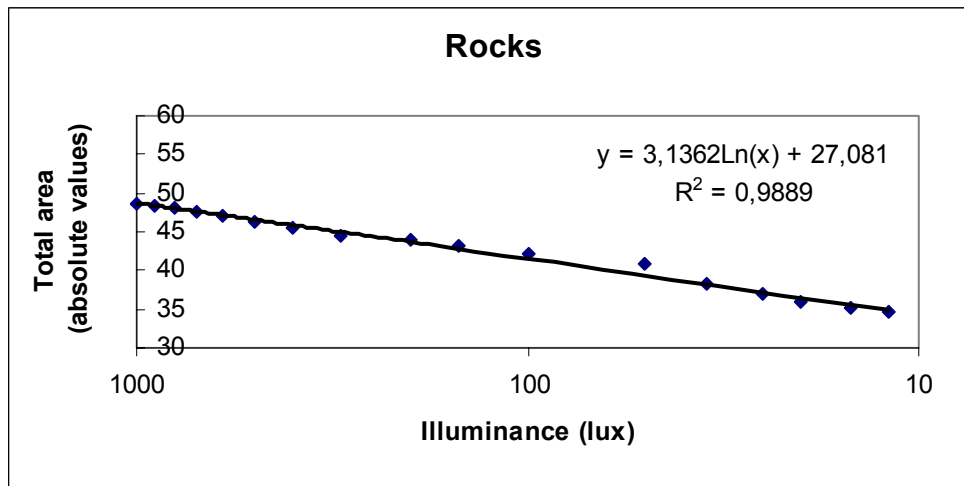


Σχ.3.6: Λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους ανά προσανατολισμό σε σχέση με την μείωση του φωτισμού.

#### 4. Εικόνες Rocks



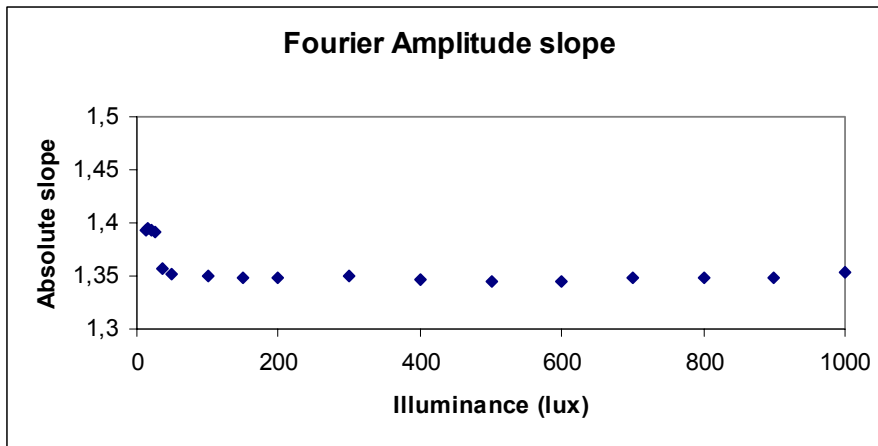
Σχ.4.1: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. Στο δεξιό μέρος του γραφήματος απεικονίζονται οι τιμές του περιβαλλοντικού φωτισμού σε lux. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα)



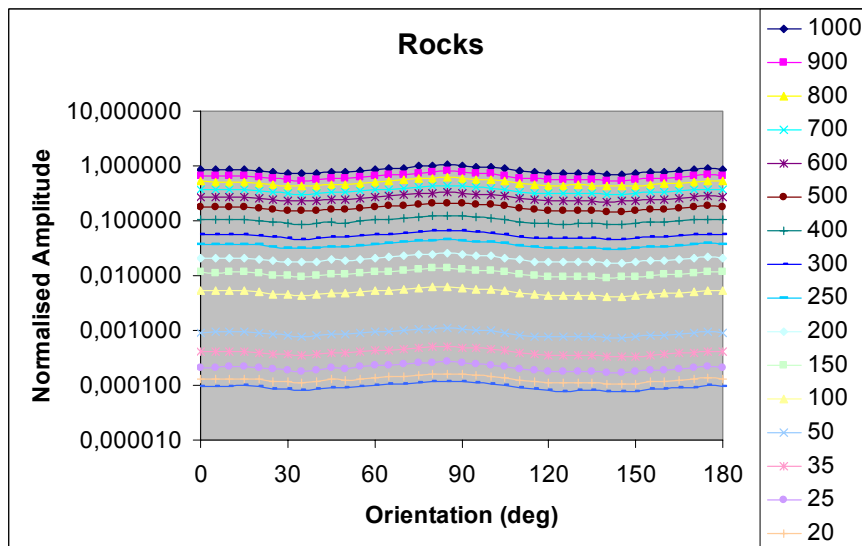
Σχ.4.2: Εμβαδό, συνολικά για όλες τις χωρικές συχνότητες, που περικλείεται από τις καμπύλες κατανομής του φασματικού πλάτους ανά οκτάβα συναρτήσεως του φωτισμού. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).

Πιν.4: Τιμές κλίσης  $a$  ανά φωτισμό λήψης

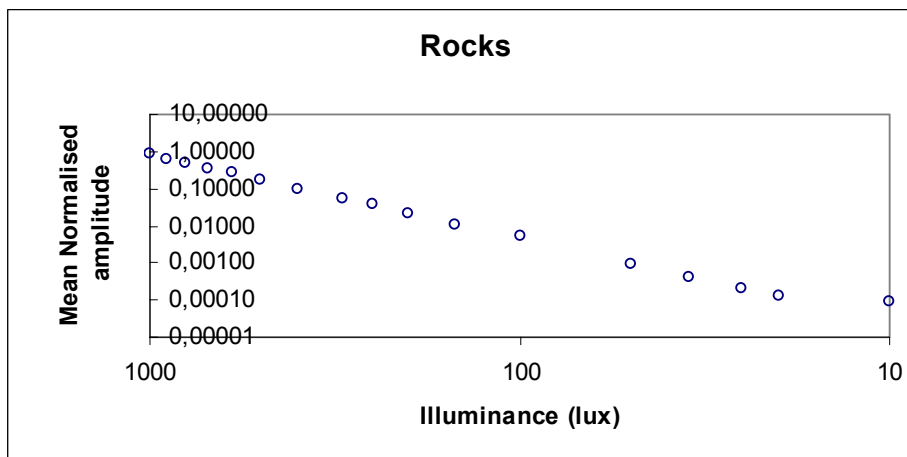
Φωτισμός (lux)	Slope $a$
1000	1,3539
900	1,3478
800	1,3486
700	1,3477
600	1,3448
500	1,3453
400	1,3465
300	1,3499
200	1,3487
150	1,3478
100	1,3498
50	1,3509
35	1,3565
25	1,3907
20	1,3931
15	1,394
12	1,3925



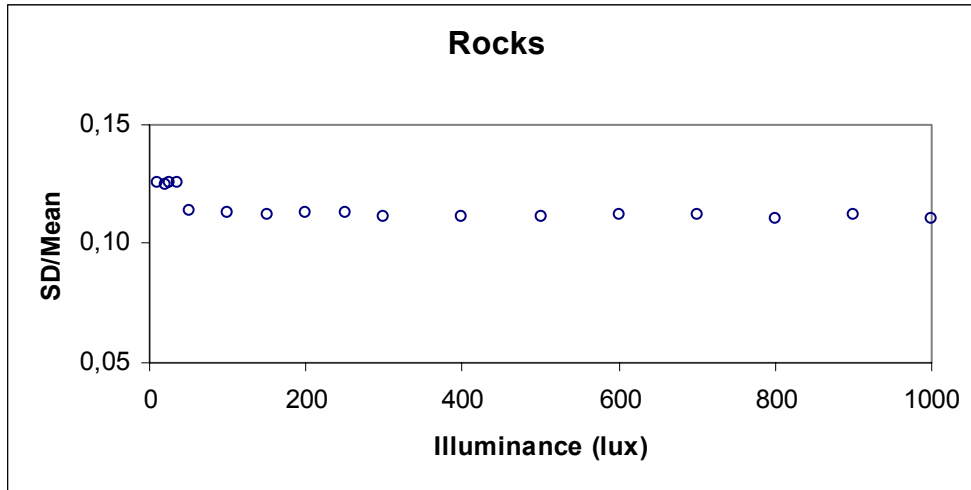
Σχ.4.3: Μεταβολή της κλίσης του φασματικού πλάτους σε σχέση με τον φωτισμό (Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).



Σχ.4.4: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν κανονικοποιημένες τιμές. Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα.).

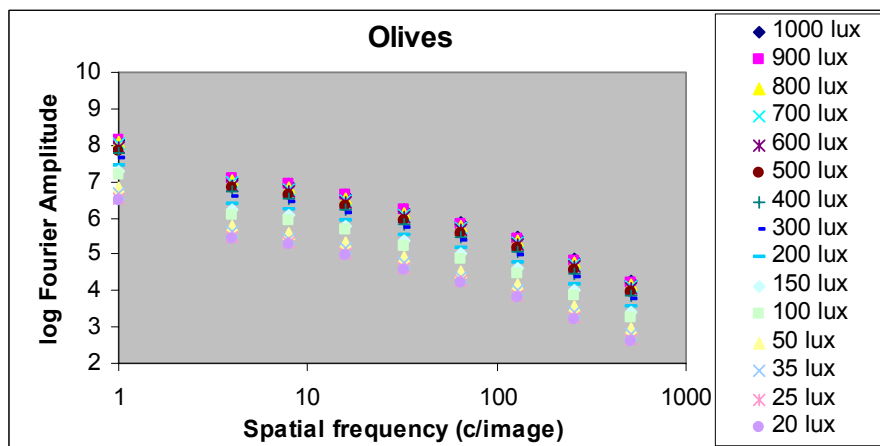


Σχ.4.5: Μείωση της τιμής του πλάτους συναρτήσει της μείωσης του φωτισμού. Οι μέσες τιμές του πλάτους προέκυψαν από τις κανονικοποιημένες τιμές αυτού.

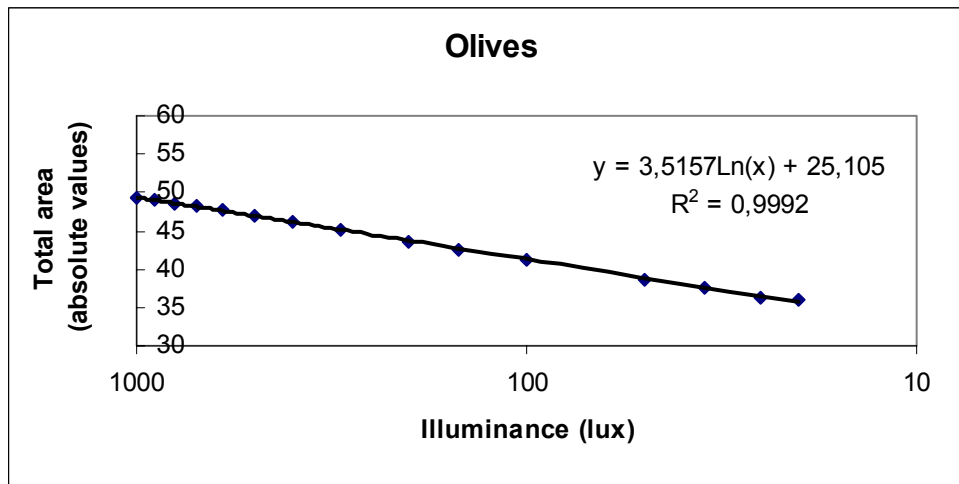


Σχ.4.6: Λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους ανά προσανατολισμό σε σχέση με την μείωση του φωτισμού.

### 5. Εικόνες Olives



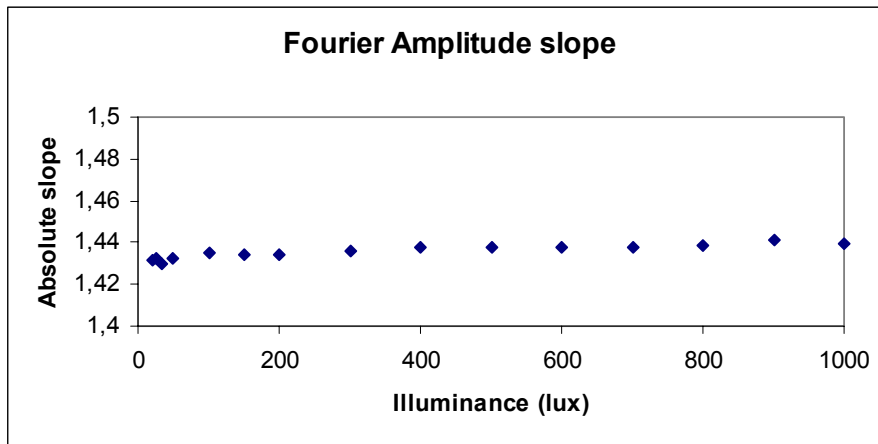
Σχ.5.1: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. Στο δεξιό μέρος του γραφήματος απεικονίζονται οι τιμές του περιβαλλοντικού φωτισμού σε lux. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα)



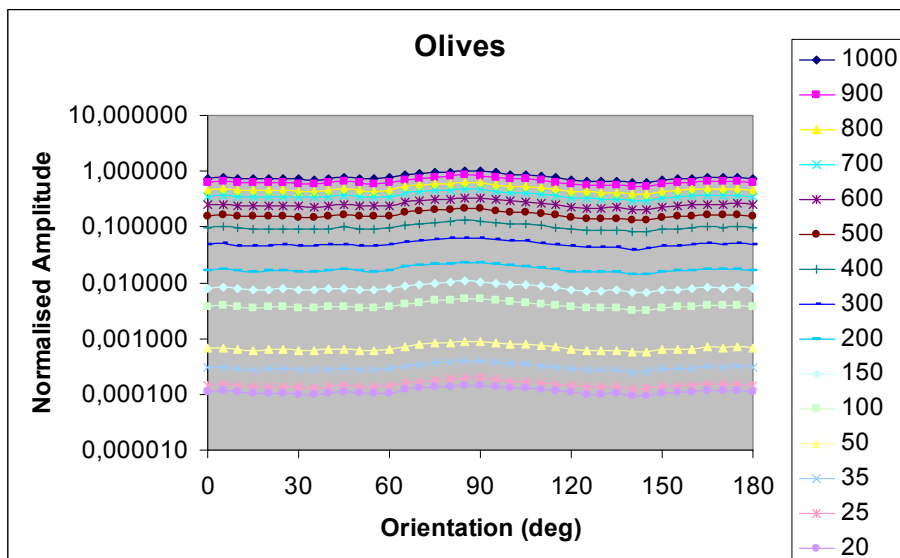
Σχ.5.2: Εμβαδό, συνολικά για όλες τις χωρικές συχνότητες, που περικλείεται από τις καμπύλες κατανομής του φασματικού πλάτους ανά οκτάβα συναρτήσει του φωτισμού. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).

Πιν.5: Τιμές κλίσης α ανά φωτισμό λήψης

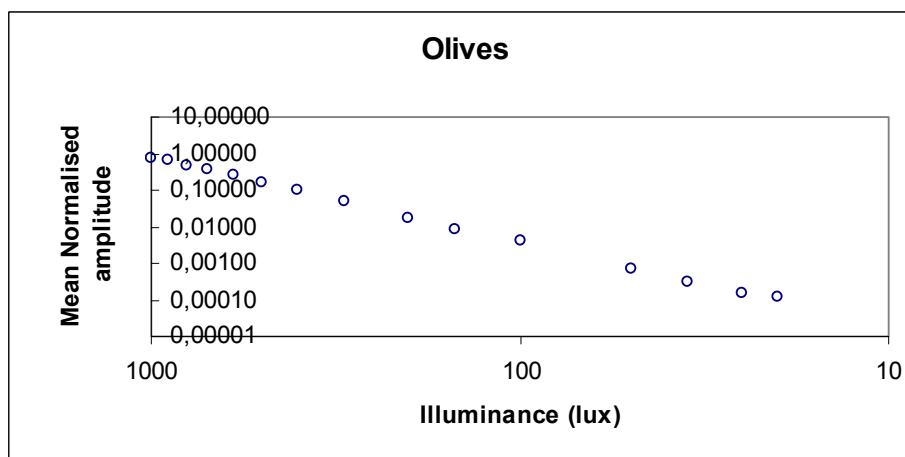
Φωτισμός (lux)	Slope α
1000	1,4393
900	1,4415
800	1,4386
700	1,4373
600	1,4379
500	1,4377
400	1,4374
300	1,4364
200	1,4342
150	1,4339
100	1,4348
50	1,4323
35	1,43
25	1,4322
20	1,4313



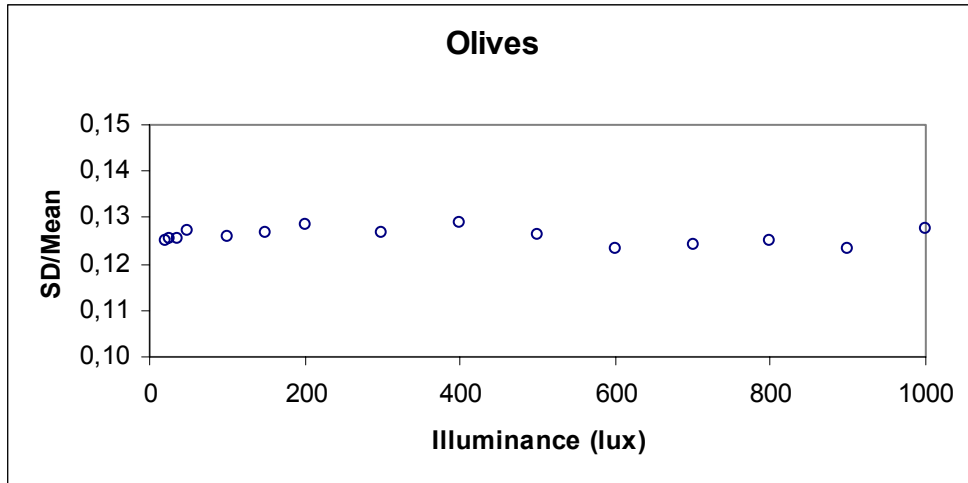
Σχ.5.3: Μεταβολή της κλίσης του φασματικού πλάτους σε σχέση με τον φωτισμό (Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).



Σχ.5.4: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν κανονικοποιημένες τιμές. Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα.).

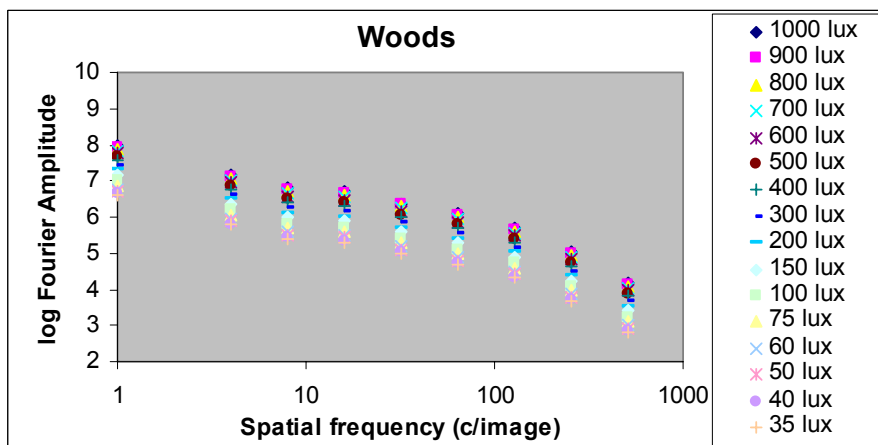


Σχ.5.5: Μείωση της τιμής του πλάτους συναρτήσει της μείωσης του φωτισμού. Οι μέσες τιμές του πλάτους προέκυψαν από τις κανονικοποιημένες τιμές αυτού.



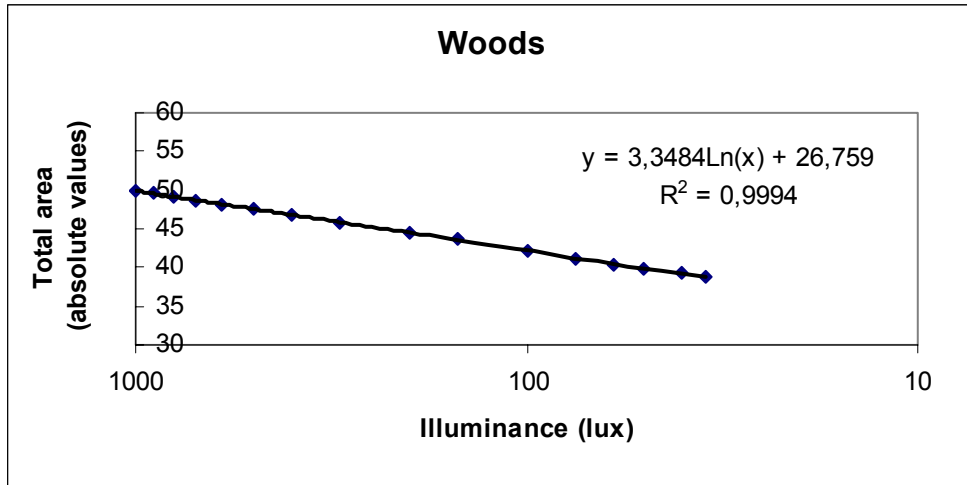
Σχ.5.6: Λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους ανά προσανατολισμό σε σχέση με την μείωση του φωτισμού.

## 6. Εικόνες Woods



Σχ.6.1: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. Στο δεξιό μέρος του γραφήματος απεικονίζονται οι τιμές του περιβαλλοντικού φωτισμού σε lux. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα)

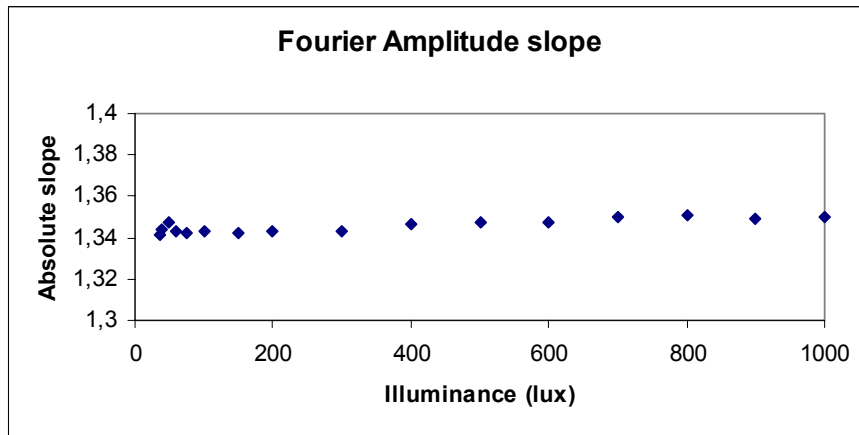




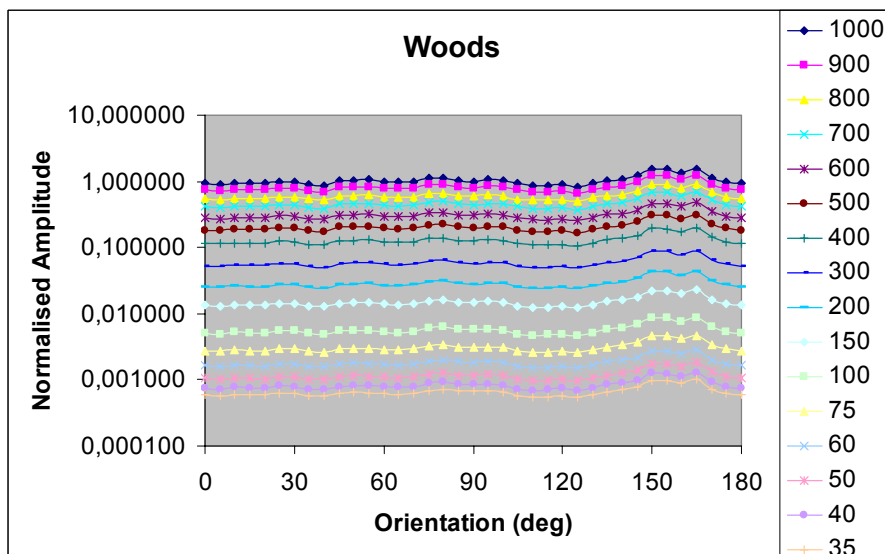
Σχ.6.2: Εμβαδό, συνολικά για όλες τις χωρικές συχνότητες, που περικλείεται από τις καμπύλες κατανομής του φασματικού πλάτους ανά οκτάβα συναρτήσεως του φωτισμού. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).

Πιν.6: Τιμές κλίσης  $a$  ανά φωτισμό λήψης

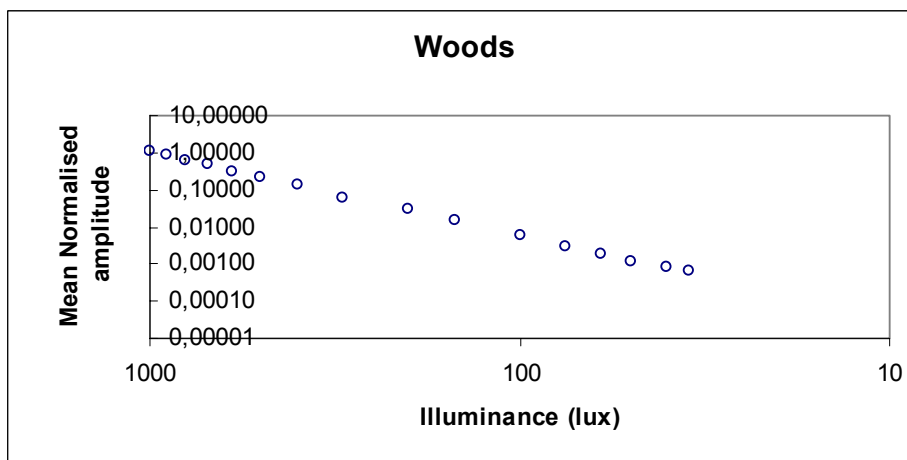
Φωτισμός (lux)	Slope $a$
1000	1,3497
900	1,3488
800	1,3512
700	1,3496
600	1,3476
500	1,347
400	1,3462
300	1,3435
200	1,343
150	1,3425
100	1,3432
75	1,3419
60	1,3433
50	1,3478
40	1,3442
35	1,3417



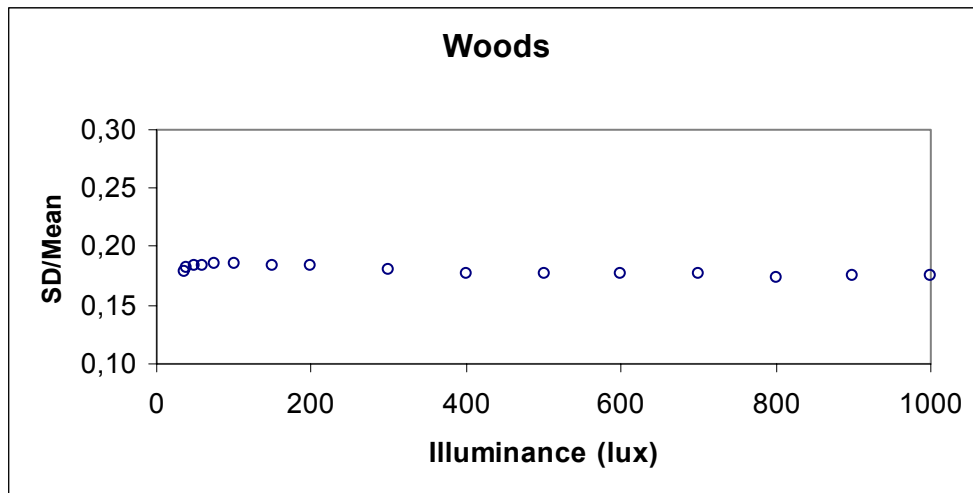
Σχ.6.3: Μεταβολή της κλίσης του φασματικού πλάτους σε σχέση με τον φωτισμό (Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).



Σχ.6.4: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν κανονικοποιημένες τιμές. Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα.).

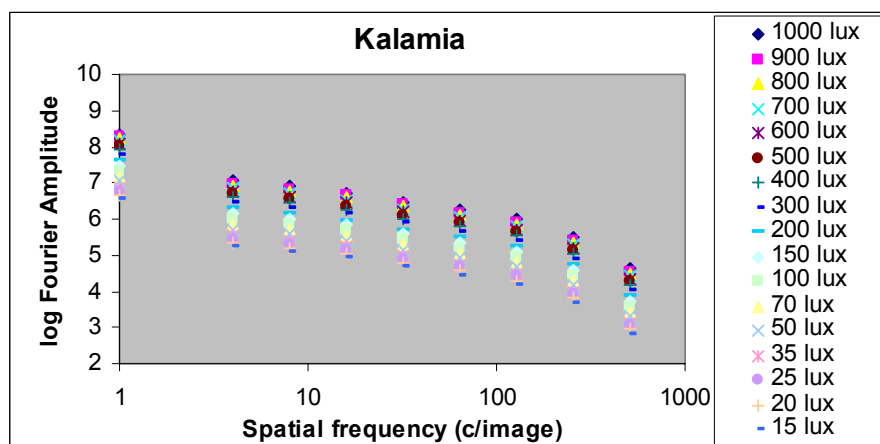


Σχ.6.5: Μείωση της τιμής του πλάτους συναρτήσει της μείωσης του φωτισμού. Οι μέσες τιμές του πλάτους προέκυψαν από τις κανονικοποιημένες τιμές αυτού.

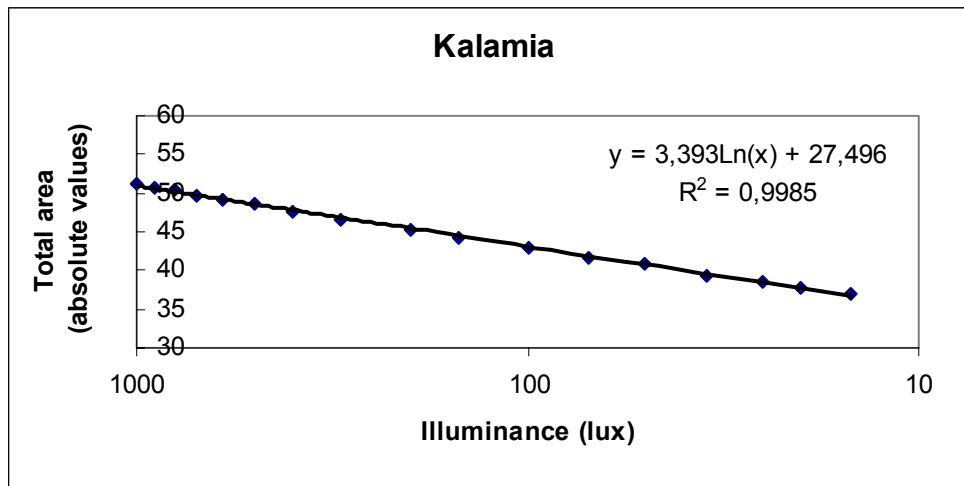


Σχ.6.6: Λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους ανά προσανατολισμό σε σχέση με την μείωση του φωτισμού.

## 7. Εικόνες Kalamia



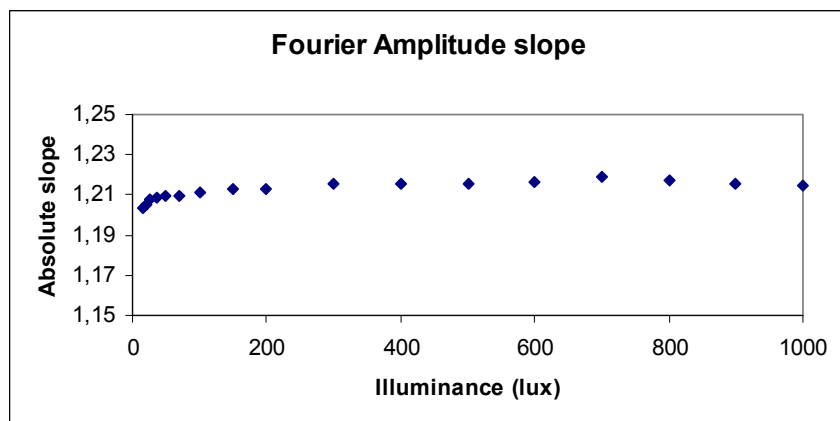
Σχ.7.1: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. Στο δεξιό μέρος του γραφήματος απεικονίζονται οι τιμές του περιβαλλοντικού φωτισμού σε lux. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα)



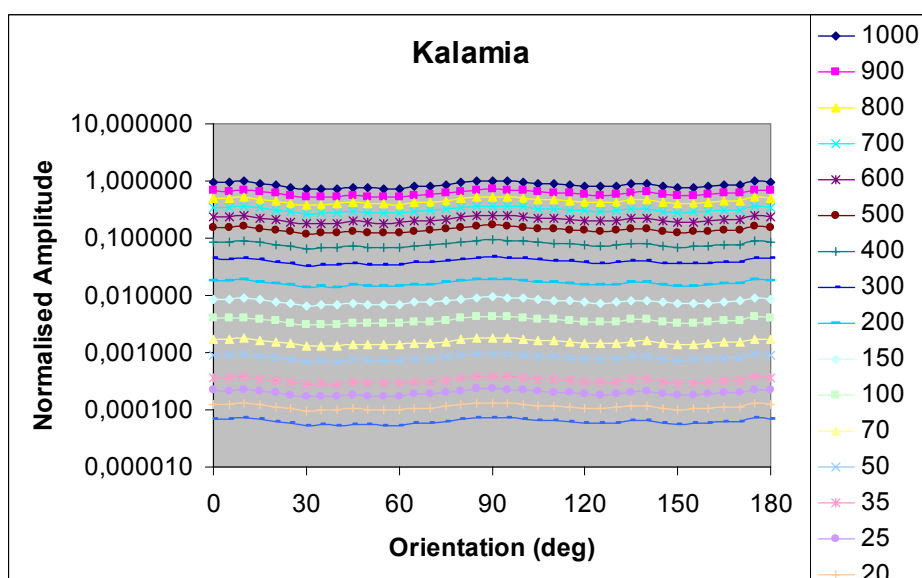
Σχ.7.2: Εμβαδό, συνολικά για όλες τις χωρικές συχνότητες, που περικλείεται από τις καμπύλες κατανομής του φασματικού πλάτους ανά οκτάβα συναρτήσει του φωτισμού. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).

Πιν.7: Τιμές κλίσης a ανά φωτισμό λήψης

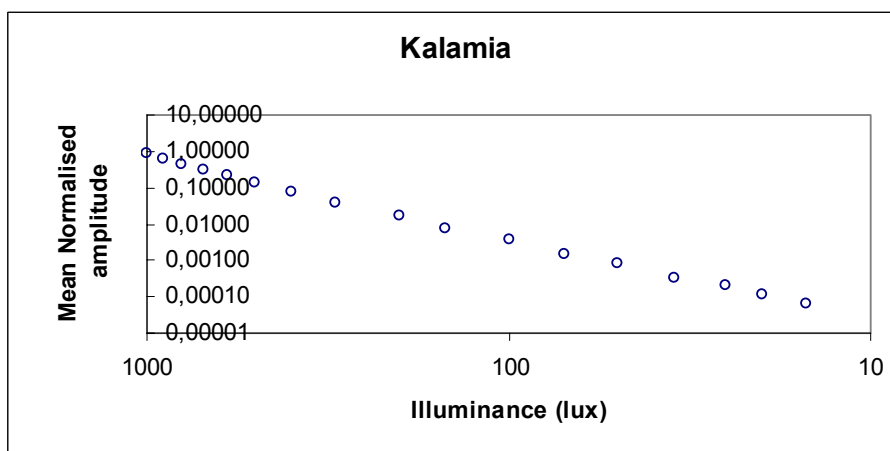
Φωτισμός (lux)	Slope a
1000	1,2147
900	1,2159
800	1,2175
700	1,2191
600	1,2166
500	1,2156
400	1,2152
300	1,2158
200	1,2133
150	1,2127
100	1,211
70	1,2092
50	1,2092
35	1,2082
25	1,2075
20	1,2048
15	1,2038



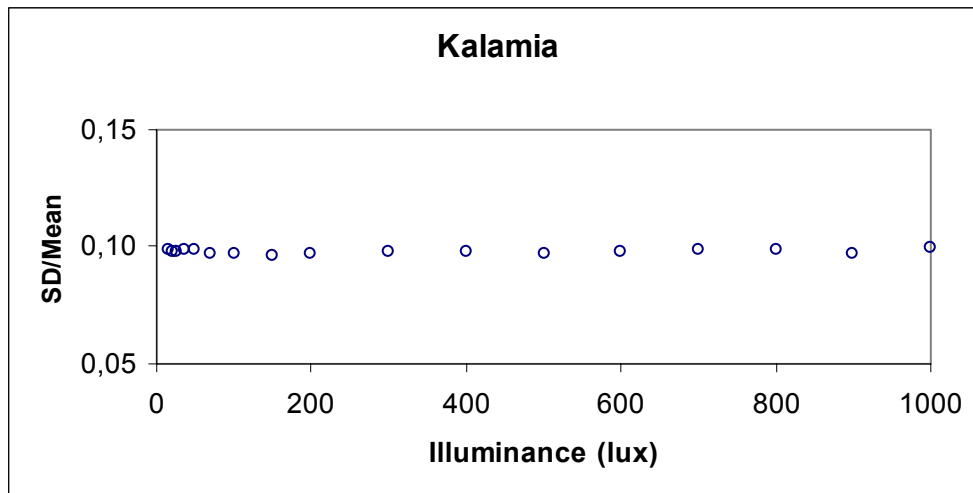
Σχ.7.3: Μεταβολή της κλίσης του φασματικού πλάτους σε σχέση με τον φωτισμό (Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).



Σχ.7.4: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν κανονικοποιημένες τιμές. Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα.).

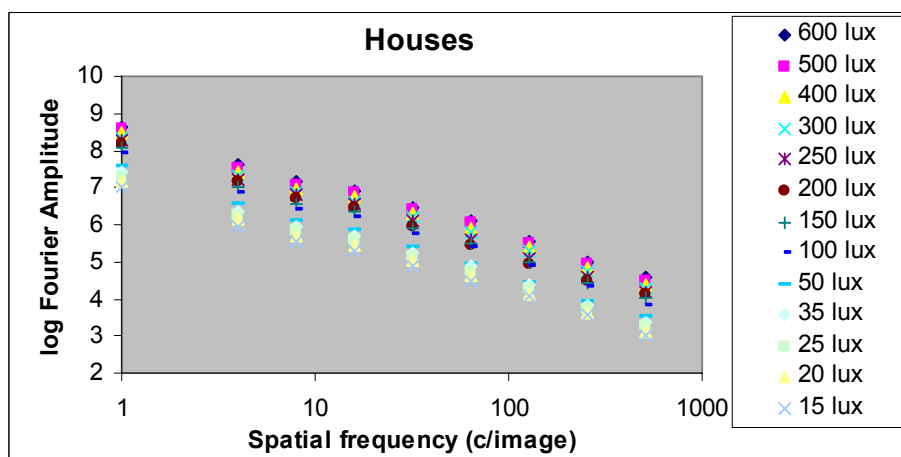


Σχ.7.5: Μείωση της τιμής του πλάτους συναρτήσει της μείωσης του φωτισμού. Οι μέσες τιμές του πλάτους προέκυψαν από τις κανονικοποιημένες τιμές αυτού.

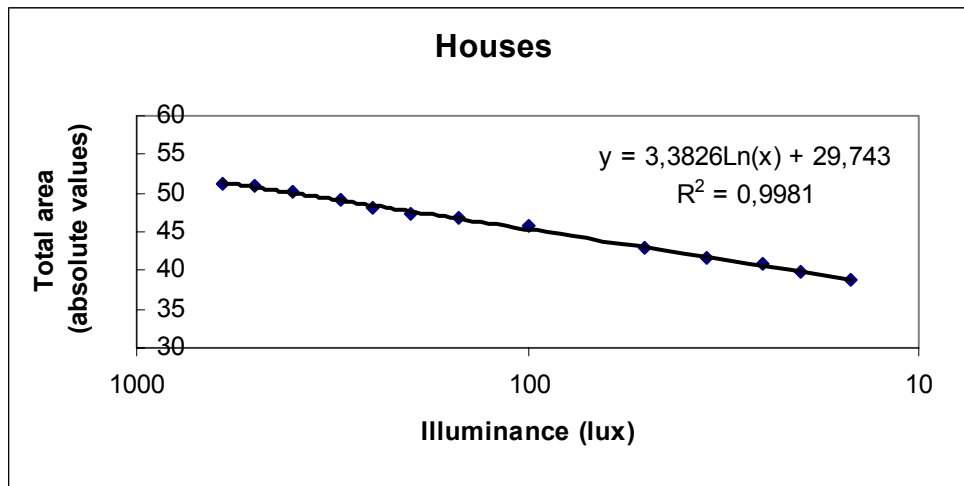


Σχ.7.6: Λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους ανά προσανατολισμό σε σχέση με την μείωση του φωτισμού.

### 8. Εικόνες Houses



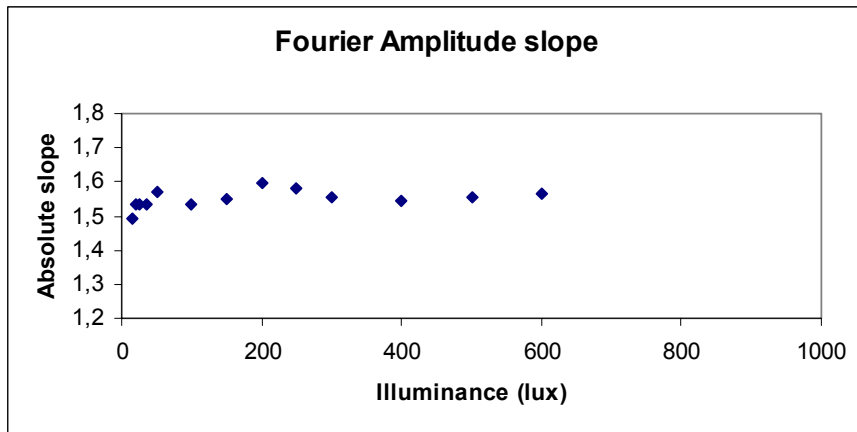
Σχ.8.1: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. Στο δεξιό μέρος του γραφήματος απεικονίζονται οι τιμές του περιβαλλοντικού φωτισμού σε lux. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα)



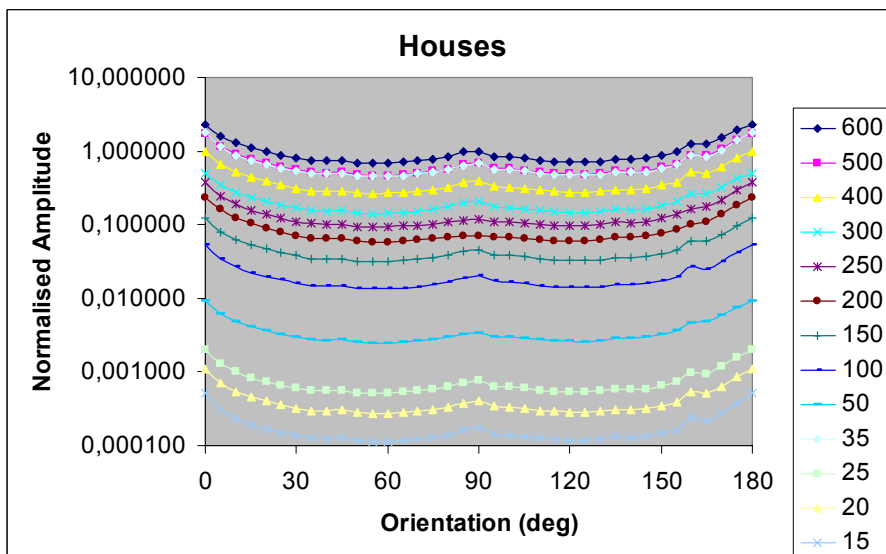
Σχ.8.2: Εμβαδό, συνολικά για όλες τις χωρικές συχνότητες, που περικλείεται από τις καμπύλες κατανομής του φασματικού πλάτους ανά οκτάβα συναρτήσει του φωτισμού. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).

Πιν.8: Τιμές κλίσης a ανά φωτισμό λήψης

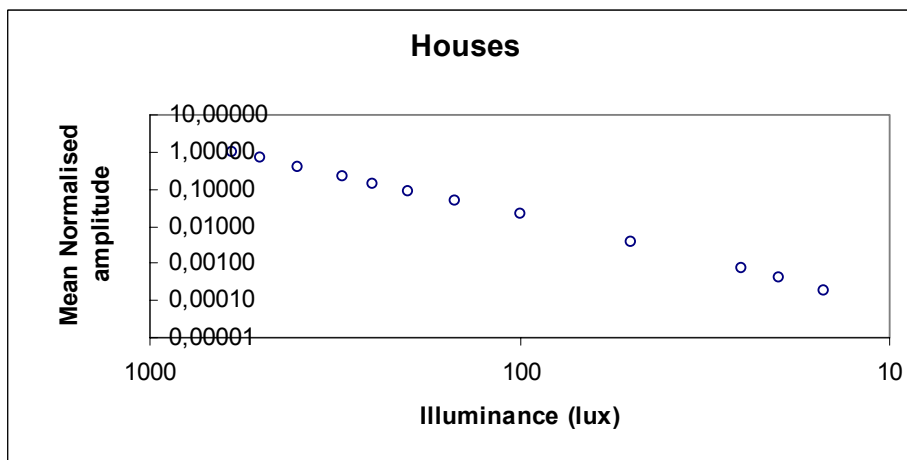
Φωτισμός (lux)	Slope a
600	1,5678
500	1,5532
400	1,5459
300	1,5524
250	1,5818
200	1,5986
150	1,551
100	1,5338
50	1,5694
35	1,5355
25	1,5344
20	1,5336
15	1,491



Σχ.8.3: Μεταβολή της κλίσης του φασματικού πλάτους σε σχέση με τον φωτισμό (Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).

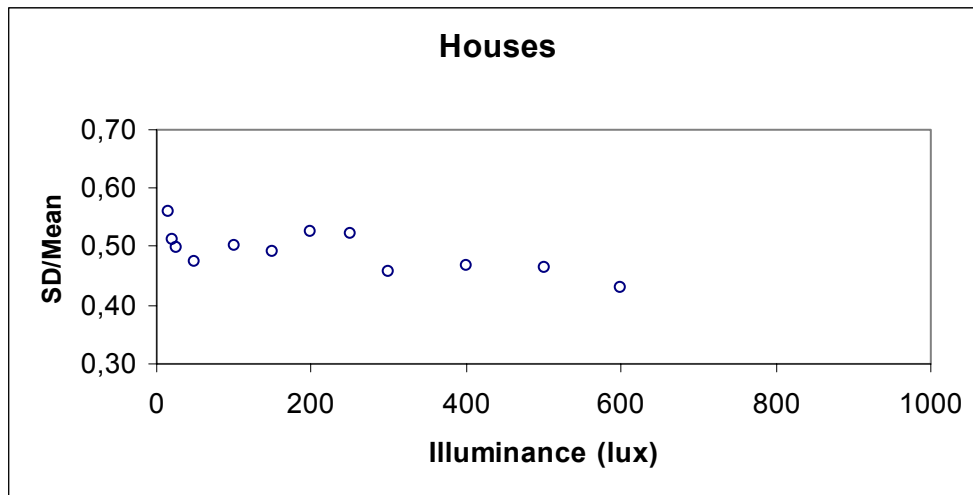


Σχ.8.4: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν κανονικοποιημένες τιμές. Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα.).



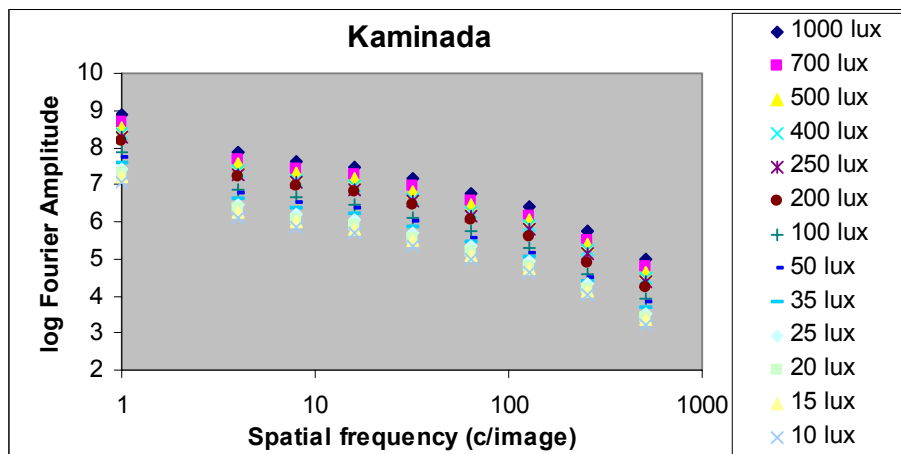
Σχ.8.5: Μείωση της τιμής του πλάτους συναρτήσει της μείωσης του φωτισμού. Οι μέσες τιμές του πλάτους προέκυψαν από τις κανονικοποιημένες τιμές αυτού.



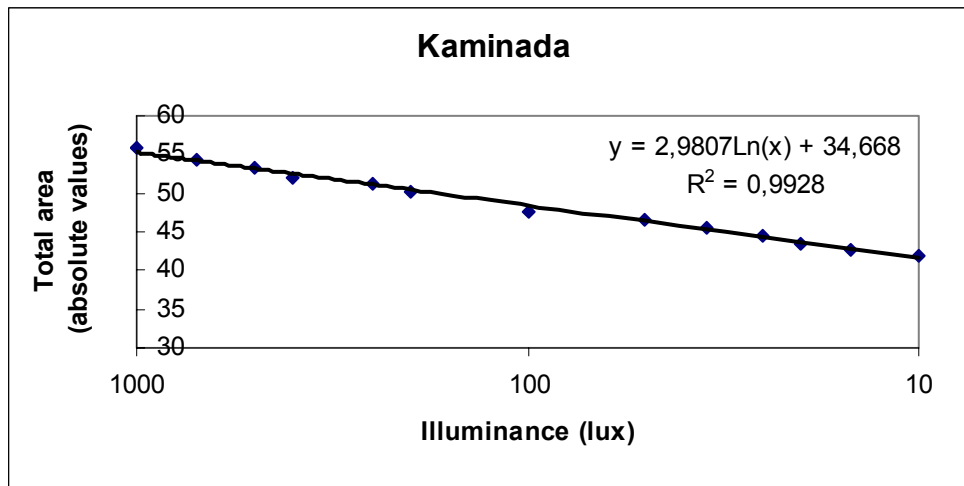


Σχ.8.6: Λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους ανά προσανατολισμό σε σχέση με την μείωση του φωτισμού.

### 9. Εικόνες Kaminada



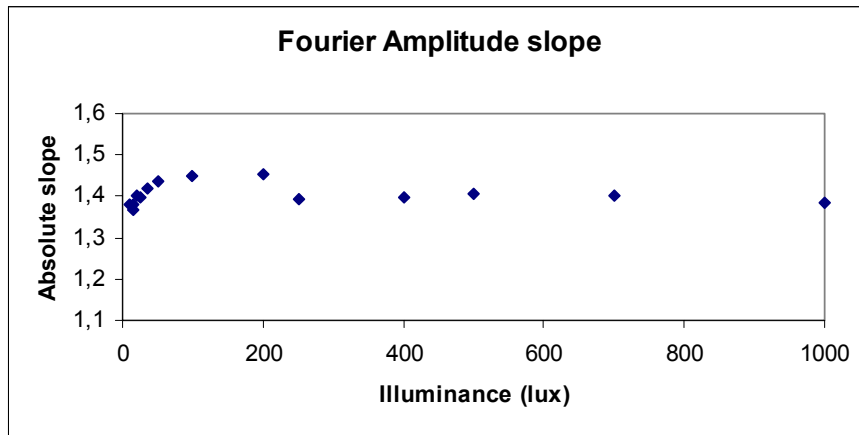
Σχ.9.1: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά οκτάβα χωρικής συχνότητας σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. Στο δεξιό μέρος του γραφήματος απεικονίζονται οι τιμές του περιβαλλοντικού φωτισμού σε lux. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα)



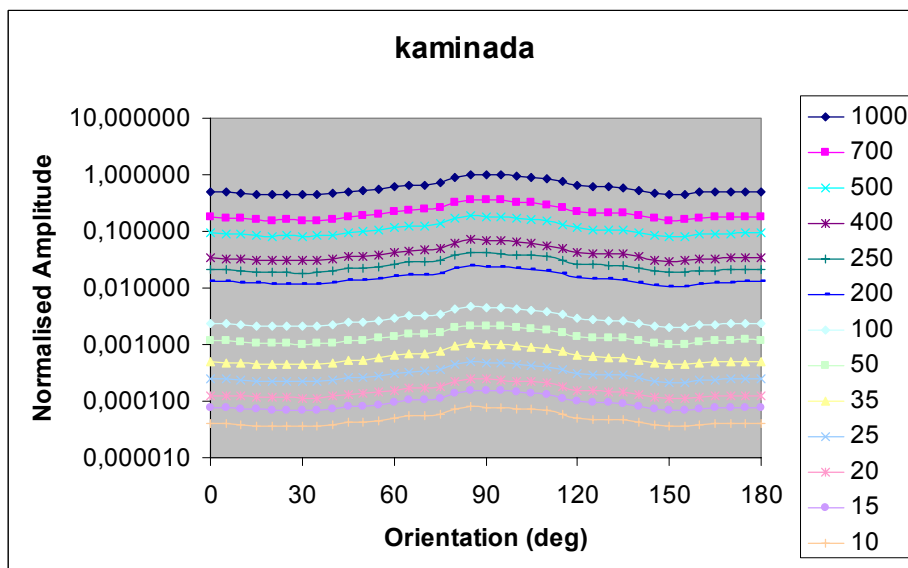
Σχ.9.2: Εμβαδό, συνολικά για όλες τις χωρικές συχνότητες, που περικλείεται από τις καμπύλες κατανομής του φασματικού πλάτους ανά οκτάβα συναρτήσε του φωτισμού. (Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).

Πιν.9: Τιμές κλίσης a ανά φωτισμό λήψης

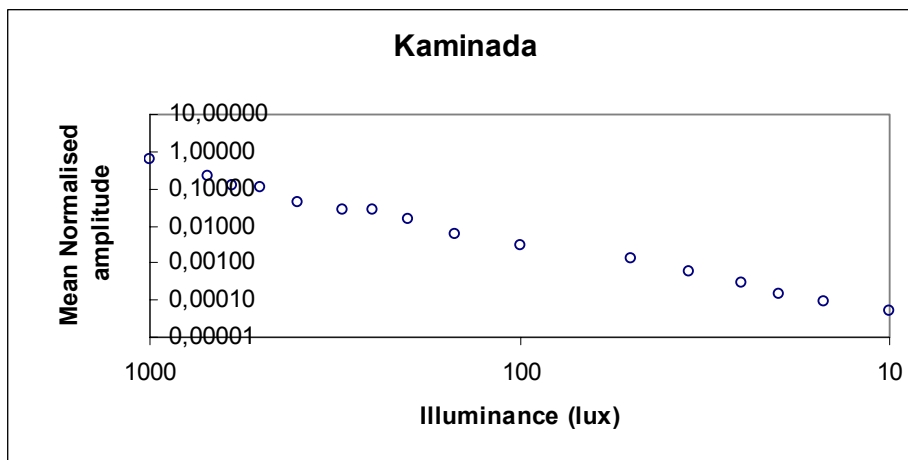
Φωτισμός (lux)	Slope a
1000	1,3855
700	1,4023
500	1,4049
400	1,3967
250	1,3952
200	1,4547
100	1,4484
50	1,437
35	1,417
25	1,3955
20	1,4014
15	1,3804
10	1,3801



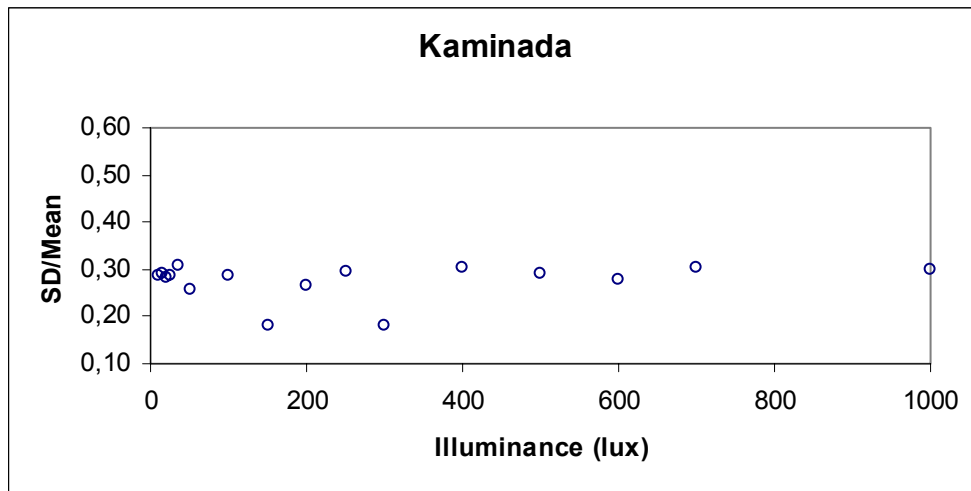
Σχ.9.3: Μεταβολή της κλίσης του φασματικού πλάτους σε σχέση με τον φωτισμό (Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα).



Σχ.9.4: Κατανομή φασματικού πλάτους ανά προσανατολισμό σε βαθμιαία μειούμενο φωτισμό. (Τα αποτελέσματα που παρατίθενται αφορούν κανονικοποιημένες τιμές. Ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα.).



Σχ.9.5: Μείωση της τιμής του πλάτους συναρτήσει της μείωσης του φωτισμού. Οι μέσες τιμές του πλάτους προέκυψαν από τις κανονικοποιημένες τιμές αυτού.



**Σχ.9.6:** Λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή του κανονικοποιημένου πλάτους ανά προσανατολισμό σε σχέση με την μείωση του φωτισμού.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Σημειώσεις:

1. Σημειώσεις για το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα 'Όπτική & Όραση', Σ. Πλαϊνής.  
<http://www.optics-vision.gr>
2. «Ανάλυση Χωρικού και Χρωματικού Φασματικού Περιεχομένου Φυσικών Εικόνων», Σαπουντζής Παναγιώτης, Μεταπτυχιακή εργασία, MSc 'Όπτική και Όραση', Πανεπιστήμιο Κρήτης, 2005

### Βιβλία:

1. Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, Πήτας Ιωάννης, 2001
2. Ψηφιακή επεξεργασία σήματος, Monson Hayes, Εκδόσεις Τζιόλα, 2000
3. Digital Image Processing, Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, (Second Edition).

### Άρθρα:

1. Amano, K., Uchikawa, K. Kuriki, I (2002) *Characteristics of color memory for natural scenes*, J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 19, 1501-14
2. Arakawa Kenji, Shozo Tobimatsu, Shizuka Kurita Tashima, Miyuki Nakayama, Jun Ichi Kira, Motohiro Kato, *Effects of stimulus orientation on spatial frequency function of the visual evoked potential*, Exp Brain Res, 131:121–125, 2000
3. Atick J.J. 1992. *Could information theory provide an ecological theory of sensory processing?* Network: Computation in Neural Systems. 3, 213-251
4. Atick J.J. and Redlich A.N. 1992. *What does the retina know about natural scenes?* Neural Computation. 4, 196-210.
5. Atkinson, J. and O. Braddick, *Visual development in the human infant*. Arch Ital Biol, 1978. 116(3-4): p. 352-7.
6. Baccus, S.A. and M. Meister, *Fast and slow contrast adaptation in retinal circuitry*. Neuron, 2002. 36(5): p. 909-19.
7. Badcock, D.R., *How do we discriminate relative spatial phase?* Vision Res, 1984. 24(12): p. 1847-57
8. Badcock, D.R., *Spatial phase or luminance profile discrimination?* Vision Res, 1984. 24(6): p. 613-23.
9. Baddeley R., Abbott L.F., Booth M.C., Sengpiel F., Freeman T., Wakeman E.A. and Rolls E.T. 1997. *Responses of neurons in primary and inferior temporal visual cortices to natural scenes*. Proceedings of the Royal Society of London Series B. 264, 1775-1783.
10. Balboa, R.M. and N.M. Grzywacz, *Power spectra and distribution of contrasts of natural images from different habitats*. Vision Res, 2003. 43(24): p. 2527-37.
11. Barlow, H.B., R. Narasimhan, and A. Rosenfeld, *Visual pattern analysis in machines and animals*. Science, 1972. 177(49): p. 567-75
12. Barlow, J.A., *A simple shock circuit for rats*. J Exp Anal Behav, 1961. 4: p. 308
13. Baylor D.A., Nunn B.J. and Schnapf J.L. 1987. *Spectral sensitivity of cones of the monkey Macaca Fascicularis*. Journal of Physiology-London. 390, 145-160
14. Benardete, E.A. and E. Kaplan, *The receptive field of the primate P retinal ganglion cell, II: Nonlinear dynamics*. Vis Neurosci, 1997. 14(1): p. 187-205.
15. Benardete, E.A. and E. Kaplan, *The receptive field of the primate P retinal ganglion cell, I: Linear dynamics*. Vis Neurosci, 1997. 14(1): p. 169-85.
16. Bex Peter J., Steven C. Dakin, *Natural image statistics mediate brightness 'filling in'*, Proc. R. Soc. Lond. B (2003) 270, 2341–2348
17. Bex Peter J., Walter Makous, *Spatial frequency, phase, and the contrast of natural images*, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 19, No. 6, 2002
18. Billock Vincent A., *Neural acclimation to 1/f spatial frequency spectra in natural images transduced by the human visual system*, Physica D 137 (2000) 379–391, 2000
19. Blakemore, C. and F.W. Campbell, *On the existence of neurones in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images*. J Physiol, 1969. 203(1): p. 237-60

20. Boynton, G.M. and E.M. Finney, *Orientation-specific adaptation in human visual cortex*. J Neurosci, 2003. 23(25): p. 8781-7.
21. Bradley A., Switkes E. and De Valois K.K. 1985. *Orientation and spatial frequency selectivity of adaptation to isoluminant color patterns*. Investigative Ophthalmology and Visual Science. 26 (suppl), 182.
22. Breitmeyer, B.G., *Simple reaction time as a measure of the temporal response properties of transient and sustained channels*. Vision Res, 1975. 15(12): p. 1411-2
23. Burton G. J. and Ian R. Moorhead, *Color and spatial structure in natural scenes*, Applied Optics / Vol. 26, No. 1 / 1 January 1987
24. Campbell F.W. and Robson J.G. 1968. *Application of Fourier analysis to the visibility of gratings*. Journal of Physiology. 197, 551-566
25. Campbell, F.W. and L. Maffei, *The influence of spatial frequency and contrast on the perception of moving patterns*. Vision Res, 1981. 21(5): p. 713-21
26. Carandini, M., J.A. Movshon, and D. Ferster, *Pattern adaptation and cross-orientation interactions in the primary visual cortex*. Neuropharmacology, 1998. 37(4-5): p. 501-11.
27. Cavanagh, P. and G. Mather, *Motion: the long and short of it*. Spat Vis, 1989. 4(2-3): p. 103-29
28. Chaparro, A., et al., *Colour is what the eye sees best*. Nature, 1993. 361(6410): p. 348-50
29. Chichilnisky, E.J. and B.A. Wandell, *Photoreceptor sensitivity changes explain color appearance shifts induced by large uniform backgrounds in dichoptic matching*. Vision Res, 1995. 35(2): p. 239-54.
30. Chubb, C. and G. Sperling, *Drift-balanced random stimuli: a general basis for studying non-Fourier motion perception*. J Opt Soc Am A, 1988. 5(11): p. 1986-2007.
31. Clatworthy, P.L., et al., *Coding of the contrasts in natural images by populations of neurons in primary visual cortex (V1)*. Vision Res, 2003. 43(18): p. 1983-2001
32. Clifford, C.W., et al., *Orthogonal adaptation improves orientation discrimination*. Vision Res, 2001. 41(2): p. 151-9.
33. Crowder, N.A., et al., *Relationship between contrast adaptation and orientation tuning in V1 and V2 of cat visual cortex*. J Neurophysiol, 2006. 95(1): p. 271-83.
34. Curcio, C.A. and K.A. Allen, *Topography of ganglion cells in human retina*. J Comp Neurol, 1990. 300(1): p. 5-25.
35. Curcio, C.A., et al., *Human photoreceptor topography*. J Comp Neurol, 1990. 292(4): p. 497-523.
36. Daugman, J.G., *Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters*. J Opt Soc Am A, 1985. 2(7): p. 1160-9
37. De Valois R.L. and De Valois K.K. 1990. *Spatial Vision*. Oxford psychology series. D. E. Broadbent, J. L. McGaugh, N. J. Mackintosh, M. I. Posner, E. Tulving and L. Weiskrantz. Oxford University Press, Oxford, UK.
38. De Valois R.L., Abramov I. and Thorell L.G. 1966. *Analysis of response patterns of LGN cells*. Journal of the Optical Society of America. 56, 966-977
39. De Valois, R.L., D.G. Albrecht, and L.G. Thorell, *Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex*. Vision Res, 1982. 22(5): p. 545-59
40. Dragoi, V., et al., *Dynamics of neuronal sensitivity in visual cortex and local feature discrimination*. Nat Neurosci, 2002. 5(9): p. 883-91.
41. Dragoi, V., J. Sharma, and M. Sur, *Adaptation-induced plasticity of orientation tuning in adult visual cortex*. Neuron, 2000. 28(1): p. 287-98.
42. Einhauser, W. and P. Konig, *Does luminance-contrast contribute to a saliency map for overt visual attention?* Eur J Neurosci, 2003. 17(5): p. 1089-97
43. Fang, F., et al., *Orientation-tuned fMRI adaptation in human visual cortex*. J Neurophysiol, 2005. 94(6): p. 4188-95.
44. Felipe, A., M.J. Buades, and J.M. Artigas, *Influence of the contrast sensitivity function on the reaction time*. Vision Res, 1993. 33(17): p. 2461-6
45. Field D.J. 1994. *What is the goal of sensory coding?* Neural Computation. 6, 559 - 601.
46. Field, D.J., *Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells*. J Opt Soc Am A, 1987. 4(12): p. 2379-94
47. Gegenfurtner Karl R. and Jochem Rieger, *Sensory and cognitive contributions of color to the recognition of natural scenes*, Current Biology 2000, 10:805–808

48. Georgeson, M.A. and S.K. Reddin, *Adaptation to gratings: equal spatial selectivity for light and dark bar width variation*. Vision Res, 1981. 21(3): p. 419-21.
49. Gilinsky Alberta S., *Orientation-specific effects of patterns of adapting light on visual acuity*, J. Opt. Soc. Am, volume 58, number 1, 1968
50. Ginsburg, A., *Spatial Filtering And Visual Form Perception In: Handbook of Perception and Human Performance*. Voll. 2. 1986
51. Gouras P. 1991. *Precortical physiology of colour vision in the perception of colour*. Vision and visual disfunction. J. R. Cronly-Dillon. 1991. The Macmillian press Ltd., London. 163-178
52. Graham, N., J.G. Robson, and J. Nachmias, *Grating summation in fovea and periphery*. Vision Res, 1978. 18(7): p. 815-25
53. Green, M., *Orientation-specific adaptation: effects of checkerboards on the detectability of gratings*. Perception, 1980. 9(4): p. 369-77.
54. Harris Fredric J., *On the use of windows for harmonic analysis with the Discrete Fourier Transform*, Proceedings of the IEEE, vol.66, 1, 1978
55. Harwerth, R.S. and D.M. Levi, *Reaction time as a measure of suprathreshold grating detection*. Vision Res, 1978. 18(11): p. 1579-86
56. He, S. and D.I. MacLeod, *Orientation-selective adaptation and tilt after-effect from invisible patterns*. Nature, 2001. 411(6836): p. 473-6.
57. Hecht, S., *The Instantaneous Visual Threshold after Light Adaptation*. Proc Natl Acad Sci U S A, 1937. 23(4): p. 227-33.
58. Hendry S.H. and Reid R.C. 2000. *The koniocellular pathway in primate vision*. Annual Review of Neuroscience. 23, 127-153
59. Hess, R.F., K. Nordby, and J.S. Pointer, *Regional variation of contrast sensitivity across the retina of the achromat: sensitivity of human rod vision*. J Physiol, 1987. 388: p. 101-19
60. Hubel D.H. and Wiesel T.N. 1959. *Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex*. Journal of Physiology. 148, 574-591
61. Hubel D.H. and Wiesel T.N. 1962. *Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex*. Journal of Physiology. 160, 106-154
62. Hubel D.H. and Wiesel T.N. 1968. *Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex*. Journal of Physiology. 195, 215-243
63. Hubel, D.H. and T.N. Wiesel, *Binocular interaction in striate cortex of kittens reared with artificial squint*. J Neurophysiol, 1965. 28(6): p. 1041-59
64. Johnson Aaron P., Frederick A. A. Kingdom, and Curtis L. Baker, Jr., *Spatiochromatic statistics of natural scenes: First- and second-order information and their correlational structure*, J. Opt. Soc. Am. A/Vol. 22, No. 10/October 2005
65. Juvells, I., et al., *Evaluation of thallium myocardial-perfusion imaging by means of washout parametric images: a simulation study*. J Opt Soc Am A, 1991. 8(1): p. 157-63.
66. Kayser Christoph, Konrad P Kording and Peter Konig, *Processing of complex stimuli and natural scenes In the visual cortex*, Current Opinion in Neurobiology 2004, 14:468–473
67. Kourtzi, Z., et al., *Integration of local features into global shapes: monkey and human fMRI studies*. Neuron, 2003. 37(2): p. 333-46.
68. Kulikowski J.J. and Tolhurst D.J. 1972. *Psychophysical evidence for sustained and transient mechanisms in human vision*. Journal of Physiology-London. 232, 149-163
69. Levinson Eugene, Robert Sekuler, *A two-dimensional analysis of direction-specific adaptation*, Vision Research, vol. 20, 103-107, 1980
70. M. J. Morgan, J. Ross, and A. Hayes, *The relative importance of local phase and local amplitude in patchwise image-reconstruction*, Biol. Cybern. 65, 113–119 (1991)
71. Maddess, T., et al., *Factors governing the adaptation of cells in area-17 of the cat visual cortex*. Biol Cybern, 1988. 59(4-5): p. 229-36.
72. Mansfield R.J. W, *Neural basis of orientation perception in primate vision*, Science New Series, Vol.186, No.4169, 1133-1135, 1974
73. Mante, V., et al., *Independence of luminance and contrast in natural scenes and in the early visual system*. Nat Neurosci, 2005. 8(12): p. 1690-7.

74. May James G., James M. Brown, Carolina Gutierrez, and Mike Donlon, *The effects of spatial phase on reaction time to spatially filtered images*, Psychol Res (1990) 52: 22- 27
75. Menees, S.M., *The effect of spatial frequency adaptation on the latency of spatial contrast detection*. Vision Res, 1998. 38(24): p. 3933-42.
76. Moroney, N. (2002) *Proceedings of the 9th Congress of the International Color Association* (Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., Bellingham, WA), Vol. 4421, pp. 571–574.
77. Moulden, B. and F. Kingdom, *Light-dark asymmetries in the Craik-Cornsweet-O'Brien illusion and a new model of brightness coding*. Spat Vis, 1990. 5(2): p. 101-28.
78. Moulden, B., F. Kingdom, and L.F. Gatley, *The standard deviation of luminance as a metric for contrast in random-dot images*. Perception, 1990. 19(1): p. 79-101.
79. Mullen K.T. 1985. *The contrast sensitivity of human color vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings*. Journal of Physiology-London. 359, 381-400
80. Murray, I.J. and S. Plainis, *Contrast coding and magno/parvo segregation revealed in reaction time studies*. Vision Res, 2003. 43(25): p. 2707-19
81. Norman R.A. and Werblin F.S. 1974. *Control of retinal sensitivity. I Light and dark adaptation of vertebrate rods and cones*. Journal of General Physiology. 63,
82. Nundy, S. and D. Purves, *A probabilistic explanation of brightness scaling*. Proc Natl Acad Sci U S A, 2002. 99(22): p. 14482-7.
83. Owsley, C., R. Sekuler, and D. Siemsen, *Contrast sensitivity throughout adulthood*. Vision Res, 1983. 23(7): p. 689-99.
84. Pandey Vimal Ram L., *Orientation tuning of the spatial-frequency-tuned mechanisms of the Red–Green channel*, J. Opt. Soc. Am. A/ Vol. 14, No. 10/October 1997
85. Parkhurst, D.J. and E. Niebur, *Texture contrast attracts overt visual attention in natural scenes*. Eur J Neurosci, 2004. 19(3): p. 783-9
86. Parraga C Alejandro, David J Tolhurst, *The effect of contrast randomisation on the discrimination of changes in the slopes of the amplitude spectra of natural scenes*, Perception, volume 29, pages 1101-1116, 2000
87. Párraga C.A., Brelstaff G., Troscianko T. and Moorhead I.R. 1998a. *Color and luminance information in natural scenes*. Journal of the Optical Society of America A. 15, 563-569
88. Parraga, C.A., T. Troscianko, and D.J. Tolhurst, *Spatiochromatic properties of natural images and human vision*. Curr Biol, 2002. 12(6): p. 483-7
89. Parraga, C.A., T. Troscianko, and D.J. Tolhurst, *The human visual system is optimised for processing the spatial information in natural visual images*. Curr Biol, 2000. 10(1): p. 35-8
90. Peli, E., *Contrast in complex images*. J Opt Soc Am A, 1990. 7(10): p. 2032-40
91. Peterzell, D.H., J.S. Werner, and P.S. Kaplan, *Individual differences in contrast sensitivity functions: the first four months of life in humans*. Vision Res, 1993. 33(3): p. 381-96
92. Peterzell, D.H., J.S. Werner, and P.S. Kaplan, *Individual differences in contrast sensitivity functions: longitudinal study of 4-, 6- and 8-month-old human infants*. Vision Res, 1995. 35(7): p. 961-79
93. Piotrowski L.N. and Campbell F.W. 1982. *A demonstration of the visual importance and flexibility of spatial-frequency amplitude and phase*. Perception. 11, 337-346
94. Plainis, S. and I.J. Murray, *Neurophysiological interpretation of human visual reaction times: effect of contrast, spatial frequency and luminance*. Neuropsychologia, 2000. 38(12): p. 1555-64
95. Raj, R., et al., *Contrast statistics for foveated visual systems: fixation selection by minimizing contrast entropy*. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2005. 22(10): p. 2039-49.
96. Ringach D.L. 2002. *Spatial structure and symmetry of simple-cell receptive fields in macaque primary visual cortex*. Journal of Neurophysiology. 88, 455-463
97. Rinner, O. and K.R. Gegenfurtner, *Time course of chromatic adaptation for color appearance and discrimination*. Vision Res, 2000. 40(14): p. 1813-26.
98. Shapley, R., *Visual sensitivity and parallel retinocortical channels*. Annu Rev Psychol, 1990. 41: p. 635-58.
99. Smith V.C. and Pokorny J. 1972. *Spectral sensitivity of color-blind observers and the cone photopigments*. Vision Research. 12, 2059-2071



100. Smith, V.C. and J. Pokorny, *Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 700 nm*. Vision Research, 1975. 15: p. 161-171
101. Solomon Samuel G., Jonathan W. Peirce, Neel T. Dhruv, Peter Lennie, *Profound contrast adaptation early in the visual pathway*, Neuron, Vol. 42, 155–162, 2004
102. Sutter, A. and N. Graham, *Investigating simple and complex mechanisms in texture segregation using the speed-accuracy tradeoff method*. Vision Res, 1995. 35(20): p. 2825-43
103. Suzuki, S., *Attention-dependent brief adaptation to contour orientation: a high-level aftereffect for convexity?* Vision Res, 2001. 41(28): p. 3883-902.
104. Tadmor Y., D. J. Tolhurst, *Both the phase and the amplitude spectrum may determine the appearance of natural images*, Vision Res. Vol. 33, No. 1. Pp. 141-145, 1993
105. Teich, A.F. and N. Qian, *Learning and adaptation in a recurrent model of V1 orientation selectivity*. J Neurophysiol, 2003. 89(4): p. 2086-100.
106. Teichner, W.H., *Recent studies of simple reaction time*. Psychol Bull, 1954. 51(2:1): p. 128-49.
107. Thomas James P., Jennifer Gille, *Bandwidths of orientation channels in human vision*, J. Opt. Soc. Am., Vol. 69, No. 5, 1979
108. Thomson M.G.A. 1999b. *Visual coding and the phase structure of natural scenes*. Network-Computation in Neural Systems. 10, 123-132
109. Thorpe S.J., Gegenfurther K.R., Fabre-Thorpe M. and Bulthoff H.H. 2001. *Detection of animals in natural images using far peripheral vision*. European Journal of Neuroscience. 14, 869-876
110. Tolhurst D.J. 1973. *Separate channels for the analysis of the shape and the movement of moving visual stimulus*. Journal of Physiology. 231, 385-402
111. Tolhurst, D.J. and J.A. Movshon, *Spatial and temporal contrast sensitivity of striate cortical neurones*. Nature, 1975. 257(5528): p. 674-5
112. Tolhurst, D.J. and Y. Tadmor, *Discrimination of changes in the slopes of the amplitude spectra of natural images: band-limited contrast and psychometric functions*. Perception, 1997. 26(8): p. 1011-25
113. Tolhurst, D.J., Y. Tadmor, and T. Chao, *Amplitude spectra of natural images*. Ophthalmic Physiol Opt, 1992. 12(2): p. 229-32
114. Van der Schaaf A., J. H. Van Hateren, *Modelling the power spectra of natural images: statistics and information*, Visionres., Vol. 36, No. 17, pp. 2759-2770, 1996
115. van Hateren, J.H., *Three modes of spatiotemporal preprocessing by eyes*. J Comp Physiol [A], 1993. 172(5): p. 583-91
116. Wandell B.A. 1995. *Foundations of vision*. Sinauer Associates, Sunderland, Mass
117. Webster Michael A, *Human colour perception and its adaptation*, Computation in Neural Systems 7 (1996) 587–634
118. Webster Michael A., Eriko Miyahara, *Contrast adaptation and the spatial structure of natural images*, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 14, No. 9, September 1997
119. Webster Michael A., Mark A. Georgeson and Shernaaz M. Webster, *Neural adjustments to image blur*, nature neuroscience, vol. 5, no 9, 2002
120. Webster Michael A., Russell L. De Valois, *Relationship between spatial-frequency and orientation tuning of striate-cortex cells*, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 2, No. 7, 1985
121. Westheimer Gerald, Angela Gee, *Orthogonal adaptation and orientation discrimination*, Vision Research 42 (2002) 2339–2343
122. Whittle, P. (1994), *Lightness, Brightness, and Transparency*, ed. Gilchrist, A. L. (Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ), pp. 35–110.
123. Xu X.M., Bonds A.B. and Casagrande V.A. 2002. *Modeling receptive-field structure of koniocellular, magnocellular, and parvocellular LGN cells in the owl monkey (Aotus trivirgatus)*. Visual Neuroscience. 19, 693-701
124. Xu X.M., Ichida J.M., Allison J.D., Boyd J.D., Bonds A.B. and Casagrande V.A. 2001. *A comparison of koniocellular, magnocellular and parvocellular receptive field properties in the lateral geniculate nucleus of the owl monkey (Aotus trivirgatus)*. Journal of Physiology-London. 531, 203-218
125. Yang Zhiyong and Dale Purves, *The statistical structure of natural light patterns determines perceived light intensity*, PNAS \_ June 8, 2004 \_ vol. 101 \_ no. 23 \_ 8745–8750
126. Zeki, S., *The distribution of wavelength and orientation selective cells in different areas of monkey visual cortex*. Proc R Soc Lond B Biol Sci, 1983. 217(1209): p. 449-70.



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ



ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ  
ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



**Η ΠΑΙΔΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ**

Επιχειρησιακό Πρόγραμμα  
Εκπαίδευσης και Αρχικής  
Επαγγελματικής Κατάρτισης