



Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Τμήμα Περιβάλλοντος



**Μελέτη της Χρωματικής Ευαισθησίας Παρατηρητή
στις Μεταβολές της Οπτικής Ποιότητας της Ατμόσφαιρας
με Χρήση Μοντέλου Ορατότητας:
Ανάπτυξη και Εφαρμογή Λογισμικού Ψυχοφυσικής Αξιολόγησης**

Μαρία Χαιρετάκη

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστόδουλος Πηλίνης

Μυτιλήνη, Δεκέμβριος 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα ερευνητική πρόταση ανήκει στα γνωστικά πεδία της οπτικής ποιότητας της ατμόσφαιρας της χρωματομετρίας και της ψυχοφυσικής. Βασικός της στόχος είναι η διερεύνηση της ικανότητάς του ανθρώπινου παρατηρητή να διακρίνει χρωματικές αλλοιώσεις αντικειμένων που γίνονται αντιληπτά μέσα από ατμόσφαιρα με αστικούς αερολυματικούς ρύπους. Συγκεκριμένα, προτείνεται να γίνει μία καινοτόμος συνδυαστική χρήση ενός μοντέλου ορατότητας και ενός ψυχοφυσικού πειράματος. Το μοντέλο ορατότητας που θα αναπτυχθεί στο πλαίσιο της έρευνας, θα επιτρέψει την προσομοίωση του τελικού χρώματος χρωματικού στόχου που παρατηρείται μέσα από αερολυματική ατμόσφαιρα, όταν είναι γνωστό το αρχικό χρώμα του στόχου και η κατάσταση του ατμοσφαιρικού αερολύματος. Το μοντέλο ορατότητας αναμένεται να επιτρέψει την αναλυτική μελέτη των χρωματικών αλλοιώσεων παρατηρούμενων στόχων σε άμεση συσχέτιση με συγκεκριμένα αερολυματικά χαρακτηριστικά. Τέτοια είναι το συνολικό αερολυματικό φορτίο (συγκέντρωση PM_{2.5}), γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατανομής μάζας, η χημική σύσταση κ.ά. Προϊόντα του μοντέλου θα είναι τα δεδομένα του αρχικού και το τελικού χρώματος του στόχου, καθώς και τα αερολυματικά χαρακτηριστικά. Σε κάθε περίπτωση, για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των δεδομένων, θα χρησιμοποιηθούν προτυποποιημένοι χρωματικοί χώροι (CIELAB) και χρωματικές διαφορές (φόρμουλα CIE-94).

Στην συνέχεια τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιηθούν ώστε να κατασκευαστούν συνθετικές εικόνες του αντικειμένου. Οι εικόνες αυτές θα εφαρμοστούν στην εκτέλεση του ψυχοφυσικού πειράματος. Στο πείραμα απαιτείται η συμμετοχή πραγματικών παρατηρητών που καλούνται να αξιολογήσουν τις παρατηρούμενες διαφορές χρώματος των προβαλλόμενων συνθετικών εικόνων. Τα δεδομένα που θα συγκεντρωθούν από το πείραμα σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του μοντέλου ορατότητας, θα αποτελέσουν ένα υπερπλήρες σύνολο, που αναμένεται αρχικά να επιτρέψει τον καθορισμό του ελάχιστου παρατηρούμενου κατωφλίου ή ουδού (JND, Just Noticeable Difference). Περαιτέρω ανάλυση αναμένεται να οδηγήσει στον προσδιορισμό νέων σχέσεων - συνταγών υπολογισμού των επιπτώσεων της αερολυματικής ρύπανσης στην χρωματική ορατότητα. Οι σχέσεις αυτές θα λαμβάνουν υπόψη την ευαισθησία του παρατηρητή και ουσιαστικά αναμένεται να συνδέσουν την οπτική ποιότητα της ατμόσφαιρας με την ανθρώπινη

οπτική αντίληψη. Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μελέτης αναμένεται να βρουν εφαρμογή στην μελέτη των επιπτώσεων της ρύπανσης στην οπτική ποιότητα, στον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των επιπτώσεων στον άνθρωπο και στη χάραξη πολιτικών προστασίας της οπτικής ποιότητας της ατμόσφαιρας.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ:

Ποιότητα της ατμόσφαιρας, Μοντέλο ορατότητας, Αερόλυμα, Διάδοση ακτινοβολίας, Ανθρώπινο οπτικό υποσύστημα, ουδός, JND, χρωματικές διαφορές, CIE-94, Χρωματομετρία, Ψυχοφυσική.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	
1.1 Η σημασία της έρευνας.....	9
1.2 Η ερευνητική πρόταση.....	11
1.2.1 Περιγραφή των στόχων.....	14
1.2.2 Εμπλεκόμενα γνωστικά αντικείμενα.....	16
1.3 Διασύνδεση με τμήμα περιβάλλοντος.....	16
1.4 Κριτήρια ανάπτυξης της μελέτης.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Αερολύματα και ακτινοβολία	
2.1 Ατμοσφαιρικά αερολύματα.....	19
2.1.1 Η σημασία των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων.....	19
2.1.2 Κατανομές αριθμού μάζας.....	21
2.1.3 Τύποι αερολυμάτων.....	22
2.1.4 Αστικά αερολύματα.....	24
2.2 Διάδοση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα.....	26
2.2.1 Σκέδαση και απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	28
2.2.2 Σκέδαση και απορρόφηση αερίων.....	30
2.2.3 Σκέδαση και απορρόφηση από τα αερολύματα.....	31
2.2.3.1 Θεωρία σκέδασης MIE.....	32
2.2.3.2 Αερολυματικό οπτικό πάχος.....	33
2.2.4 Το μοντέλο ορατότητας.....	34
2.3 Deciview.....	38
2.4 Το λογισμικό MODTRAN.....	39
2.5 Μοντέλα κατανομών αερολυμάτων για τον υπολογισμό των οπτικών τους ιδιοτήτων.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Χρωματομετρία και Ψυχοφυσική	
3.1 Η τριχρωματική όραση και αρχές χρωματομετρίας.....	41

3.2 Color Matching Functions (CMFs) και Τριχρωματικές τιμές (tristimulus values).....	45
3.3 Χρωματικότητες (chromaticities).....	46
3.3.1 Διάγραμμα χρωματικοτήτων x-y.....	47
3.3.2 Χρωματικός χώρος Lab και αντιληπτικά ομοιογενείς χώροι.....	49
3.4 Χρωματικές διαφορές.....	51
3.4.1 Η φόρμουλα ΔE_{CIE-94}	52
3.5 Ελάχιστη αντιληπτή διαφορά χρώματος.....	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Προτεινόμενη Μεθοδολογία

4.1. Η Κεντρική ιδέα.....	54
4.2. Επιλογή προφίλ αερολυμάτων.....	56
4.2.1 Συνεχείς κατανομές AERONET.....	57
4.2.2 Αερολύματα από το PMCAMx.....	60
4.3. Μοντέλο προσομοίωσης ορατότητας.....	61
4.4. Πειραματικό μέρος.....	63
4.5. Αναμενόμενα προϊόντα.....	70
4.6. Χρονοδιάγραμμα.....	71

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....

73

E-BOOKS ΚΑΙ ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ.....

82

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1:	Ροοδιάγραμμα εργασιών.....	12
Σχήμα 1.2:	Πλαίσιο εργασιών.....	13
Σχήμα 1.3:	Φόρμουλα Χρωματικής Διαφοράς.....	15
Σχήμα 2.1:	Διάγραμμα διαμέτρου σωματιδίων.....	21
Σχήμα 2.2:	Λογαριθμικές-κανονικές κατανομές αστικών αερολυμάτων για τον πληθυσμό, την μάζα, και τον όγκο τους.....	25
Σχήμα 2.3:	Αντιπροσωπευτική λογαριθμική-κανονική κατανομή όγκου των αστικών αερολυμάτων.....	26
Σχήμα 2.4:	Ενεργειακό ισοζύγιο ακτινοβολίας.....	27
Σχήμα 2.5:	Σκέδαση MIE.....	33
Σχήμα 2.6:	Είδη ακτινοβολιών που υπεισέρχονται στην οπτική διαδρομή.....	34
Σχήμα 2.7:	Μεταφορά ενέργειας ακτινοβολίας.....	37
Σχήματα 3.1:	(α) τομή ενός ανθρώπινου ματιού.....	41
	(β) σχεδιασμός του αμφιβληστροειδούς με ραβδία και κυανολαβή, ερυθρολαβή και χλωρολαβή κωνία.....	41
Σχήμα 3.2:	Σχετική ευαισθησία των κωνίων συναρτήσει των μηκών κύματος.....	43
Σχήμα 3.3:	Συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης CMFs για οπτικό πεδίο 2°.....	45
Σχήμα 3.4:	Συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης CMFs για οπτικό πεδίο 10°.....	46
Σχήμα 3.5:	Ορατό φάσμα στο διάγραμμα χρωματικότητας.....	48
Σχήμα 3.6:	Καμπύλη χρωματικότητας μέλανος σώματος.....	49
Σχήμα 3.7:	Φάσματα ακτινοβολίας πρότυπων φωτιστικών πηγών.....	50
Σχήμα 4.1:	Πρώτο στάδιο της έρευνας.....	55
Σχήμα 4.2:	Δεύτερο στάδιο της έρευνας.....	56
Σχήμα 4.3:	Χαρακτηριστικές κατανομές όγκου – ακτίνας σωματιδίου για αστικά αερολύματα από το σύστημα AERONET για την πόλη του Μεξικού, το Παρίσι και τις Μαλδίβες.....	58
Σχήμα 4.4:	Συγκεντρώσεις σωματιδιακής μάζας νιτρικών PM1-10 για την 19η Μαΐου 2008.....	60
Σχήμα 4.5:	Οπτική γεωμετρία μοντέλου χρωματικού στόχου – παρατηρητή.....	63

Σχήμα 4.6: CIE RGB συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης από τους Stiles και Burch για οπτικό πεδίο 2° 10 παρατηρητών.....	64
Σχήμα 4.7: CIE συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης για τον πρότυπο παρατηρητή κατά CIE 1931 (2°) και CIE 1964 (10°).....	64
Σχήματα 4.8:(a) Δείγμα από τεστ Ishihara.....	65
(b) Τεστ Farnsworth-Munsell.....	65
Σχήμα 4.9: Παράδειγμα Ψυχομετρικής Συνάρτησης.....	68
Σχήμα 4.10: Μέθοδος υποχρεωτικής επιλογής.....	70

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Παράμετροι μοντέλου αερολύματος συστήματος AERONET.....	59
Πίνακας 4.2: Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος με τη μέθοδο των ορίων.....	67
Πίνακας 4.3: Τριετές χρονοδιάγραμμα εργασιών.....	72

Κεφ. 1: Εισαγωγή

1.1 Η σημασία της έρευνας

Η ύπαρξη αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα έχει ως αποτέλεσμα μία σειρά επιπτώσεων στο περιβάλλον και τον άνθρωπο, είτε έμμεσες, είτε άμεσες και αντιληπτές. Μία από τις τελευταίες είναι στον τομέα της όρασης, όπου λόγω της παρουσίας σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, τα οποία σκεδάζουν ή απορροφούν την ακτινοβολία, προκαλείται μείωση της ορατότητας, καθώς και εξασθένηση της αντίθεσης των χρωμάτων στα παρατηρούμενα αντικείμενα [Watson and Chow, 1994]. Η ορατότητα ορίζεται ως ο βαθμός στον οποίον η ατμόσφαιρα είναι διαφανής στο ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [National Research Council, 1993; EPA, 1996].

Η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να αποδυναμώσει σκηνές με γραφική θέα, να εξαφανίσει μακρινά αντικείμενα, να εξασθενίσει την αντίθεση από μία εικόνα και να αποχρωματίσει τον ουρανό [Haralabidis and Pilinis 2008; Dogras et al., 2003; Bodrogi and Tarczali, 2000]. Κάποιο ποσοστό της μείωσης της ορατότητας είναι αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών, όπως σωματιδίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα της γης, αιωρούμενη σκόνη, ηφαιστειακές εκρήξεις, πυρκαγιές, υπολείμματα φυτών, βιογενείς υδρογονάνθρακες, θαλάσσιο αλάτι, κ.ά.

Όμως, μεγάλο μέρος της οπτικής ποιότητας της ατμόσφαιρας προέρχεται από ανθρωπογενείς εκπομπές σωματιδίων και αερίων, που μετασχηματίζονται σε σωματίδια μετά την εκπομπή τους (δευτερογενή αερολύματα), ενώ έχουν δημοσιευτεί εκθέσεις για το κατά πόσο οι ρύποι σχετίζονται με την ορατότητα και τις χρωματικές αλλοιώσεις [Hyslop, 2009; Gedzelman, 2007; Watson, 2002; Watson and Chow, 1994; Seinfeld, 1986].

Η παρουσία ατμοσφαιρικών σωματιδίων λοιπόν, είναι μία από τις κυριότερες αιτίες μείωσης της ορατότητας και επηρεάζει τα χρωματικά χαρακτηριστικά των παρατηρούμενων αντικειμένων που βρίσκονται σε εξωτερικούς χώρους [Hyslop, 2009; Gedzelman, 2007]. Ειδικότερα, οι ανθρωπογενείς εκπομπές αερολυμάτων είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνες για μεταβολές στην ορατότητα [Watson, 2002]. Πολλές φορές, από παρατηρήσεις, φωτογραφίες και μετρήσεις διαπιστώνεται ότι η μείωση της ορατότητας είναι πιο έντονη και πιο συχνή από όσο θα έπρεπε σε αρκετές,

αστικές και μη, περιοχές [Watson, 2002; Larson et al., 1988]. Η μείωση της ορατότητας έχει, με τη σειρά της, σαν συνέπεια τη χρωματική εξασθένηση του περιβάλλοντα χώρου. Η καθαρότητα και η ένταση των χρωμάτων των αντικειμένων στους εξωτερικούς χώρους, όπως και η διατήρηση των χαρακτηριστικών των αξιοθέατων, είναι ζητούμενα τα οποία, σαφώς, κρίνονται απαραίτητα για την ποιότητα της προσλαμβάνουσας εικόνας [Latimer et al., 1981].

Η ορατότητα είναι ένας περιβαλλοντικός παράγοντας, ιδιαίτερα σημαντικός όχι μόνο για την ασφάλεια (πρόκληση ατυχημάτων σε ακραίες περιπτώσεις), αλλά και για αισθητικούς λόγους, καθώς η ανθρώπινη ψυχολογία και φυσιολογία είναι ευαίσθητη στα οπτικά ερεθίσματα [Kim and Kim, 2005; Watson, 1994]. Παράλληλα, οι υπάρχοντες περιορισμοί και κανονισμοί στην Ευρώπη, γύρω από τα θέματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης αφορούν περισσότερο τον τομέα της υγείας και θεωρούνται αδύναμοι στα θέματα προστασίας της ορατότητας [Hyslop, 2009]. Επίσης, υπάρχει σύνδεση της μείωσης της ορατότητας, με την ανθρώπινη υγεία, καθώς τα σωματίδια που προκαλούν σε μεγαλύτερο βαθμό μείωση της ορατότητας, είναι υπεύθυνα για επιπτώσεις και στην υγεία [Fact Sheet, 2008].

Αντίθετα, η ορατότητα και οι μετρήσεις αυτής, θεωρούνται σημαντικές από τον Αμερικάνικο Οργανισμό Προστασίας Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency, EPA). Σκοπός των μετρήσεων αυτών είναι η διατήρηση, ή βελτίωση της οπτικής ποιότητας της ατμόσφαιρας σε συγκεκριμένες περιοχές φυσικού κάλλους. Πιο συγκεκριμένα από το 1977, το Αμερικάνικο Κογκρέσο νομοθέτησε το λεγόμενο “Clean Air Act”, ώστε να εμποδιστεί η μελλοντική υποβάθμιση και να βελτιωθεί η ορατότητα αυτών των περιοχών [Hyslop, 2009]. Το 1999 η EPA εξέδωσε ειδικό κανονισμό (Regional Haze Rule, RHR), όπου υποχρεώνει τις πολιτειακές και ομοσπονδιακές υπηρεσίες να συνεργαστούν για τη βελτίωση της ορατότητας [Watson, 2002].

Γενικά, η ορατότητα είναι μια έννοια ανθρωποκεντρική, στενά συνδεδεμένη με το ανθρώπινο οπτικό σύστημα (HVS) [Pratt, 1991]. Οι έρευνες σχετικά με τη μείωση της ορατότητας και την επίδρασή της στην οπτική αντίληψη είναι περιορισμένες. Από αυτές εξαιρετικά σημαντική είναι η έρευνα που οδήγησε στον ορισμό της μονάδας ορατότητας deciview [Pitchford and Malm, 1994].

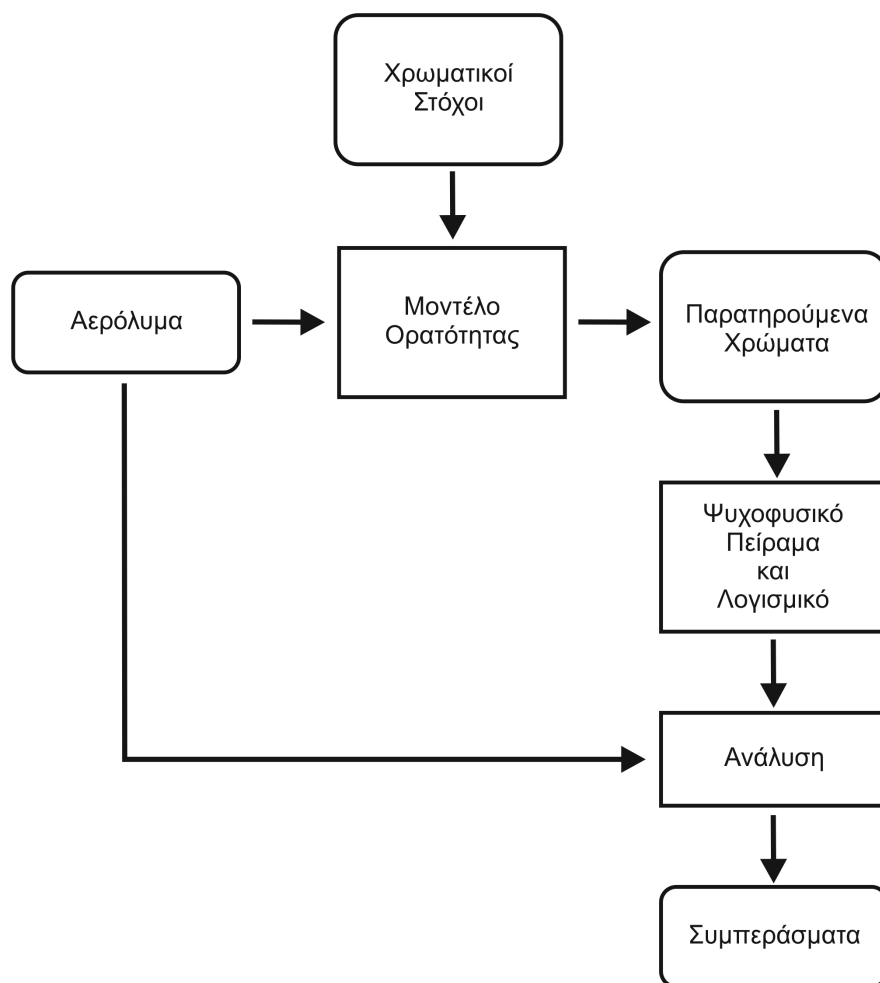
Η σχετική μελέτη συνδέει την εξασθένηση της ακτινοβολίας από την ατμοσφαιρική σκέδαση με ιδιότητες της ανθρώπινης αντίληψης (αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο). Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη της μνήμης του χρώματος, η οποία “θυμάται” και προσπαθεί να αναπαράγει το χρώμα, ακόμη και αν το ερέθισμα είναι διαφορετικό από το αρχικό χρώμα [Bodrogi and Tarczali, 2000]. Μελέτες έχουν γίνει και για τις μεταβολές στο χρώμα του ουρανού, συναρτήσει των βασικών χαρακτηριστικών του αερολύματος [Haralabidis and Pilinis, 2005; 2008; Hernandez-Andrés et al., 2001]. Επίσης, έχει αναπτυχθεί η θεωρία του χρωματικού σχίσματος, όπου διαχωρίζεται από τον παρατηρητή, η εικόνα από τον παράγοντα ο οποίος την αλλοιώνει και ο τελευταίος γίνεται αντιληπτός ως ένα ξεχωριστό στρώμα ομίχλης, μέσα από το οποίο παρατηρείται η εικόνα [Henry, 1987].

Για όλους τους παραπάνω λόγους, κρίνεται απαραίτητο να μελετηθεί, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, η ευαισθησία της ανθρώπινης αντίληψης στις χρωματικές μεταβολές, λόγω της παρουσίας αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα. Σκοπός είναι, μετά το πειραματικό μέρος της παρούσας μελέτης, να προσδιοριστούν οι παράμετροι της σε σχέση με τις αερολυματικές συγκεντρώσεις.

1.2 Η ερευνητική πρόταση

Η πρόταση που θα παρουσιαστεί φιλοδοξεί να διερευνήσει τη σχέση ανάμεσα στις αλλοιώσεις χρώματος των αντικειμένων, οι οποίες παρατηρούνται μέσω ατμόσφαιρας, παρουσία αερολυματικής ρύπανσης και της ευαισθησίας της αντιληπτικής ικανότητας των παρατηρητών σε αυτές τις μεταβολές. Η παρούσα ερευνητική πρόταση αποτελείται από δύο βασικά τμήματα: Ένα στάδιο προσομοίωσης και ένα πειραματικό, ενώ τα προϊόντα της προσομοίωσης, θα εισαχθούν στο πειραματικό στάδιο.

Η προτεινόμενη έρευνα θα επιδιώξει την ανάπτυξη ενός μοντέλου προσομοίωσης σε συνδυασμό με πειράματα ψυχοφυσικών μεθόδων, γεγονός που αποτελεί μία καινοτόμο προσέγγιση στις περιβαλλοντικές επιστήμες. Τα διαφορετικά στάδια της προτεινόμενης μελέτης φαίνονται στο Σχήμα 1.1 της επόμενης σελίδας. Αναλυτικότερα:

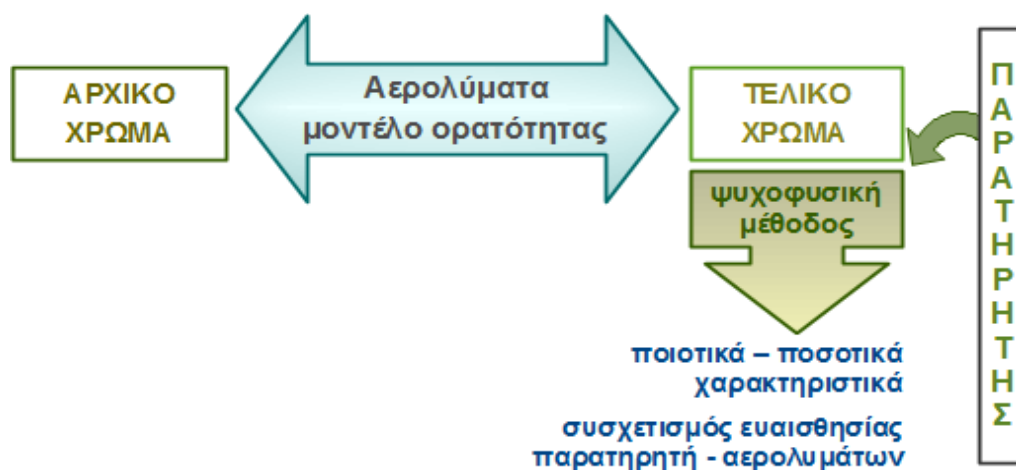


Σχήμα 1.1: Ροοδιάγραμμα εργασιών

Στο πλαίσιο της μελέτης αρχικά θα καθοριστεί το σύνολο των υπό εξέταση χαρακτηριστικών ενός αερολύματος (κατανομή αριθμού / μάζας, χημική σύσταση κ.λ.π.), τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των οπτικών ιδιοτήτων του εκάστοτε αερολύματος. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν, για να υπολογιστεί η ορατότητα του αντικειμένου (μοντέλο ορατότητας), μέσα από την ατμόσφαιρα με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Το μοντέλο αυτό θα υπολογίσει την προσλαμβάνουσα ακτινοβολία από “πρότυπο” παρατηρητή και με βάση αυτή και την αρχική ακτινοβολία του στόχου, θα αναπτυχθεί ένα λογισμικό προσομοίωσης, προκειμένου να παραχθούν συνθετικές εικόνες, οι οποίες θα αναπαριστούν τις χρωματικές αλλοιώσεις αντικειμένων παρατηρούμενες διαμέσου ατμόσφαιρας με ρύπους.

Στη συνέχεια, οι εικόνες αυτές θα συγκροτήσουν μία βάση δεδομένων για να πραγματοποιηθεί σύγκριση και αντιστοίχιση, από πραγματικούς παρατηρητές, των χρωματικών μεταβολών του στόχου, με διαφορετικά χαρακτηριστικά αιωρουμένων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα, προτείνεται η εκτέλεση πειραμάτων, βασισμένα σε ψυχοφυσικές[†] μεθόδους, όπου θα προβάλλονται οι χρωματικές εικόνες σε παρατηρητές. Η διαδικασία εκτέλεσης των πειραμάτων αυτών, έχει ως εξής:

Οι παρατηρητές, με σύγκριση των χρωματικών εικόνων από περιπτώσεις διαφορετικών χαρακτηριστικών του αερολύματος, και επομένως οπτικών ιδιοτήτων της ατμόσφαιρας, θα προσδιορίσουν τις ελάχιστες χρωματικές μεταβολές για τα αντικείμενα, οι οποίες θα καθορίσουν τα κατώφλια ευαισθησίας (ουδούς) για τους χρωματικούς στόχους στις διαφορετικές αερολυματικές συνθήκες. Έπειτα, θα εξαχθούν οι ποιοτικές και ποσοτικές παράμετροι των μεταβολών, ενώ θα γίνει και ο απαραίτητος συσχετισμός με την ικανότητα του παρατηρητή να διακρίνει την παρουσία αερολυμάτων. Τέλος, τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων θα εισαχθούν σε στατιστική ανάλυση, από όπου θα εξαχθούν τα συμπεράσματα και θα αξιολογηθούν τα αποτελέσματα.



Σχήμα 1.2: Πλαίσιο εργασιών

Στο Σχήμα 1.2, εικονίζεται το γενικότερο πλαίσιο των εργασιών - εννοιών που θα πραγματοποιηθούν, καθώς και της μεταξύ τους σύνδεσης. Το μοντέλο ορατότητας και η χρωματομετρία, μέσα από τη χρήση στάνταρ χρωματικών χώρων, αποτελούν τη

[†] Η Ψυχοφυσική είναι τμήμα της ψυχολογίας που ερευνά τις σχέσεις μεταξύ του φυσικού ερεθίσματος και των ιδιοτήτων της αντίληψής του [Καφετζόπουλος, 2011].

“γέφυρα” ανάμεσα στα χαρακτηριστικά του αερολύματος και στο ανθρώπινο οπτικό σύστημα.

Η ψυχοφυσική μέθοδος θα επιτρέψει την εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων, για την ικανότητα του παρατηρητή να αντιλαμβάνεται χρωματικές διαφορές, οφειλόμενες σε μεταβολές του ατμοσφαιρικού αερολύματος. Η μελέτη της απόκρισης του παρατηρητή κρίνεται σημαντική, καθώς από προϋπάρχουσες μελέτες, έχει αποδειχθεί ότι ο μέσος παρατηρητής (CIE) μπορεί να προσεγγιστεί από φωτογραφική μηχανή, εφοδιασμένη με ειδικό λογισμικό [Haralabidis and Pilinis, 2008].

1.2.1 Περιγραφή των στόχων

Η προτεινόμενη μελέτη επιδιώκει να συμβάλλει στη μελέτη της οπτικής ποιότητας της ατμόσφαιρας με έμφαση στη ρύπανση ανθρωπογενούς προέλευσης, όπως αυτή που παρατηρείται στις αστικές περιοχές. Τα ερευνητικά προϊόντα τα οποία αναμένεται να εξαχθούν, σχετίζονται με τα επιμέρους χαρακτηριστικά των αερολυμάτων, με αναφορά πάντα, την απόκριση του παρατηρητή στις μεταβολές αυτών. Συνοπτικά, θα επιδιωχθεί:

- ▲ Ο άμεσος συσχετισμός βασικών χαρακτηριστικών των αερολυμάτων με τις ελάχιστα αντιληπτές χρωματικές μεταβολές. Τέτοια χαρακτηριστικά αποτελούν:
 - α) τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατανομής αριθμού ή μάζας του αερολύματος (μέση τιμή, διασπορά κατανομής, κ.ά) [Seinfeld and Pandis, 1998; Haralabidis and Pilinis, 2008],
 - β) η συνολική εικόνα της χημικής σύστασης, όπως αυτή εκφράζεται από το δείκτη διάθλασης [Seinfeld and Pandis, 1998; Haralabidis and Pilinis, 2008],
 - γ) τα επιμέρους χαρακτηριστικά της χημικής σύστασης, όπως φορτίο νερού, στοιχειακός άνθρακας κ.λ.π.
- ▲ Η εξάλειψη της παραμέτρου του χρώματος από τον υπολογισμό των χρωματικών διαφορών. Αναλυτικότερα, αν υποθεθεί ότι $F_{AB}(A,B)$ είναι η αρχική φόρμουλα-συνάρτηση υπολογισμού χρωματικής διαφοράς, δύο χρωμάτων A και B, όπου A το αρχικό χρώμα. Μετά το πέρας της μελέτης, θα έχει διερευνηθεί η δυνατότητα δημιουργίας μίας νέας φόρμουλας-συνάρτησης,

$F'_{\Delta E}(\)$ ειδικά για εφαρμογή στην ορατότητα. Η νέα αυτή φόρμουλα θα δίνει έμφαση στο αερολυματικό φορτίο, με την ελάχιστη δυνατή πολυπλοκότητα. Η συνάρτηση αυτή, $F'_{\Delta E}$, θα λαμβάνει σαν παραμέτρους τόσο το χρώμα A , όσο και τα χαρακτηριστικά του αερολύματος τα οποία μεταβλήθηκαν, ($F'_{\Delta E}(A, k_i)$, όπου k_i ένα χαρακτηριστικό, ή ένα σύνολο χαρακτηριστικών). Στα αποτελέσματα της φόρμουλας αυτής, θα συνυπολογίζεται η πραγματική διακριτική ικανότητα του παρατηρητή σε μεταβολές της αερολυματικής ρύπανσης, όπως αυτή έχει προσδιοριστεί από τη σχετική πειραματική μελέτη.

Στο επόμενο Σχήμα (1.3) εικονίζεται το αρχικό ζητούμενο (υπολογισμός χρώματος B) και το επιθυμητό αποτέλεσμα μετά την έρευνα. Η δημιουργία μίας φόρμουλας – συνάρτησης $F_{\Delta E}$, η οποία θα δέχεται το φάσμα του χρώματος A και με την επίδραση των χαρακτηριστικών κάποιου τύπου αερολύματος, θα δίνει τη διαφορά και θα προσδιορίζει το τελικό χρώμα.



Σχήμα 1.3: Φόρμουλα Χρωματικής Διαφοράς

- ▲ Τέλος, ένα σημαντικό προϊόν θα είναι η ανάπτυξη εξειδικευμένου αρθρωτού λογισμικού, το οποίο θα εφαρμοστεί, προκειμένου να προσομοιωθούν οι μεταβολές χρώματος από το μοντέλο ορατότητας, για την υλοποίηση του πειραματικού τμήματος της έρευνας, καθώς, ασφαλώς και η βελτίωση υπάρχοντος λογισμικού.

1.2.2 Εμπλεκόμενα γνωστικά αντικείμενα

Η εκπόνηση αυτής της διατριβής απαιτεί ένα μεγάλο εύρος γνώσεων και την εμπλοκή σε αυτή διαφορετικών και ποικίλων θεματικών πεδίων. Στα κυρίαρχα γνωστικά αντικείμενα ανήκει η επιστήμη του περιβάλλοντος με έμφαση στην ατμοσφαιρική φυσική και ειδικότερα η θεωρία διάδοσης ακτινοβολιών στην ατμόσφαιρα (σκέδαση Mie, μοντέλα ορατότητας, κ.ά). Το πεδίο της ψυχοφυσικής με την εφαρμογή μεθόδων της, εμπλέκεται στο πειραματικό τμήμα της διατριβής. Στα γνωστικά αντικείμενα περιλαμβάνεται επίσης, η επιστήμη της χρωματομετρίας και ειδικότερα οι παρατηρησιακά ομογενείς χρωματικοί χώροι [Kim and Kim, 2005], καθώς και οι χρωματικές διαφορές [Sharma, 2003].

Ακόμη, θα απαιτηθεί προγραμματισμός σε γλώσσες Υπολογιστών (Mathematica, Visual Basic, C++) για τη δημιουργία του μοντέλου ορατότητας και την προσομοίωση που θα χρησιμοποιηθεί στο πειραματικό κομμάτι, καθώς και πολύ καλή γνώση και χρήση του λογισμικού MODTRAN (Air Force Research Laboratory AFRL/VSBM, Hanscom AFB, MA), από το οποίο αποτελέσματα θα εισαχθούν στο μοντέλο ορατότητας.

1.3 Διασύνδεση με τμήμα περιβάλλοντος

Η παρούσα πρόταση διατριβής έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του διδακτορικού προγράμματος του Τμήματος Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Κάποιες από τις επιστήμες που διέπουν το Τμήμα Περιβάλλοντος ανήκουν στις βασικές, όπως η Φυσική, η Χημεία, η Βιολογία και τα Οικονομικά. Επίσης, “νεότερες” επιστήμες όπως η Οικολογία, η Περιβαλλοντική Μηχανική, η Χωροταξία, η Χαρτογραφία, η Κοινωνιολογία, η Περιβαλλοντική Αγωγή και Εκπαίδευση έχουν τη δική τους θέση και σημασία στην Περιβαλλοντική Έρευνα και γενικότερα στον τομέα του Περιβάλλοντος.

Η συγκεκριμένη διατριβή έχει τη βάση της στην Περιβαλλοντική Μηχανική, καθώς επιχειρεί να συνδέσει τα ατμοσφαιρικά αερολύματα, μέσα από τον προσδιορισμό των οπτικών τους χαρακτηριστικών, με την εξασθένηση της ορατότητας. Επίσης, η παρούσα έρευνα, λόγω της μελέτης της επίδρασης των ατμοσφαιρικών ρύπων στην ανθρώπινη όραση και των επιπτώσεών τους στην οπτική αντίληψη των χρωμάτων, άπτεται θεμάτων Ανθρώπινης Φυσιολογίας, Ψυχοφυσικής,

Οικολογίας, Μελέτης και Αντιμετώπισης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων, καθώς και ζητημάτων Περιβαλλοντικής Πολιτικής και Διαχείρισης. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης φιλοδοξούν να εξάγουν συμπεράσματα, τα οποία ως στόχο θα έχουν, με την συμβολή τους, την προστασία της ποιότητας της ανθρώπινης ζωής, όπως και τη διαφύλαξη της αισθητικής των περιοχών φυσικού κάλλους, μνημείων και άλλων περιβαλλοντικών στοιχείων.

Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι η προτεινόμενη μελέτη αποτελεί φυσική συνέχεια εν εξελίξει έρευνας του τμήματος [Haralabidis and Pilinis, 2008; 2005]. Αποτελέσματα της προτεινόμενης μελέτης αναμένεται να ενισχύσουν περαιτέρω τα υπάρχοντα επίπεδα τεχνογνωσίας του τμήματος.

1.4 Κριτήρια ανάπτυξης της μελέτης

Η προτεινόμενη αυτή διδακτορική μελέτη θα αποτελέσει μία καινοτόμο προσπάθεια, κατά την οποία, δεδομένα της περιβαλλοντικής έρευνας στον τομέα της ατμοσφαιρικής φυσικής, θα συνδεθούν με την επιστήμη της χρωματομετρίας και την ανθρώπινη οπτική αντίληψη.

Επίσης, ιδιαίτερη προσοχή θα δοθεί στην εκτεταμένη παραμετροποίηση του προτεινόμενου προς ανάπτυξη λογισμικού (μοντέλο ορατότητας, λογισμικό πειράματος). Αποτέλεσμα αυτής θα είναι η δυνατότητα χρήσης όλων των νέων εργαλείων για την επέκταση υπάρχοντων τεχνικών και την διεξαγωγή νέων ερευνών. Παράλληλα, η εγκυρότητα των επιμέρους σταδίων και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων τους, θα επιβεβαιώνονται διαρκώς, καθώς η ανάπτυξη της έρευνας για κάθε τμήμα, θα βασίζεται σε προηγούμενες έγκυρες μελέτες και έρευνες, καθώς και σε ευρέως αποδεκτά πρότυπα χρωματομετρίας.

Ειδικότερα, η δημιουργία αρθρωτού λογισμικού θα διευκολύνει την απομόνωση και εκμετάλλευση των ξεχωριστών τμημάτων κώδικα, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε νέες εφαρμογές, καθώς και να υπάρξει διασύνδεση με ήδη υπάρχοντες κώδικες. Τέλος, τα αποτελέσματα της έρευνας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία πληθώρα εφαρμογών και περαιτέρω επιστημονικών μελετών που σχετίζονται με τις επιστήμες του Περιβάλλοντος, αλλά και σε άλλους επιστημονικούς τομείς, στους οποίους θα μπορούσαν να συνεισφέρουν.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύχθηκαν θέματα, όπως η σημασία και ο σκοπός της έρευνας, η παρουσίαση της ερευνητικής πρότασης και άλλες πληροφορίες σχετικές με αυτήν. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία εκτενέστερη βιβλιογραφική αναφορά στην έρευνα για τα ατμοσφαιρικά αερολύματα και τη διάδοση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Επίσης, γίνεται αναφορά σε χρήσιμες, για την παρούσα μελέτη, προϋπάρχουσες έρευνες. Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει βασικές έννοιες της επιστήμης της χρωματομετρίας. Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται αναλυτικότερα το σχέδιο υλοποίησης της προτεινόμενης διδακτορικής διατριβής, οι ψυχοφυσικές μέθοδοι, η οργάνωση εργασιών της, καθώς και τα προσδοκώμενα αποτελέσματά της.

Κεφ. 2: Αερολύματα και Ακτινοβολία

2.1 Ατμοσφαιρικά αερολύματα

Μία από τις κύριες επιπτώσεις της ύπαρξης ρύπων στην ατμόσφαιρα είναι η ελάττωση της ορατότητας. Ειδικότερα, η παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση, καθώς και την εξασθένηση της αντίθεσης των χρωμάτων των παρατηρούμενων αντικειμένων [Watson and Chow 1994]. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση αυτών, κρίνεται απαραίτητη μία εκτενής αναφορά στις ιδιότητες, καθώς και στα χαρακτηριστικά των αερολυμάτων.

2.1.1 Η σημασία των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων

Τα στερεά ή υγρά σωματίδια με μεταβαλλόμενη χημική σύσταση, σχήμα και μέγεθος, τα οποία βρίσκονται στην ατμόσφαιρα και έχουν διάμετρο από 2 nm έως 200 μm, ονομάζονται αερολύματα. Οι ιδιότητες των σωματιδίων αυτών μπορούν να αλλάξουν ως προς τη χημική τους σύσταση και το μέγεθός τους, καθώς συμμετέχουν σε φυσικές και χημικές μεταβολές στην ατμόσφαιρα, όπως συμπύκνωση των αερίων ειδών, εξάτμιση, συσσωμάτωση, χημικές αντιδράσεις κ.τ.λ. [Λαζαρίδης, 2010; Seinfeld and Pandis, 1998].

Στην ατμόσφαιρα εκλύεται μέσω διαφόρων πηγών, μία μεγάλη ποικιλία σωματιδίων, τα οποία κατέχουν μία σειρά από μορφολογικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες. Τέτοια παραδείγματα ατμοσφαιρικών σωματιδίων περιλαμβάνουν σωματίδια εκλυόμενα από καύσεις, φωτοχημικά παραγόμενα σωματίδια, σωματίδια αλατιού που σχηματίζονται από την επίδραση του ανέμου στη θάλασσα, επαναιωρούμενη σκόνη από το έδαφος κ.ά. και μπορούν να είναι στερεά, υγρά, ή ακόμα υγρά που περιβάλλουν έναν στερεό πυρήνα [EPA, 2004]. Τα σωματίδια αυτά μπορούν να προέρχονται είτε από φυσικές πηγές, όπως η αιωρούμενη σκόνη λόγω ανέμων, τη θάλασσα και τα ηφαίστεια, είτε από ανθρωπογενείς όπως μηχανές εσωτερικής καύσης, εργοστασιακή σκόνη κ.λ.π. [Seinfeld and Pandis, 1998].

Τα ατμοσφαιρικά αυτά σωματίδια περιέχουν ανόργανες και οργανικές ενώσεις, μέταλλα και στοιχειακό άνθρακα. Κάποια από αυτά είναι υγροσκοπικά και εμπεριέχουν νερό. Το οργανικό κλάσμα τους είναι ιδιαίτερα σύνθετο, περιέχοντας εκατοντάδες οργανικές ενώσεις. Έτσι, ενώ τα πρωτογενή σωματίδια εκπέμπονται

κατευθείαν από τις πηγές, τα δευτερογενή σχηματίζονται από αέρια μέσω χημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα, στις οποίες συμμετέχουν ατμοσφαιρικό οξυγόνο (O_2) και υδρατμοί (H_2O), ενεργά στοιχεία όπως όζον (O_3), ρίζες όπως υδροξύλιο ($\bullet OH$) και νιτρικές ρίζες ($\bullet NO_3$) και ρύποι όπως διοξείδιο του θείου (SO_2), οξείδια του αζώτου (NO_x) και οργανικές αέριες ενώσεις (NMVOC, Non-Methane Volatile Organic Compounds) από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές [EPA, 2004].

Αυτή η ποικιλότητα οφείλεται κατά μεγάλο βαθμό στον κατά πολύ μικρότερο χρόνο ατμοσφαιρικής ζωής των αερολυμάτων, αναλογικά με τα αέρια που σχετίζονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου [J.T. Houghton et al., 2001]. Λόγω του τρόπου σχηματισμού τους μπορούν να περιέχουν σωματίδια από πολλές πηγές, τα οποία αποτελούνται με τη σειρά τους από άλλα σωματίδια. Για το λόγο αυτό θεωρούνται μείγμα μειγμάτων, ενώ η σύνθεση και η συμπεριφορά τους είναι θεμελιωδώς συνυφασμένη με αυτές του περιβάλλοντος αερίου [EPA, 2004].

Οι επιδράσεις λόγω της ύπαρξης αερολυματικών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, είναι πολύ σημαντικές σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, όπως στην υγεία, στην ποιότητα αέρα, στους σχηματισμούς νεφών, στην μετεωρολογία και στο κλίμα. Τα σωματίδια αερολυμάτων με διάμετρο μικρότερη από 1 μm , επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία, διεισδύοντας στο αναπνευστικό σύστημα και ειδικά στα βαθύτερα τμήματα των πνευμόνων [Zhang et al., 2008; Miller et al., 2007; Jacobson, 2005]. Σημαντική είναι και η επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Σωματίδια με διάμετρο μεταξύ 0.2 και 1 μm που περιέχουν θεικές, νιτρικές ενώσεις και οργανικό άνθρακα σκεδάζουν αποτελεσματικά την ακτινοβολία, ενώ αυτά που περιέχουν αιθάλη, απορροφούν εντονότερα το φως [Jacobson, 2005; Watson, 2002].

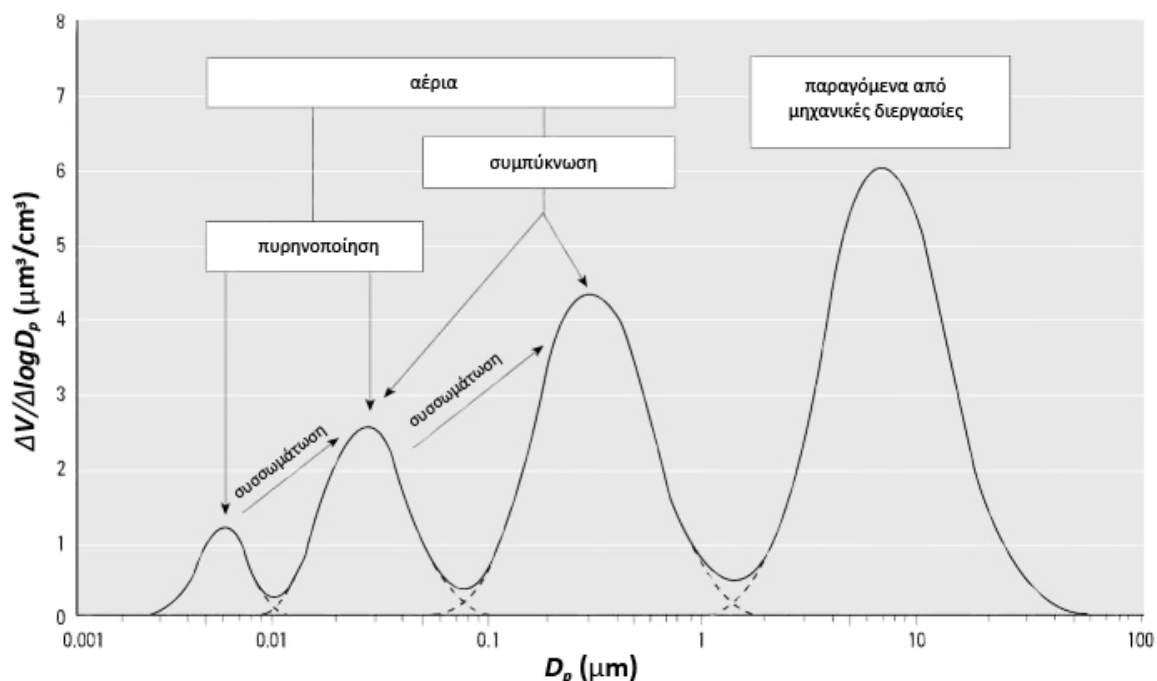
Η σκέδαση και η απορρόφηση των αερολυμάτων επιδρούν επίσης στις ενεργειακές ροές της ακτινοβολίας -και κατά συνέπεια στη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας - καθώς και στη φωτόλυση, της οποίας οι μεταβολές έχουν αντίκτυπο στη σύνθεση της ατμόσφαιρας [Jacobson, 2005].

Η οπτική ποιότητα της ατμόσφαιρας εξαρτάται σημαντικά από την αιωρούμενη ύλη της ατμόσφαιρας, καθώς συμμετέχει στην πολλαπλή σκέδαση αλλά και από τα αερολύματα κατά μήκος της οπτικής διαδρομής που επηρεάζουν την απλή (μονή) σκέδαση [Malm, 1979].

2.1.2 Κατανομές αριθμού μάζας

Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις ή παραδοχές στην κατάταξη των σωματιδίων βάση μεγέθους [EPA, 2004]. Οι τάξεις που ενδιαφέρουν την παρούσα μελέτη βασίζονται στις παρατηρούμενες κατανομές μεγέθους και μηχανισμούς σχηματισμών.

Τα σωματίδια του αερολύματος κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το μέγεθος, αλλά και τη χημική τους σύσταση, καθώς αυτά τα χαρακτηριστικά καθορίζουν κατά μεγάλο βαθμό τις επιδράσεις του αερολύματος τόσο στην ατμοσφαιρική ρύπανση, όσο και στη μετεωρολογία [Friedlander, 1970]. Μια προσεγγιστική κατανομή του όγκου των διαφόρων τάξεων του αερολύματος δίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα διαμέτρου σωματιδίων (Particle Diameter), [από EPA, 2004]

Παρακάτω δίνονται οι προσδιορισμοί των όρων που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις τάξεις που αφορούν στις κατανομές του μεγέθους [EPA, 2004].

Τάξη πυρηνοποίησης: Σωματίδια τα οποία δημιουργήθηκαν πρόσφατα με διαμέτρους κάτω από 10 nm και εντοπίστηκαν κατά τη διάρκεια διαδικασιών πυρηνοποίησης. Το κατώτατο όριο όπου επικαλύπτονται οι διαστάσεις σωματιδίων και μοριακών συμπλεγμάτων, ή μεγαλομορίων είναι αβέβαιο. Σύμφωνα με τις πρόσφατες τεχνικές οι μετρήσεις των σωματιδίων περιορίζονται στα 3 nm ή και περισσότερο.

Τάξη Aitken: Εδώ περιλαμβάνονται μεγαλύτερα σωματίδια με διαμέτρους μεταξύ 10 και 100 nm. Αυτή η τάξη μπορεί να προκύψει από αύξηση μεγέθους των μικρότερων σωματιδίων, ή πυρηνοποιήσεις από υψηλότερες συγκεντρώσεις πρόδρομων αερίων.

Τάξη συσσώρευσης: Περιλαμβάνει σωματίδια με διαμέτρους από περίπου 0.1 μm σε μόλις πάνω από το ελάχιστο των κατανομών μάζας ή όγκου, συνήθως δηλαδή ανάμεσα σε 1 και 3 μm.

Λεπτόκοκκα σωματίδια: Αφορούν τις τάξεις πυρηνοποίησης, Aitken και συσσώρευσης, σωματίδια με τη χαμηλότερη μετρήσιμη τιμή, γύρω στα 3 nm, έως μόλις πάνω από το ελάχιστο των κατανομών μάζας ή όγκου 1 με 3 μm.

Χονδρόκοκκα σωματίδια: Σωματίδια με διαμέτρους κατά βάση μεγαλύτερες από το ελάχιστο των κατανομών μάζας ή όγκου, συνήθως ανάμεσα σε 1 και 3 μm.

Υπέρλεπτα σωματίδια: Αν και δεν είναι ξεχωριστή τάξη, προσδιορίζονται γενικώς μόνο από το μέγεθος, ως σωματίδια με διαμέτρους 0.1 μm (100 nm) ή λιγότερο. Περιλαμβάνουν την τάξη πυρηνοποίησης και το μεγαλύτερο μέρος της τάξης Aitken. Προσδιορίζονται επίσης ως σωματίδια των οποίων οι ιδιότητες, λόγω του μικρού τους μεγέθους, διαφέρουν από εκείνες των μεγαλύτερων σωματιδίων.

2.1.3 Τύποι αερολυμάτων

Τα αερολύματα ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας τους διακρίνονται σε πρωτογενή και δευτερογενή [Seinfeld and Pandis, 1998; EPA, 1996].

- ▲ Τα πρωτογενή αερολύματα εκλύονται απ' ευθείας στην ατμόσφαιρα ως σωματίδια, ή ως ατμός ο οποίος μετασχηματίζει ταχέως σωματίδια μέσω πυρηνοποίησης ή συμπύκνωσης, είτε από φυσικές, είτε από ανθρωπογενείς πηγές.
- ▲ Τα δευτερογενή αερολύματα, τα οποία σχηματίζονται ως αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων πρόδρομων αερίων.

Κάποιοι τύποι αερολυμάτων αποτελούνται από σωματίδια τα οποία έχουν μεγάλο εύρος φυσικών ιδιοτήτων, οπότε είναι άστοχο να αποδοθούν σε μία συγκεκριμένη πηγή. Επίσης, είδη αερολυμάτων συχνά συνδυάζονται για να δημιουργήσουν ετερογενή σωματίδια με οπτικές ιδιότητες και χρόνο ζωής

διαφορετικά από αυτών των συστατικών τους. Στο συνδυασμό δευτερογενών και πρωτογενών αερολυμάτων μπορούν να αποδοθούν τα κύρια οπτικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη διάδοση της ακτινοβολίας σε ανέφελη ατμόσφαιρα [Kokhanovsky, 2008]. Τέλος, τα σύννεφα επηρεάζουν τα αερολύματα, είτε παγιδεύοντάς τα, είτε προσθέτοντας μάζα σε αυτά [Houghton et al., 2001]. Η πολυπλοκότητα όλων αυτών των φαινομένων, καθώς και η αλληλεπίδρασή τους με την ακτινοβολία, καταδεικνύουν την ανάγκη, αλλά και τη δυσκολία επιλογής μοντέλων αερολυμάτων.

Ένας άλλος παράγοντας είναι οι πηγές εκπομπής των αερολυμάτων, οι οποίες καθορίζουν και το είδος τους. Έτσι υπάρχουν τα βιογενή αερολύματα, τα οποία εκλύονται από φυσικές πηγές, οι οποίες δεν εξαρτώνται από τον ανθρώπινο παράγοντα, όπως σκόνη από ερήμους η οποία μεταφέρεται υπό την επίδραση ισχυρών ανέμων σε μεγάλες αποστάσεις, καπνός από δασικές πυρκαγιές, ηφαιστειακή τέφρα, κ.ά. και τα ανθρωπογενή αερολύματα, τα οποία παράγονται από μηχανές εσωτερικής καύσης, ή σαν αποτέλεσμα γεωργικών εργασιών και άλλων ανθρωπίνων δραστηριοτήτων.

Τα ανθρωπογενή αερολύματα αν και αντιστοιχούν στο 10% της παγκόσμιας σωματιδιακής ροής, έχουν σημαντική συνεισφορά στην οπτική ποιότητα της ατμόσφαιρας, όπως αυτή εκφράζεται από το οπτικό πάχος [Kokhanovsky, 2008; Seinfeld and Pandis, 1998]. Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς τα ανθρωπογενή αερολύματα αποτελούν ένα “νέος ρυθμιστικό παράγοντα”, λόγω του ό,τι δεν εκπέμπονταν στην προ-βιομηχανική εποχή [Tsigaridis et. al., 2006]

Ανάλογα με το γεωγραφικό τους προσδιορισμό, τα αερολύματα διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- ▲ Αστικά αερολύματα. Είναι μείγματα πρωτογενών σωματιδιακών εκπομπών από εργοστάσια, συγκοινωνία, παραγωγή ενέργειας καθώς και φυσικές πηγές. Αποτελούνται ακόμα από δευτερογενή σωματίδια τα οποία δημιουργούνται από μηχανισμούς μετατροπής αερίων σε σωματίδια [Seinfeld and Pandis, 1998]. Κυρίως τα αστικά αερολύματα θα ληφθούν υπόψη την παρούσα έρευνα και για το λόγο αυτόν παρουσιάζονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.
- ▲ Θαλάσσια αερολύματα. Τα αερολύματα αυτά σχηματίζονται κατά βάση λόγω της επίδρασης του ανέμου στις θάλασσες και στους ωκεανούς. Ο κυματισμός

απελευθερώνει στην επιφάνεια σωματίδια θαλασσίου άλατος, θεικές ενώσεις, κ.ά., όπως και οργανική μάζα [Lewis and Schwartz, 2004].

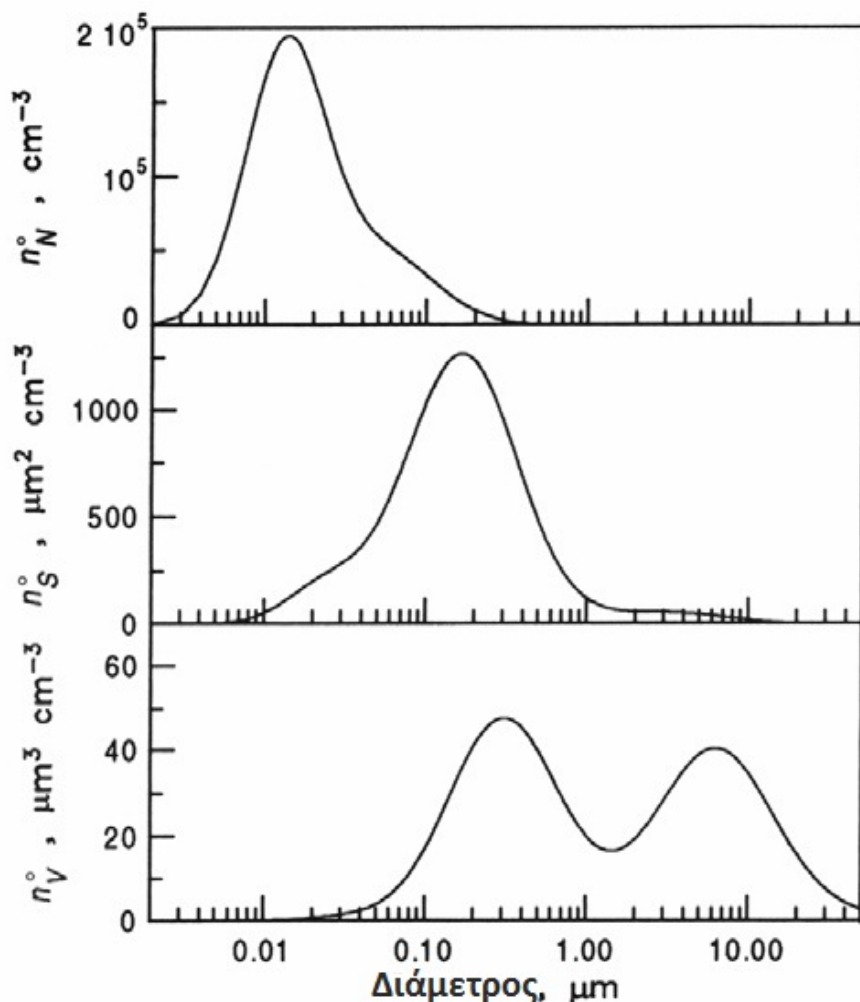
- ▲ Ηπειρωτικά αερολύματα. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των αερολυμάτων είναι φυσικής προέλευσης, με μικρότερη συμμετοχή σωματιδίων εκλυομένων από ανθρωπογενείς πηγές [Seinfeld and Pandis, 1998].
- ▲ Απομακρυσμένα ηπειρωτικά αερολύματα. Περιέχουν κυρίως πρωτογενή σωματίδια όπως σκόνη, γύρη, θραύσματα από φυτά και δευτερογενή προϊόντα οξείδωσης [Seinfeld and Pandis, 1998].
- ▲ Αερολύματα ελεύθερης τροπόσφαιρας, τα οποία βρίσκονται στη μεσαία και ανώτερη τροπόσφαιρα.
- ▲ Πολικά αερολύματα με χαμηλές συγκεντρώσεις κοντά στην επιφάνεια της Αρκτικής και Ανταρκτικής [Seinfeld and Pandis, 1998].
- ▲ Σκόνη η οποία εκλύεται από τις ερήμους και βρίσκεται κατά κύριο λόγο στις περιοχές αυτές, ή και στο ευρύτερο περιβάλλοντα χώρο, ανάλογα με τα ανεμολογικά πεδία.

2.1.4 Αστικά αερολύματα

Η μελέτη των Dubovic et al. [2002] καταδεικνύει το σύνολο των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των αστικών αερολυμάτων. Στη διαμόρφωση των αστικών αερολυμάτων συμμετέχουν πρωτογενείς πηγές εκπομπής σωματιδίων (βιομηχανίες, μηχανοκίνητα τροχοφόρα, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας), αλλά και φυσικές πηγές. Ακόμα, στην παραγωγή των αιωρούμενων σωματιδίων συμμετέχουν δευτερογενείς διαδικασίες, όπως η μετατροπή από αέρια σε σωματιδιακή κατάσταση.

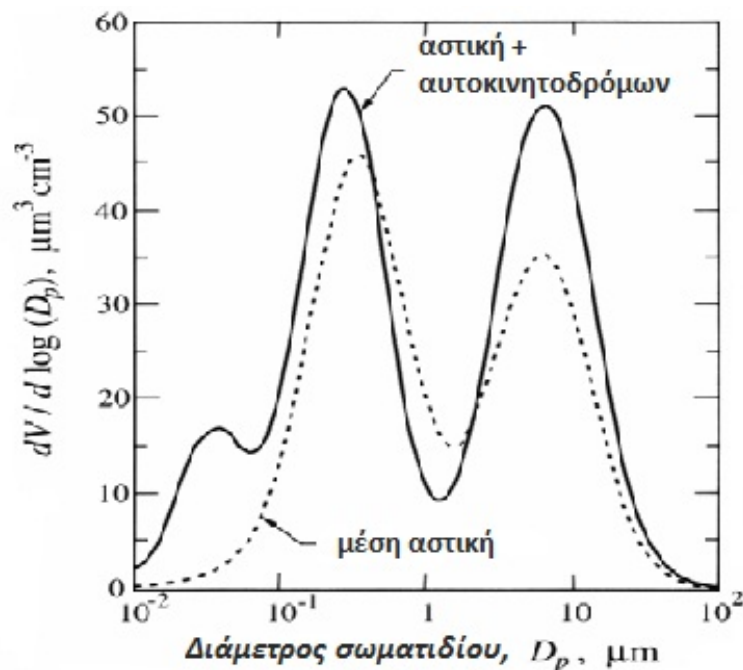
Στις αστικές περιοχές η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων διαφέρει ανάλογα με την πηγή τους. Οι μηχανικές διεργασίες δημιουργούν και διαμορφώνουν τα μεγαλύτερα σωματίδια, τα οποία αποτελούνται από υλικά του φλοιού της γης (crustal material), θαλάσσιο αλάτι, αιωρούμενη στάχτη κ.τ.λ. Αντίθετα τα μικρότερα σωματίδια προέρχονται κυρίως από μηχανές εσωτερικής καύσης ή σχηματίζονται από δευτερογενείς διεργασίες, και περιέχουν νιτρικά, αμμωνιακά, θειικά ή και άλλα ανόργανα ή οργανικά συμπλέγματα [Molenár και Mészáros, 2001; Seinfeld και Pandis, 1998; Larson et al., 1988].

Η αριθμητική τους κατανομή κυριαρχείται από μικρά σωματίδια (<0,1 μm). Αντίθετα η κατανομή του όγκου - μάζας τους εμφανίζει μία περιοχή συσσώρευσης (accumulation mode) και μία περιοχή με μεγαλύτερα σωματίδια (coarse mode). Η επόμενη εικόνα (Σχήμα 2.2) παριστά τυπικές κατανομές των αστικών αερολυμάτων.



Σχήμα 2.2: Λογαριθμικές-κανονικές κατανομές αστικών αερολυμάτων για τον πληθυσμό, την μάζα, και τον όγκο τους [από Seinfeld και Pandis, 1998].

Τα αστικά αερολύματα εμφανίζουν εξαιρετικά υψηλές συγκεντρώσεις μικρών σωματιδίων (< 0,1 μm) κοντά στις πηγές εκπομπής τους, ενώ η συγκέντρωσή τους ελαττώνεται ταχύτατα με την απομάκρυνσή τους από τις πηγές. Εντούτοις, η αντιπροσωπευτική εικόνα της μέσης κατάστασης του αστικού αερολύματος κυριαρχείται από δύο ζώνες [Seinfeld και Pandis, 1998], όπως φαίνεται στο επόμενο Σχήμα (2.3).



Σχήμα 2.3: Αντιπροσωπευτική λογαριθμική-κανονική κατανομή όγκου των αστικών αερολυμάτων. Η συνεχής γραμμή αφορά δείγματα κοντά σε αυτοκινητόδρομους πόλεων. Η διακεκομμένη γραμμή είναι η “μέση” αστική κατανομή [από Seinfeld and Pandis, 1998].

Σύμφωνα με τις προηγούμενες παρατηρήσεις, για τον καθορισμό ενός αερολυματικού μοντέλου είναι σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν διπλές κατανομές. Αυτό αποδεικνύεται και από τη σύνοψη των αποτελεσμάτων της μελέτης των Dubovik et al. [2002], για το τηλεσκοπικό δίκτυο μετρήσεων AERONET (περισσότερες λεπτομέρειες αναφέρονται στην ενότητα 4.2.1).

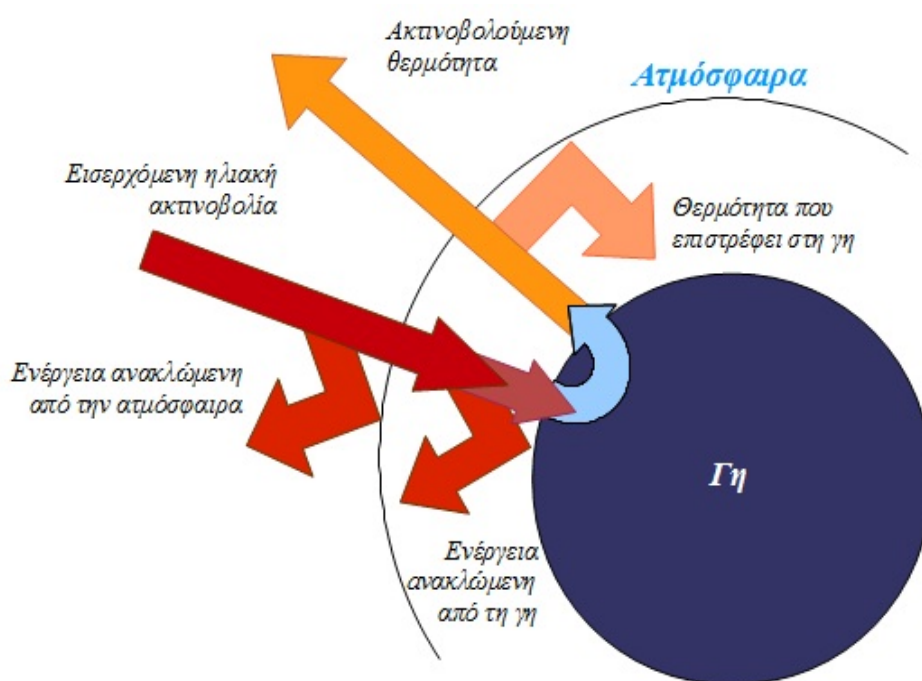
2.2 Διάδοση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

Ακτινοβολία είναι η διάδοση ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Όταν η ακτινοβολία προσπέσει σε σωματίδια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα, μπορεί να ανακλαστεί, να σκεδαστεί, να απορροφηθεί να διαθλαστεί ή να περιθλαστεί. Λόγω της μεταφοράς ενέργειας, η οποία πραγματοποιείται μέσω των προαναφερθέντων διαδικασιών, η ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα έχει επίδραση στη θερμοκρασία, στην ορατότητα και στο χρώμα των αντικειμένων [Jacobson, 2005].

Ενώ η σκέδαση ανακατευθύνει και διασκορπίζει την ακτινοβολία, η απορρόφηση αφαιρεί ακτινοβολία από μία προσπίπτουσα ακτίνα. Σε κάθε περίπτωση προκαλείται μείωση της διαδιδόμενης ακτινοβολίας. Τα αιωρούμενα σωματίδια, οι

σταγόνες των νεφών και τα αέρια σκεδάζουν και απορροφούν σε συνάρτηση με το μήκος κύματος [Jacobson, 2005].

Το μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης ακτινοβολίας από τον Ήλιο ανήκει στο ορατό τμήμα του φάσματος. Για να επιτευχθεί ενεργειακή ισορροπία στη Γη, η ροή ενέργειας από τον Ήλιο που εισέρχεται, θα πρέπει να ισοσταθμιστεί με ένα ίσο πόσο ακτινοβολίας, το οποίο ανακλάται ή εκπέμπεται ως υπέρυθη ακτινοβολία από αυτήν (Σχήμα 2.4). Κάθε απόκλιση σε οποιαδήποτε πλευρά αυτής της ισορροπίας, προκαλεί μία νέα θερμότερη, ή ψυχρότερη κατάσταση, προκειμένου να εξασφαλιστεί ξανά το ενεργειακό ισοζύγιο [Seinfeld and Pandis,1998].



Σχήμα 2.4: Ενεργειακό ισοζύγιο ακτινοβολίας

Τα αερολύματα έχουν άμεση επίδραση στην ακτινοβολία διότι σκεδάζουν και απορροφούν ηλιακή και υπέρυθη ακτινοβολία κι έτσι μπορούν να επηρεάσουν και τα δύο μέλη του ενεργειακού ισοζυγίου. Τα σωματίδια με μικρότερη διάμετρο από 1 μm σκεδάζουν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, στέλνοντας ένα ποσοστό της σκεδαζόμενης αυτής ενέργειας πίσω στο διάστημα [Seinfeld and Pandis,1998]. Με αυτόν τον τρόπο μειώνουν την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας σε σχέση με αυτήν που θα δεχόταν η Γη χωρίς την παρουσία τους. Λόγω όμως της μικρής

ατμοσφαιρικής ζωής τους, δεν μπορούν να θεωρηθούν ως μακροπρόθεσμη αντιστάθμιση στην αύξηση της θερμοκρασίας, την οποία προκαλούν τα αέρια θερμοκηπίου [Houghton et al., 2001].

2.2.1 Σκέδαση και απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας

Καθώς μία ακτίνα φωτός διαδίδεται στην ατμόσφαιρα παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων και αερίων, λόγω των φαινομένων της σκέδασης και της απορρόφησης χάνει τμήμα της έντασής της. Έτσι, όταν μια ακτίνα φωτός προσκρούσει σε ένα σωματίδιο διεγείρει τα ηλεκτρικά του φορτία σε ταλάντωση, τα οποία επανεκπέμπουν ενέργεια σε όλες τις διευθύνσεις (σκέδαση), ή μετατρέπουν ένα μέρος της προσλαμβανόμενης ακτινοβολίας σε θερμική ενέργεια (απορρόφηση). Το διπλό αποτέλεσμα της σκέδασης και της απορρόφησης, αναφέρεται ως εξασθένηση και η ενεργός διατομή εξασθένησης C_{ext} (m^2) (extinction cross section), ορίζεται ως:

$$C_{ext} = C_{scat} + C_{abs} \quad (2.1)$$

όπου C_{scat} η ενεργός διατομή σκέδασης (scattering cross section) και C_{abs} η ενεργός διατομή απορρόφησης (absorption cross section). Σε όρους γεωμετρικής οπτικής, μπορεί να θεωρηθεί ότι το σωματίδιο δημιουργεί μία “σκιά” της περιοχής C_{ext} καθώς η ενέργεια ακτινοβολίας περνά από το σωματίδιο. Αυτή η σκιά, μπορεί να είναι μεγαλύτερη, ή μικρότερη από τη γεωμετρική σκιά του σωματιδίου. Η αδιάστατη σκεδαστική ικανότητα (scattering efficiency) του σωματιδίου, Q_{scat} ορίζεται από τη σχέση 2.2.2 [Kokhanovsky, 2008]:

$$Q_{scat} = \frac{C_{scat}}{A} \quad (2.2)$$

όπου A η ενεργός διατομή του σωματιδίου και αντίστοιχα ορίζονται τα Q_{ext} και Q_{abs} , οπότε η σχέση (2.2.1.1) γίνεται [Kokhanovsky, 2008]:

$$Q_{ext} = Q_{scat} + Q_{abs} \quad (2.3)$$

Η σκέδαση και η απορρόφηση ακτινοβολίας από ένα σωματίδιο εξαρτώνται από:

♣ το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας,

♣ το μέγεθος του σωματιδίου. Για σωματίδιο διαμέτρου D_p στο οποίο προσπίπτει ακτινοβολία μήκους κύματος λ , ορίζεται η παράμετρος α [Seinfeld and Pandis,1998]p.16 :

$$\alpha = \frac{\pi D_p}{\lambda} \quad (2.4)$$

και περιγράφεται ως το κλάσμα της περιφέρειας του σωματιδίου προς το μήκος κύματος του φωτός

♣ το μιγαδικό δείκτη διάθλασης m :

$$m = n + i k \quad (2.5)$$

όπου το n και το k συνδέονται με τη σκέδαση και την απορρόφηση του σωματιδίου αντίστοιχα. Ο μιγαδικός δείκτης διάθλασης αποτελεί το “οπτικό αποτύπωμα” της χημικής σύνθεσης του σωματιδίου, καθώς υπολογίζεται απ' ευθείας από το μείγμα των συστατικών του [Pilinis and Pandis, 1995].

Το αερόλυμα αποτελεί ένα σύνολο σωματιδίων που σκεδάζουν και απορροφούν την ακτινοβολία, ταυτόχρονα με τα αέρια της ατμόσφαιρας. Με αυτόν τον τρόπο, αέρια και αερολύματα προσδιορίζουν τα οπτικά χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας. Ο ρυθμός απώλειας ενέργειας στην ατμόσφαιρα, εξαρτάται από τον συντελεστή εξασθένησης σ_{ext} (light-extinction coefficient) ο οποίος υπολογίζεται σε μονάδες αντίστροφου μήκους [Liou et al, 2008; Seinfeld and Pandis,1998; EPA, 1996; Ζερεφός, 1984]. Ο συντελεστής εξασθένησης αποτελείται από το συντελεστή σκέδασης (scattering coefficient) σ_{scat} και το συντελεστή απορρόφησης (absorption coefficient) σ_{abs} :

$$\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{scat}} + \sigma_{\text{abs}} \quad (2.6)$$

Ο συντελεστής απορρόφησης προκύπτει από το άθροισμα του συντελεστή απορρόφησης από αιωρούμενα σωματίδια και τον συντελεστή απορρόφησης από αέρια [Malm και Kreidenweis, 1997; Sifakis και Deschamps, 1992; Trijonis et al, 1990]:

$$\sigma_{\text{abs}} = \sigma_{\text{abs},p} + \sigma_{\text{abs},g} \quad (2.7)$$

Στην ατμόσφαιρα υπάρχουν δύο βασικά είδη σκέδασης της ακτινοβολίας και σχετίζονται με τις διαστάσεις των σωματιδίων και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Έτσι, στην περίπτωση που τα σωματίδια τα οποία προκαλούν την σκέδαση, έχουν κατά πολύ μικρότερες διαστάσεις από το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ($\alpha \ll 1$), π.χ. μόρια ατμοσφαιρικών αερίων, η σκέδαση ονομάζεται σκέδαση Rayleigh.

Στην περίπτωση, όπου τα σωματίδια έχουν περίπου το ίδιο μέγεθος με το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η σκέδαση ονομάζεται Mie, για παράδειγμα στα σωματίδια αερολυμάτων ή υδροσταγονίδια τα οποία έχουν διάμετρο ανάμεσα σε 10^{-2} και 10^2 φορές το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας [Λαζαρίδης, 2010].

Έτσι ο συντελεστής σκέδασης θα προκύπτει από το άθροισμα του συντελεστή σκέδασης από αιωρούμενα σωματίδια $\sigma_{scat,p}$ και του συντελεστή σκέδασης από αέρια $\sigma_{scat,g}$:

$$\sigma_{scat} = \sigma_{scat,p} + \sigma_{scat,g} \quad (2.8)$$

Τελικά, ο συντελεστής εξασθένησης, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό διάδοσης της ακτινοβολίας, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{ext} = \sigma_{ext,p} + \sigma_{ext,g} \quad (2.9)$$

2.2.2 Σκέδαση και απορρόφηση αερίων

Η σκέδαση της ακτινοβολίας από τα μόρια των αερίων ονομάζεται σκέδαση Rayleigh, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα και είναι αυτή που προσδίδει στον ουρανό το γαλάζιο χρώμα του. Ένας σκεδαστής Rayleigh έχει πολύ μικρότερη μοριακή ακτίνα r από το προσπίπτον μήκος κύματος ($\alpha \ll 1$). Οι κυρίαρχοι Rayleigh σκεδαστές είναι το οξυγόνο και το άζωτο, λόγω της μεγαλύτερης συγκέντρωσής τους στην ατμόσφαιρα.

Για ένα μείγμα αερίων, ο συντελεστής εξασθένησης λόγω της σκέδασης και απορρόφησης Rayleigh από μόρια αερίων, δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{ext,g}(\lambda) = \sum_{i=1}^K N_i C_{ext,g,i}(\lambda) \quad (2.10)$$

όπου N_i είναι η αριθμητική συγκέντρωση μορίων του i αερίου (από ένα σύνολο K αερίων) και $C_{ext,g}$ είναι η ενεργός διατομή εξασθένησης ενός μορίου i αερίου. Καθώς η συγκέντρωση αερίων ελαττώνεται εκθετικά με την αύξηση του υψόμετρου και η εξασθένηση λόγω του φαινομένου της σκέδασης Rayleigh θα μειώνεται αντίστοιχα [Jacobson, 2005].

Τα αέρια απορροφούν ακτινοβολία συναρτήσει του μήκους κύματός της. Σαν αποτέλεσμα της απορρόφησης της ηλιακής και υπεριώδους ακτινοβολίας, προκαλείται θέρμανση της ατμόσφαιρας, εμποδίζεται ένα μέρος της ακτινοβολίας να φτάσει στο έδαφος, αυξάνεται το φαινόμενο της φωτόλυσης (η οποία έχει επιπτώσεις στη φωτοχημεία της ατμόσφαιρας) και επηρεάζεται η ορατότητα. Ενώ η απορρόφηση της ηλιακής και θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας μεταβάλλει το ενεργειακό ισοζύγιο της Γης, καθώς αέρια της ατμόσφαιρας εμποδίζουν την υπέρυθη ακτινοβολία να διαφύγει στο διάστημα.

Γενικά για αρκετά μικρά σωματίδια η σχέση του μήκους κύματος με τους συντελεστές απορρόφησης και σκέδασης είναι [Seinfeld and Pandis, 1998]:

$$Q_{scat} \approx \lambda^{-4} \quad \text{και} \quad Q_{abs} \approx \lambda^{-1} \quad (2.11)$$

2.2.3 Σκέδαση και απορρόφηση από τα αερολύματα

Η σωματιδιακή σκέδαση αποτελείται από ένα συνδυασμό των φαινομένων της ανάκλασης, της διάθλασης και της περίθλασης [Jacobson, 2005]. Είναι η σημαντικότερη διαδικασία εξασθένησης της ηλιακής ακτινοβολίας σε ατμόσφαιρα με ρύπους. Όλα τα στοιχεία σωματιδίων σκεδάζουν την ηλιακή και υπέρυθη ακτινοβολία και απορροφούν υπέρυθη, αλλά λίγα απορροφούν ηλιακή ακτινοβολία και μάλιστα περισσότερο στο υπεριώδες φάσμα [Jacobson, 2005].

Η ισχυρότερη απορρόφηση της ακτινοβολίας γίνεται από τα σωματίδια του μαύρου άνθρακα, το κύριο συστατικό της αιθάλης, καθώς και από οργανικές ενώσεις. Άλλες ενώσεις που απορροφούν ακτινοβολία είναι ο αιματίτης (Fe_2O_3) και το οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3) [Jacobson, 2005].

Ο συντελεστής εξασθένησης $b_{ext,a}(\lambda)$ μονοχρωματικής ακτινοβολίας λ ενός αερολύματος αριθμητικής κατανομής $n(D_p)$, θα δίνεται από τη σχέση:

$$b_{ext}(\lambda) = \int_0^{D_p^{max}} \frac{\pi D_p^2}{4} Q_{ext}(m, D_p, \lambda) n(D_p) dD_p \quad (2.12)$$

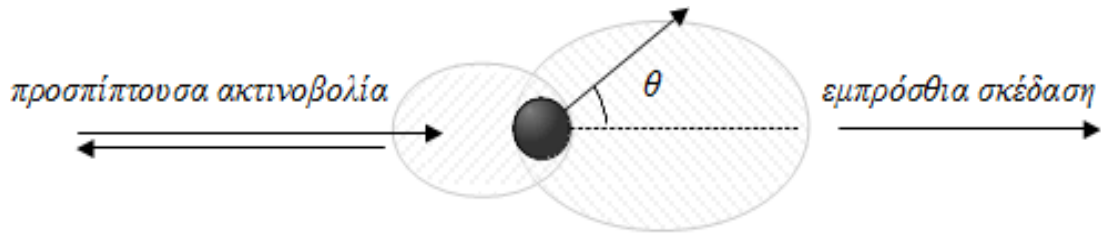
όπου $Q_{ext,a}(\lambda)$ η σκεδαστική ικανότητα εξασθένησης σωματιδίου διαμέτρου D_p με μιγαδικό δείκτη διάθλασης m και D_p^{max} είναι ένα ανώτατο όριο διαμέτρου για το πλήθος των σωματιδίων. Αντίστοιχες εξισώσεις μπορούν να γραφούν για τα $b_{scat}(\lambda)$ και $b_{abs}(\lambda)$ σε σχέση με τα Q_{scat} και Q_{abs} [Seinfeld and Pandis, 1998].

2.2.3.1 Θεωρία σκέδασης MIE

Κατά τη σκέδαση MIE βασικό είναι το μέγεθος του σωματιδίου, το οποίο σκεδάζεται, σε σχέση με το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας σε αυτό, ακτινοβολίας, καθώς και ο μιγαδικός δείκτης διάθλασης m . Γενικά, όλα τα αιωρούμενα σωματίδια αλληλεπιδρούν με την ακτινοβολία.

Ειδικότερα, στη σκέδαση Mie (από τον Gustav Mie) τα σωματίδια της ατμόσφαιρας που σκεδάζουν την ακτινοβολία, όπως αερολύματα, ομίχλη, κ.ά. έχουν διαμέτρους οι οποίες είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος λ της ηλιακής ακτινοβολίας ($a \approx 1$). Σύμφωνα με τη θεωρία Mie υπάρχει ασυμμετρία μεταξύ της εμπρόσθιας σκέδασης (forward scattering) και της οπισθοσκέδασης (backscattering). Έτσι, για σωματίδια με διάμετρο D_p μεγαλύτερη του λ υπερισχύει η εμπρόσθια σκέδαση. Η σκέδαση Mie πραγματοποιείται σε σφαιρικά αλλά και σε μη-σφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια [Kerker, 1969; Van de Hulst, 1981; Bohren and Huffman, 1981; Mischenko et al., 1999], ενώ η επίλυση για σφαιρικά σωματίδια είναι πιο εύκολη.

Η ακτινοβολία που προέρχεται από σκέδαση λόγω αυτών των σωματιδίων, διασκορπάζεται στο χώρο ανάλογα με το σχήμα αλλά και τη διάσταση του σωματιδίου. Αν το σωματίδιο είναι σφαιρικά συμμετρικό, τότε και η κατανομή της ακτινοβολίας θα είναι αντίστοιχα συμμετρική και ο άξονας της συμμετρίας της θα είναι η διεύθυνση της ακτινοβολίας που δέχεται το σωματίδιο. Η ακτινοβολία σκεδάζεται από το σωματίδιο σε γωνία θ και προς τις δύο κατευθύνσεις της, (Σχήμα 2.5), πρόσθια και οπίσθια (εμπρόσθια σκέδαση και οπίσθια σκέδαση αντίστοιχα) [Παπαγιάννης, 2005].



Σχήμα 2.5: Σκέδαση MIE

Η γωνιακή κατανομή της έντασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία είναι αποτέλεσμα σκέδασης σε συγκεκριμένο μήκος κύματος από ένα σωματίδιο, ονομάζεται συνάρτηση φάσης της σκέδασης ή απλά συνάρτηση φάσης $P(\theta)$ και είναι η σκεδαζόμενη ένταση σε μία συγκεκριμένη γωνία θ σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτίνα και κανονικοποιημένη ως προς το ολοκλήρωμα της σκεδαζόμενης έντασης σε όλες τις γωνίες.

Συγκεκριμένα η συνάρτηση φάσης για συνδυασμό διαμέτρου σωματιδίου και ακτινοβολίας, α καθώς και μιγαδικού δείκτη διάθλασης m δίνεται από την επόμενη σχέση [Seinfeld and Pandis,1998]:

$$P(\theta, \alpha, m) = \frac{F(\theta, \alpha, m)}{\int_0^\pi F(\theta, \alpha, m) \sin\theta d\theta} \quad (2.13)$$

όπου $F(\theta, \alpha, m)$ η σκεδαζόμενη ένταση ακτινοβολίας για τη γωνία θ [Seinfeld και Pandis,1998]. Το ολοκλήρωμα της συνάρτησης φάσης για όλη τη σφαίρα του σωματιδίου είναι 4π όπως φαίνεται από την παρακάτω εξίσωση [Kokhanovsky, 2008]:

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi P(\theta, \alpha, m) \sin\theta d\theta d\varphi = 1 \quad (2.14)$$

2.2.3.2 Αερολυματικό οπτικό πάχος

Το οπτικό πάχος τ (optical thickness ή optical depth) εκφράζει το βαθμό στον οποίον το αερόλυμα εμποδίζει τη διάδοση της ακτινοβολίας και ορίζεται ως το ολοκλήρωμα του συντελεστή εξασθένησης του μέσου, για την απόσταση που διανύει η ακτινοβολία στο μέσο αυτό [[Kokhanovsky, 2008; Seinfeld and Pandis, 1998; Ζερεφός, 1984]:

$$\tau = \int \sigma_{ext} dx = \langle \sigma_{ext} \rangle x \quad (2.15)$$

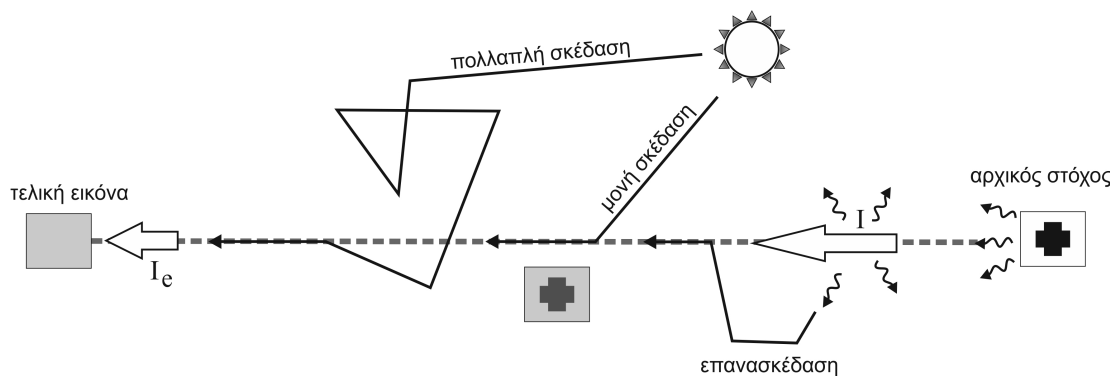
2.2.4 Το μοντέλο ορατότητας

Η ορατότητα ορίζεται σαν ένα μέτρο του κατά πόσο μακριά μπορούμε να δούμε μέσω του αέρα. Ο ορίζοντας της Γης ακόμη και σε συνθήκες της καθαρότερης ατμόσφαιρας, περιορίζεται σε μερικά εκατοντάδες χιλιόμετρα, λόγω της ύπαρξης αερίων και σωματιδίων αερολυμάτων. Σε μία ατμόσφαιρα με ρύπους, η σκέδαση από το αερόλυμα είναι ο βασικός λόγος μείωσης της ορατότητας [Jacobson, 2005].

Υπάρχουν αρκετοί όροι για την περιγραφή της μέγιστης ορατότητας: Το οπτικό εύρος είναι η πραγματική απόσταση από την οποία ένας παρατηρητής μπορεί να διακρίνει ένα μαύρο αντικείμενο στο ορίζοντα [Jacobson, 2005].

Ο υπολογισμός της διάδοσης της ακτινοβολίας από το χρωματικό στόχο έως τον παρατηρητή κρίνεται απαραίτητος, προκειμένου να προσδιοριστεί η τελική ακτινοβολία που εισπράττει ο τελευταίος και να συνδεθεί με την επίδραση του εκάστοτε αερολύματος [Adams et al., 1974; Dave, 1980; 1981; Tsay et al., 1991; Sloup, 2002; Lee and Hernández-Andrés, 2003; Haber et al., 2005].

Η ένταση της ακτινοβολίας I , η οποία διαδίδεται κατά μήκος μιας οπτικής διαδρομής μέσα στην ατμόσφαιρα, εξαρτάται από τις απώλειες λόγω της σκέδασης και της απορρόφησης που υφίσταται από τα αέρια και τα αερολύματα της ατμόσφαιρας. Παράλληλα, λόγω του φαινομένου της επανασκέδασης, προστίθεται σε αυτήν κάποιο ποσό ακτινοβολίας I_e (Σχήμα 2.6), το οποίο εισέρχεται στην οπτική διαδρομή.



Σχήμα 2.6: Είδη ακτινοβολιών που υπεισέρχονται στην οπτική διαδρομή.

Η σημαντικότερη συνεισφορά στην οπτική διαδρομή προέρχεται από την απλή και πολλαπλή σκέδαση φωτός, η οποία λαμβάνει χώρα στην περιβάλλουσα ατμόσφαιρα.

Αν I_e είναι η ένταση ακτινοβολίας που εισέρχεται στη διαδρομή, η εξίσωση της διάδοσης της ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση [EPA, 1996]:

$$\frac{dI}{dx} = -\sigma_{ext}(I - I_e) \quad (2.16)$$

Η παραπάνω εξίσωση αν εκφραστεί συναρτήσει του οπτικού πάχους γίνεται:

$$\frac{dI}{d\tau} = -(I - I_e) \quad (2.17)$$

Η I_e ονομάζεται πηγαία συνάρτηση (source function), ή ακτινοβολία ισορροπίας (equilibrium radiance). Η ένταση της ακτινοβολίας που μεταδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας, κατά μήκος μιας διαδρομής, σταδιακά τείνει να γίνει ίση με την τιμή της πηγαίας συνάρτησης και όταν αυτό επιτευχθεί η ένταση παραμένει σταθερή. Η διαδικασία αυτή εξαρτάται από το συντελεστή εξασθένησης, το μήκος της διαδρομής και από την αρχική ένταση της ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εξίσωση, όταν ο ρυθμός μεταβολής $dI/d\tau$ μηδενιστεί, τότε $I = I_e$, οπότε σε αυτήν την περίπτωση το ποσό της ακτινοβολίας που χάνεται ισούται με το ποσό της ακτινοβολίας, που λόγω επανασκέδασης, εισέρχεται στην οπτική διαδρομή.

Για οριζόντια διεύθυνση παρατήρησης, η ακτινοβολία από τον ορίζοντα μπορεί να αποτελέσει αντιπροσωπευτικό δείγμα της πηγαίας συνάρτησης. Σε αυτήν την περίπτωση κάποιες παραδοχές που πρέπει να ισχύουν είναι ότι: θα πρέπει οι οπτικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας να θεωρούνται ομογενείς καθ' όλη την οπτική διαδρομή, η επιφάνεια της γης να θεωρείται επίπεδη και την ύπαρξη ομοιόμορφου φωτισμού στο ανώτατο όριο της ατμόσφαιρας [EPA, 1996; Eldering et al., 1993; Larson et al., 1988]. Μια πρώτη προσέγγιση της πηγαίας συνάρτησης αποτελεί η σχέση:

$$I_e(\Omega) = \frac{\omega_0}{4\pi} \int_{4\pi} I(\Omega') P(\Omega, \Omega') d\Omega' \quad (2.18)$$

όπου $I(\Omega')$ είναι η ένταση της ακτινοβολίας με κατεύθυνση Ω' και $P(\Omega, \Omega')$ είναι η συνάρτηση φάσης της ακτινοβολίας που σκεδάζεται από την κατεύθυνση Ω στην Ω'

[EPA, 1996; Ζερεφός, 1984; Eldering et al., 1985; Liou, 1980]. Σε αυτήν την περίπτωση Ω είναι η κατεύθυνση της οπτικής διαδρομής προς τον παρατηρητή.

Ένα ετερόφωτο αντικείμενο στο οποίο προσπίπτει φως από κάποια πηγή, γίνεται αντιληπτό λόγω της ανάκλασης - διάχυσης του φωτός από την επιφάνειά του. Η ακτινοβολία η οποία ανακλάται από το αντικείμενο ονομάζεται αρχική ακτινοβολία του αντικειμένου I_o (inherent radiance) και φθίνει κατά τη διάδοσή της μέσα από την ατμόσφαιρα, λόγω των φαινομένων της σκέδασης και της απορρόφησης από τα σωματίδια της ατμόσφαιρας.

Ένα δεύτερο ποσό ακτινοβολίας, το οποίο εισέρχεται στην οπτική διαδρομή του παρατηρητή – αντικειμένου, κατά τη διάρκεια της ημέρας και ενισχύει την αρχική ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία ατμοσφαιρικής διαδρομής I_p (path radiance). Η ακτινοβολία αυτή προέρχεται από διάχυτη ουράνια ακτινοβολία (πολλαπλή σκέδαση), απλή σκέδαση, ανακλάσεις ακτινοβολίας από το έδαφος, κ.ά. Το ποσό της συνεισφοράς της ακτινοβολίας ατμοσφαιρικής διαδρομής κοντά στο αντικείμενο (στόχο) παρατήρησης είναι μηδενικό, ενώ όσο αυξάνεται η απόσταση παρατήρησης, τόσο αυξάνεται η ακτινοβολία I_p . Ουσιαστικά, αποτελεί το ίδιο φαινόμενο με την ακτινοβολία ισορροπίας, πριν όμως επέλθει ισορροπία.

Ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται την ακτινοβολία I , η οποία είναι η τελική ακτινοβολία και οφείλεται τόσο στο ποσοστό της αρχικής ακτινοβολίας στόχου, η οποία διαδίδεται στην οπτική διαδρομή I_t (transmitted radiance), όσο και στην ακτινοβολία ατμοσφαιρικής διαδρομής I_p . Αποκλειστικός φορέας της πληροφορίας των οπτικών ιδιοτήτων του παρατηρούμενου αντικειμένου είναι η διαδιδόμενη ακτινοβολία I_t . [Dubovik et al, 2002; 1995; EPA, 1996; Eldering et al, 1996; Molenaar et al, 1994; Eldering et al, 1996; Larson et al, 1988].

Η ένταση της διαδιδόμενης ακτινοβολίας I_t από έναν παρατηρούμενο στόχο, ο οποίος απέχει απόσταση x από τον παρατηρητή, κατά μήκος μιας διαδρομής στην ατμόσφαιρα δίνεται από τη σχέση:

$$I_t = I_o T = I_o e^{-\tau} \quad (2.19)$$

όπου I_o η αρχική ένταση ακτινοβολίας του στόχου και T (Transmittance) η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας κατά μήκος της οπτικής διαδρομής. Η παραπάνω εξίσωση γράφεται και ως:

$$\frac{I_t}{I_o} = T = e^{-\tau} \quad (2.20)$$

Καθώς η τιμή του συντελεστή εξασθένισης σ_{ext} , μεταβάλλεται κατά μήκος της απόστασης x της οπτικής διαδρομής, ο υπολογισμός του οπτικού πάχους τ γίνεται χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή του συντελεστή $\langle \sigma_{ext} \rangle$. Έτσι, η προηγούμενη σχέση μπορεί να γραφεί ως:

$$I_t = I_o e^{-\langle \sigma_{ext} \rangle x} \quad (2.21)$$

Η σχέση που συνδέει την ακτινοβολία οπτικής διαδρομής I_p με την ακτινοβολία ισορροπίας I_e είναι:

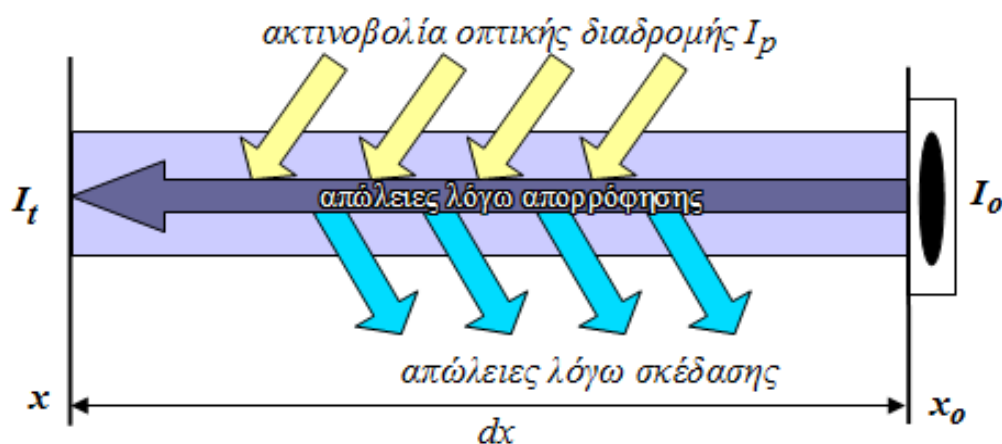
$$I_p = I_e (1 - T) \quad (2.22)$$

Η ακτινοβολία που φτάνει στον παρατηρητή είναι το άθροισμα της διαδιδόμενης I_t και της οφειλόμενης στη διαδρομή I_p :

$$I = I_t + I_p \quad (2.23)$$

$$\text{ή } I_t = I_o e^{-\langle \sigma_{ext} \rangle x} + I_e (1 - e^{-\langle \sigma_{ext} \rangle x}) \quad (2.24)$$

Η τελευταία εξίσωση αποτελεί και το μοντέλο ορατότητας [Kant et al., 2000; Malm and Kreidenweis, 1997; Eldering et al., 1996; 1993; EPA, 1996; Molenár et al, 1994; Larson et al., 1988]



Σχήμα 2.7: Μεταφορά ενέργειας ακτινοβολίας

Στο Σχήμα 2.7 εικονίζονται οι μεταβολές που υφίσταται η αρχική ακτινοβολία I_0 , λόγω σκέδασης, απορρόφησης και εισερχόμενης ακτινοβολίας από την

περιβάλλουσα ατμόσφαιρα I_p (ακτινοβολία οπτικής διαδρομής) κατά τη μετάδοσή της σε απόσταση dx , εντός ατμόσφαιρας, παρουσία σωματιδίων.

2.3 Deciview

Η παρουσία ατμοσφαιρικών σωματιδίων, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα προκαλεί μείωση της ορατότητας. Όταν ένας παρατηρητής κοιτάζει ένα μακρινό στόχο, η εικόνα του τελευταίου αλλοιώνεται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να ενοποιείται με τον ορίζοντα. Αυτό συμβαίνει γιατί σταδιακά μειώνεται η αντίθεσή του με το φόντο, καθώς ο παρατηρητής απομακρύνεται από τον στόχο, [Hogvath, 1981]. Η μείωση της ορατότητας περιλαμβάνει ελάττωση στην οπτική εμβέλεια και αποχρωματισμό της ατμόσφαιρας. Η οπτική εμβέλεια ορίζεται ως η μεγαλύτερη απόσταση από την οποία κάποιος μπορεί να δει ένα μεγάλο μαύρο αντικείμενο στον ορίζοντα. Ο ατμοσφαιρικός αποχρωματισμός μπορεί να περιγραφεί ως μεταβολή, οφειλόμενη σε ρύπανση, του ουράνιου χρώματος, των σύννεφων και άλλων αντικειμένων [Jacobson, 2005].

Το Deciview είναι μια λογαριθμική συνάρτηση του συντελεστή εξασθένησης σκέδασης και απορρόφησης ακτινοβολίας. Είναι μια κλίμακα στην οποία οι αλλαγές στην ορατότητα είναι γραμμικές και κάθε αλλαγή είναι ισοδύναμη με την τελευταία -από την άποψη του τι μπορεί να δει κάποιος και όχι με την έννοια της απόστασης. Ένα deciview (dv) ορίζεται ως περίπου “μία ελάχιστη αντιληπτή διαφορά” στην ορατότητα. Οι πιο υψηλές τιμές deciview αντιστοιχούν σε πιο ομιχλώδη ατμόσφαιρα, ενώ τα χαμηλά επίπεδα deciview υποδηλώνουν καθαρή ατμόσφαιρα. Το εύρος μετρούμενης ημερήσιας ορατότητας, συνήθως κυμαίνεται από 3 dv (180 μίλια ορατότητα σε ανέφελο ουρανό) έως 40 dv (4 μίλια ορατότητα με πυκνή ομίχλη).

Η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών deciviews δεν καθορίζεται με βάση την απόσταση, αλλά σχετίζεται με συγκεκριμένες αλλαγές στην ορατότητα και ισοδυναμεί με περίπου 10% μεταβολή στο συντελεστή εξασθένησης. Το deciview ορίζεται συναρτήσει του συντελεστή εξασθένησης από την παρακάτω σχέση:

$$dv = 10 \ln\left(\frac{b_{ext}}{10Mm^{-1}}\right)$$

όπου b_{ext} ο συντελεστής εξασθένησης [EPA, 1999]. Η χρήση του δείκτη deciview είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μελέτη της ορατότητας, καθώς επιτρέπει τη σύνδεση της αντίληψης της ορατότητας με το συντελεστή εξασθένησης και κατά συνέπεια, με το βαθμό ατμοσφαιρικής ρύπανσης [Pitchford and Malm, 1994]. Αντίστοιχα, στην προτεινόμενη έρευνα, θα επιχειρηθεί να συνδεθεί η αντιληπτική ικανότητα του παρατηρητή στις χρωματικές μεταβολές, συναρτήσει χαρακτηριστικών του αερολύματος.

2.4 Το λογισμικό MODTRAN

Η ανάπτυξη του κώδικα MODTRAN (MODerate resolution TRANsmission model) έγινε από τη SSI (Spectral Sciences Incorporated) και το Air Force Research Laboratory / Space Vehicles Division (AFRL/VS) των Η.Π.Α. και βασίστηκε στον κώδικα LOWTRAN (LOW Resolution Atmospheric TRANsmission Code).

Το MODTRAN είναι το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της έντασης της ακτινοβολίας που εισέρχεται στην οπτική διαδρομή ανάμεσα στον παρατηρητή και τον στόχο. Με τη βοήθεια του MODTRAN μπορούν να υπολογιστούν η πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας του ήλιου (irradiance), την οποία προσλαμβάνει ένας στόχος, η ένταση ακτινοβολίας (radiance) οπτικής διαδρομής, αφού συνυπολογιστούν η ηλιακή ή η σεληνιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στην οπτική διαδρομή με απλή ή πολλαπλή σκέδαση, η ατμοσφαιρική διαπερατότητα (transmittance), και η ένταση ατμοσφαιρικής θερμικής ακτινοβολίας (thermal radiance) που εκπέμπεται από το μέσο διάδοσης [Kneizys et al., 1988].

Ο κώδικας MODTRAN, προσφέρει δυνατότητες παραμετροποίησης των αερίων συστατικών της ατμόσφαιρας, αλλά και των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων τα οποία βρίσκονται σε αυτήν. Εκτελείται για απλή ή και πολλαπλή σκέδαση και έχει χρησιμοποιηθεί σε ένα πλήθος από μελέτες με εφαρμογές σε πληθώρα θεμάτων [Pust and Shaw, 2011, Lahraoua and Raissouni 2011; Anderson, et al., 1999; Berk, et al., 1998], καθώς και μελέτες σχετικές με θέματα χρωματομετρίας παρουσία αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα [Haralabidis and Pilinis, 2008; 2005; Lee and Hernández-Andrés, 2005; Haralabidis and Pilinis, 2005].

2.5 Μοντέλα κατανομών αερολυμάτων για τον υπολογισμό των οπτικών τους ιδιοτήτων

Η επίδραση των σωματιδίων των αερολυμάτων στην διάδοση της ακτινοβολίας, εξαρτάται από την κατανομή μεγέθους τους και τη χημική τους σύσταση. Στην πράξη, τα αερολύματα είναι μια συλλογή διακριτών σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών. Μια τέτοια πολυδιασπορά έχει ένα μεγάλο πλήθος φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών. Αυτό κάνει την περιγραφή τους δύσκολη.

Για τον λόγο αυτό το αερόλυμα στην ατμόσφαιρα συχνά περιγράφεται από μαθηματικές εξισώσεις κατανομής μεγέθους - πληθυσμού των σωματιδίων. Ο πλέον συνηθισμένος τρόπος περιγραφής τέτοιων κατανομών είναι με άθροισμα K όρων λογαριθμικών - κανονικών κατανομών [Seinfeld and Pandis, 1998]:

$$\frac{dN(D_p)}{d \log D_p} = \sum_{i=1}^K \frac{N_i}{(2\pi)^{1/2} D_p \log \sigma_i} \exp\left(-\frac{(\log D_p - \log \bar{D}_{pi})^2}{2 \log^2 \sigma_i}\right) \quad (2.25)$$

όπου D_p είναι η διάμετρος των σωματιδίων, N_i η αριθμητική συγκέντρωση, \bar{D}_{pi} η μέση διάμετρος των σωματιδίων και σ_i η τυπική απόκλιση της i -οστής λογαριθμικής-κανονικής κατανομής. Οι λογαριθμικές κατανομές επιφανείας $dS(D_p)/d \log D_p$ και όγκου $dV(D_p)/d \log D_p$ συχνά θεωρούνται ότι προσεγγίζονται από παρόμοιες σχέσεις, ενώ έχουν εκτεταμένη εφαρμογή σε μεθοδολογίες αντιστροφής και σχεδιασμό μετρήσεων για σωματίδια [Dubovik et al., 2002; Kahn et al., 2001; Anderson et al., 2000].

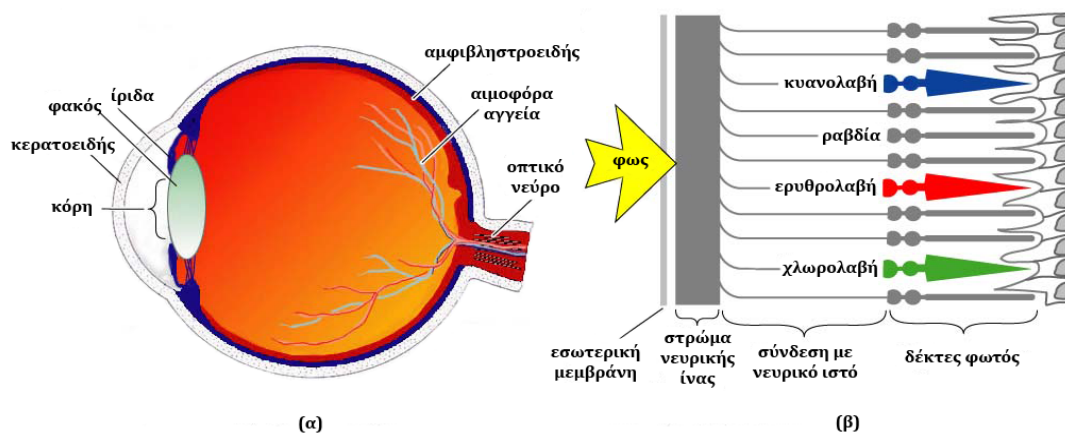
Για τον σκοπό του υπολογισμού της διάδοσης ακτινοβολίας, η χημική σύσταση των αερολυμάτων χαρακτηρίζεται αποκλειστικά από τον μιγαδικό δείκτη διάθλασης, m σύμφωνα με όσα προαναφέρονται (παρ. 2.2.1). Στην περίπτωση που για κάθε μία εκ των K κατανομών της εξίσωσης 2.25 αντιστοιχιστεί ένα και μόνο πραγματικό n_i και φανταστικό k_i δείκτη διάθλασης, τότε σχηματίζεται μία ομάδα πέντε παραμέτρων που χαρακτηρίζει την i - κατανομή, $\{N_i, \bar{D}_{pi}, \sigma_i, n_i, k_i\}$, [Kokhanovsky, 2008 p. 14; Dubovik et al., 2002]. Η σημασία αυτής της επιλογής προσομοίωσης του αερολύματος, θα αναλυθεί περαιτέρω στο 4ο κεφάλαιο.

Κεφ. 3: Χρωματομετρία

Η αίσθηση της όρασης στον άνθρωπο είναι αποτέλεσμα της λειτουργίας του συστήματος “οφθαλμός και εγκέφαλος”. Η εικόνα μεταφέρεται από τον αμφιβληστροειδή μέσω σημάτων στον εγκέφαλο, όπου υφίσταται τμηματική επεξεργασία από διαφορετικά μέρη του εγκεφάλου, τα οποία επιλέγονται ανάλογα με την ιδιότητα που αναλύεται και η οποία χαρακτηρίζει κάποιο στοιχείο της εικόνας (π.χ. χρώμα, κίνηση, κ.λ.π.). Έτσι, η αντίληψη του χρώματος είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός φυσικού ερεθίσματος, των δεκτών στο ανθρώπινο οφθαλμό που αντιλαμβάνονται το ερέθισμα, του νευρικού συστήματος και του εγκεφάλου. [Sharma, 2003]. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η χρωματομετρία και οι σχετικές με αυτήν έννοιες.

3.1 Η τριχρωματική όραση και αρχές χρωματομετρίας

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στην ορατή περιοχή του φάσματος, είναι το φυσικό ερέθισμα το οποίο κάνει αισθητό το χρώμα για τον άνθρωπο. Η ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος προσδιορίζεται μεταξύ των μηκών κύματος 360 nm και 830 nm [Sharma, 2003].



Σχήματα 3.1: (α) τομή ενός ανθρώπινου ματιού και (β) σχεδιασμός του αμφιβληστροειδούς με ραβδία και κυανολαβή, ερυθρολαβή και χλωρολαβή κωνία. (Διαθέσιμο από <http://www.ecse.rpi.edu/>)

Τα φωτοευαίσθητα κύτταρα του ανθρώπινου οφθαλμού βρίσκονται στην πίσω στιβάδα του αμφιβληστροειδούς (Σχήμα 3.1α). Το φως περνάει πρώτα από τα γάγγλια

(νευρικά κύτταρα) και μέσω των διπολικών και οριζόντιων κυττάρων, καταλήγει στους φωτοϋποδοχείς, τα κωνία και τα ραβδία (Σχήμα 3.1β).

Ενώ τα ραβδία αντιλαμβάνονται μικρές αλλαγές στην ένταση του φωτός και όχι στη συχνότητα του κύματός του, τα κωνία είναι εξαιρετικά ευαίσθητα σε διαφορές μήκους κύματος του φωτός. Διακρίνονται σε τρία είδη [Plainis et al., 2007]:

- ▲ κυανολαβή (ευαίσθητα σε μπλε αποχρώσεις του φωτός),
- ▲ χλωρολαβή (ευαίσθητα σε πράσινες αποχρώσεις του φωτός) και
- ▲ ερυθρολαβή (ευαίσθητα σε κόκκινες αποχρώσεις του φωτός),

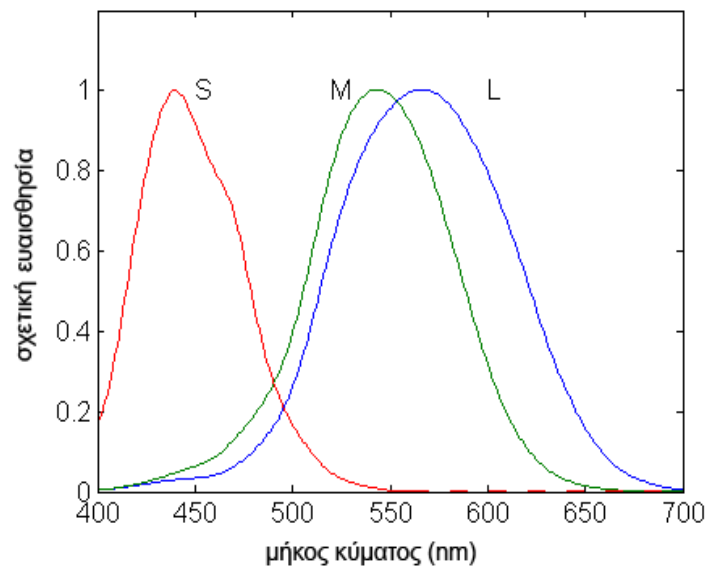
ανάλογα με τη φωτοευαίσθητη χρωστική που περιέχουν και είναι υπεύθυνα για την αντίληψη του χρώματος. Οι τρεις αυτοί τύποι κωνίων ονομάζονται και S, M και L από τα μικρά (Short), μεσαία (Medium) και μεγάλα (Long) μήκη κύματος στα οποία έχουν ευαισθησία αντίστοιχα. Η απόκριση αυτών των κωνίων μπορεί να προσομοιωθεί με ένα γραμμικό σύστημα που ορίζεται από τις φασματικές ευαισθησίες των κωνίων [Pratt, 1991]:

$$c_i = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} s_i(\lambda) f(\lambda) d\lambda \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.1)$$

όπου c_i με $i = 1, 2$ και 3 , είναι οι αποκρίσεις των τριών τύπων κωνίων, λ το μήκος κύματος, $f(\lambda)$ είναι η φασματική κατανομή του προσπίπτοντος φωτός στον αμφιβληστροειδή, και το $s_i(\lambda)$ (για $i = 1, 2$ και 3) υποδηλώνει την ευαισθησία του κάθε είδους κωνίου αντίστοιχα και τα λ_{min} και λ_{max} καθορίζουν την περιοχή μήκους κύματος για τον κάθε τύπου κωνίο, έξω από την οποία η ευαισθησία τους είναι μηδέν (380nm-780nm). Η παραπάνω σχέση, από μαθηματικής πλευράς, αντιστοιχεί σε πράξεις εσωτερικών γινομένων στον χώρο Hilbert των ολοκληρώσιμων τετραγωνικών συναρτήσεων. Ο μηχανισμός απόκρισης των κωνίων αντιστοιχεί σε μία προβολή του φάσματος στο χώρο που παράγεται από τις τρεις συναρτήσεις ευαισθησίας $\{s_i(\lambda)\}_{i=1}^3$. Αυτός ο χώρος ονομάζεται ανθρώπινος οπτικός υποχώρος HVSS (Human Visual Sub System) [Sharma, 2003].

Η αντίληψη του χρώματος εξαρτάται από την περαιτέρω μη γραμμική διεργασία των αποκρίσεων του αμφιβληστροειδούς. Παρόλα αυτά σε πρώτη προσέγγιση, κάτω από παρόμοιες συνθήκες προσαρμογής, η αίσθηση του χρώματος μπορεί να προσδιοριστεί από την απόκριση των κωνίων. Στο παρακάτω σχήμα (3.2),

εικονίζεται προσεγγιστικά η ευαισθησία των L-M-S κωνίων σε σχέση με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Σχήμα 3.2: Σχετική ευαισθησία των κωνίων συναρτήσει των μηκών κύματος. (Από <http://cnx.org/content/m18092/latest/>)

Για τον υπολογισμό, το ολοκλήρωμα στην εξίσωση 3.1 μπορεί να αντικατασταθεί με άθροισμα, αν οι φασματικές ποσότητες αντικατασταθούν από τα αντίστοιχα δείγματά τους με συχνότητα δειγματοληψίας $\Delta\lambda$, η οποία παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια [Pratt, 1991]:

$$c_i = \sum_{i=0}^{N-1} s_i(\lambda_i) f(\lambda_i) \Delta\lambda = \mathbf{s}_i^T \mathbf{f} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.2)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, τα $\{\lambda_i\}_{i=0}^{N-1}$ είναι τα ομοιόμορφα κατανεμημένα μήκη κύματος που καλύπτουν την ορατή περιοχή του φάσματος και το $\lambda_i = \lambda_0 + i\Delta\lambda$, με $\Delta\lambda$ το διάστημα δειγματοληψίας του μήκους κύματος. Στην παραπάνω εξίσωση το $\mathbf{f} = [f(\lambda_0), f(\lambda_1), \dots, f(\lambda_{N-1})]^T$ είναι το $N \times 1$ διάνυσμα των δειγμάτων του $f(\lambda)$ και το $\mathbf{s}_i = \Delta\lambda [s_i(\lambda_0), s_i(\lambda_1), \dots, s_i(\lambda_{N-1})]^T$ είναι το $N \times 1$ διάνυσμα των δειγμάτων των $s_i(\lambda)$ πολλαπλασιασμένο με το διάστημα δειγματοληψίας $\Delta\lambda$. Ο εκθέτης T υποδηλώνει την αναστροφή.

Στους παρατηρητές με κανονική όραση, οι φασματικές ευαισθησίες s_i των τριών κωνίων είναι γραμμικά ανεξάρτητες. Το χρώμα μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας το διάνυσμα \mathbf{c} στην προηγούμενη εξίσωση:

$$\mathbf{c} = \mathbf{S}^T \mathbf{f} \quad (3.3)$$

όπου $\mathbf{c} = [c_1, c_2, c_3]^T$, $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \mathbf{s}_3]$ είναι οι $N \times 3$ πίνακες με στήλες τα διανύσματα ευαισθησίας των κωνίων τους [Sharma, 2003] σελ.8-9.

Έστω δύο διαφορετικά φασματικά N -διανύσματα \mathbf{f} και \mathbf{g} . Προϋπόθεση για να προκαλούν την ίδια απόκριση από τα κωνία και επομένως να αντιστοιχούν στο ίδιο χρώμα, είναι να ισχύει η σχέση:

$$\mathbf{S}^T \mathbf{f} = \mathbf{S}^T \mathbf{g} \quad (3.4)$$

λόγω του ότι ο \mathbf{S} είναι ένας $N \times 3$ πίνακας με $N > 3$, το παραπάνω σύστημα εξισώσεων θα έχει πολλαπλές λύσεις. Αυτό ισοδυναμεί με πολλά διαφορετικά φάσματα που αντιστοιχούν στο ίδιο χρώμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται στη χρωματομετρία, μεταμερισμός. Η έγχρωμη όραση έχει ως χαρακτηριστικό την τριχρωμία, κατά την οποία είναι δυνατόν να παραχθεί το ίδιο χρώμα για δεδομένο ερέθισμα, χρησιμοποιώντας το συνδυασμό φωτός από τρεις μόνο πηγές φωτός [Sharma, 2003] σελ.9.

Αν θεωρηθούν λοιπόν, τρεις φωτομετρικά ανεξάρτητες[†] πηγές με φάσματα \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 και \mathbf{p}_3 (πρωτεύοντα φάσματα χρώματος), τότε μαθηματικά, η χρωματομετρική ανεξαρτησία τους είναι ισοδύναμη με τη γραμμική ανεξαρτησία των τριών διανυσμάτων $\mathbf{S}^T \mathbf{p}_1$, $\mathbf{S}^T \mathbf{p}_2$ και $\mathbf{S}^T \mathbf{p}_3$. Αν ως \mathbf{P} ορισθεί ο πίνακας $[\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3]$, τότε ο πίνακας $\mathbf{S}^T \mathbf{P}$ είναι μη ιδιάζων (υπάρχει ο αντίστροφός του).

Αν ορίσουμε το διάνυσμα $\mathbf{a}(\mathbf{f}) = [a_1(\mathbf{f}), a_2(\mathbf{f}), a_3(\mathbf{f})]$ του γραμμικού συνδυασμού των πηγών \mathbf{P} , το οποίο εξαρτάται από το φάσμα \mathbf{f} :

$$\mathbf{a}(\mathbf{f}) = (\mathbf{S}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{f} \quad (3.5)$$

τότε ισχύει:

$$\mathbf{S}^T \mathbf{f} = \mathbf{S}^T \mathbf{P} \mathbf{a}(\mathbf{f}) \quad (3.6)$$

η οποία είναι η σχέση για τη χρωματική ταύτιση. Για κάθε ορατό φάσμα \mathbf{f} υπάρχει ένας γραμμικός συνδυασμός των αρχικών \mathbf{P} που είναι το διάνυσμα $\mathbf{a}(\mathbf{f})$, που αντιστοιχεί στο χρώμα του \mathbf{f} , ενώ το $\mathbf{a}(\mathbf{f})$ προσδιορίζει το μοναδικό γραμμικό

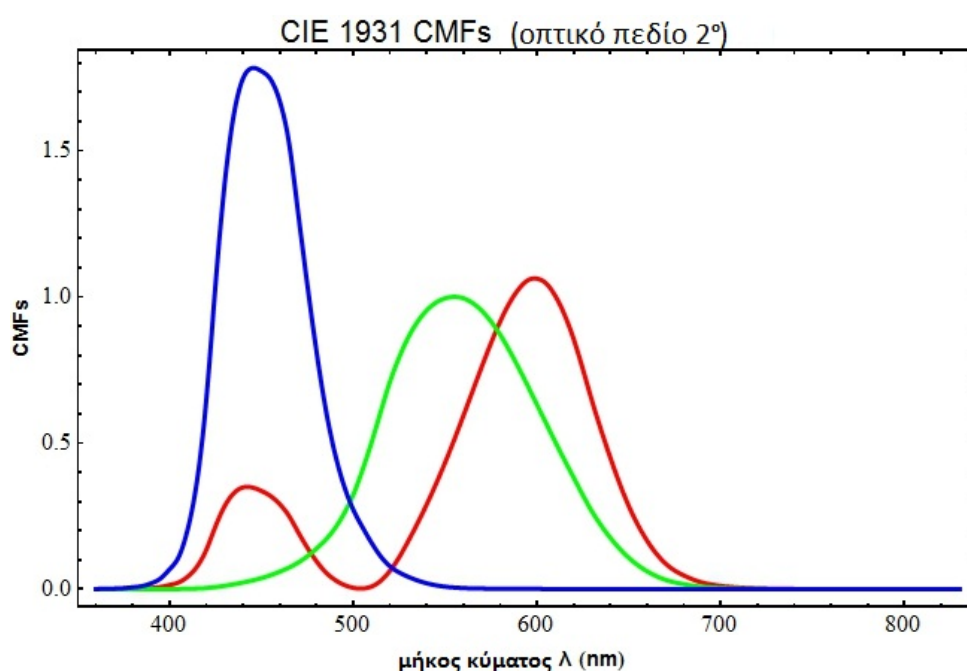
[†] Χρωμομετρικά ανεξάρτητα ονομάζονται τα φάσματα, για τα οποία το χρώμα οποιουδήποτε εξ' αυτών, δεν μπορεί οπτικά να προκύψει από γραμμικό συνδυασμό των υπολοίπων.

συνδυασμό των αρχικών, ο οποίος συμπίπτει με το χρώμα του φάσματος f στο χρώμα [Sharma, 2003].

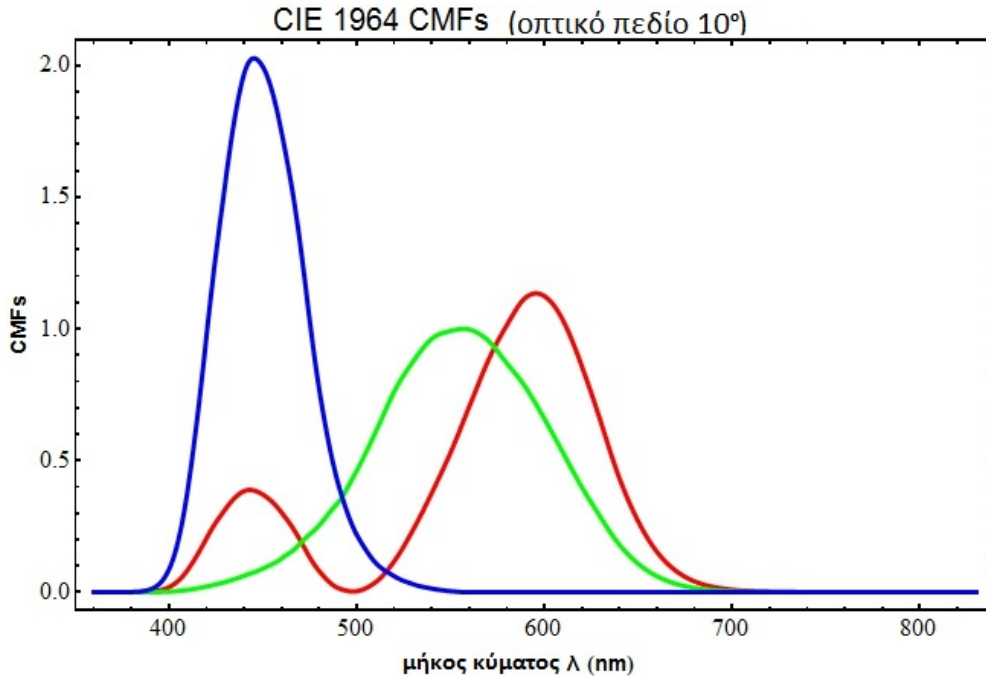
3.2 Color Matching Functions (CMFs) και Τριχρωματικές τιμές (tristimulus values)

Λόγω της ανάγκης ύπαρξης κοινά αποδεκτών συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης (CMFs), ο οργανισμός CIE (Commission Internationale de l' Eclairage), όρισε το 1931 τα στάνταρ χρωματομετρίας και εξακολουθεί να δημιουργεί τη βάση της σύγχρονης χρωματομετρίας [Sharma, 2003]. Έτσι, προτάθηκαν δύο διαφορετικά αλλά ισοδύναμα σετ από CMFs, το CIE RGB CMFs, και το CIE XYZ CMFs.

Και τα δύο αποτελούν γραμμικούς μετασχηματισμούς της ευαισθησίας των κωνίων S_i και μεταξύ τους γραμμικώς ανεξάρτητα και ικανά να περιγράψουν πλήρως έναν τριχρωματικό χώρο. Η βασική τριάδα CMFs η οποία χρησιμοποιείται κυρίως είναι η CIE XYZ (1931 και 1964), η οποία αποτελείται από τα $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ και $\bar{z}(\lambda)$ που εικονίζονται στα Σχήματα 3.3 και 3.4 για οπτικό πεδίο 2° και 10° αντίστοιχα.



Σχήμα 3.3: Συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης CMFs για οπτικό πεδίο παρατηρητή 2° .
(Από <http://www.cie.co.at/publ/abst/15-2004.html>)



Σχήμα 3.4: Συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης CMFs για οπτικό πεδίο παρατηρητή 10°. (Από <http://www.cie.co.at/publ/abst/15-2004.html>)

Ο υπολογισμός των χρωματικών συντεταγμένων X , Y και Z ενός φάσματος κατανομής $f(\lambda)$ στο σύστημα CIE XYZ γίνεται με τη βοήθεια των συναρτήσεων $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ και $\bar{z}(\lambda)$ στις ακόλουθες σχέσεις [Pratt, 1991]:

$$X = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \bar{x}(\lambda) f(\lambda) d\lambda \quad (a)$$

$$Y = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \bar{y}(\lambda) f(\lambda) d\lambda \quad (b) \quad (3.7)$$

$$Z = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \bar{z}(\lambda) f(\lambda) d\lambda \quad (c)$$

όπου λ_{min} είναι 380 nm και λ_{max} 780 nm. Οι συντεταγμένες X , Y και Z καλούνται τριχρωματικές τιμές (tristimulus values).

3.3 Χρωματικότητες (chromaticities)

Κάθε χρώμα μπορεί να προσδιοριστεί από ένα σετ τριχρωματικών τιμών, XYZ και για αυτόν το λόγο μπορεί να αποδοθεί ως διανύσματα σε χώρο τριών διαστάσεων. Όμως, αυτή η αναπαράσταση είναι δύσκολη για την αναπαραγωγή της σε δισδιάστατα μέσα. Σε αυτήν την περίπτωση είναι πιο πρακτικό, οι συντεταγμένες

να μπορούν να περιγραφούν κανονικοποιημένες, έτσι ώστε το άθροισμά τους να είναι ίσο με τη μονάδα. Έτσι, τα διαγράμματα σχεδιάζονται με δύο μόνο χρωματικές συντεταγμένες σε κοινούς κάθετους άξονες [Sharma, 2003]. Οι κανονικοποιημένες αυτές συντεταγμένες ονομάζονται χρωματικότητες (chromaticities) xyz [Pratt, 1991]:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (a),$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (b), \quad (3.8)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (c),$$

ενώ ισχύει:

$$x + y + z = 1 \quad (3.9)$$

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις, η συντεταγμένη z είναι εξαρτημένη από τις x , y και η ίδια δεν φέρει πληροφορία.

Κατά την αναπαράσταση του χρώματος με τις συντεταγμένες x , y η απώλεια πληροφορίας περιορίζεται μόνο στο μέγεθος των X , Y , Z συντεταγμένων, ενώ διατηρείται αναλλοίωτη η κατεύθυνση του διανύσματος $[X, Y, Z]$. Αν δηλαδή οι x , y τιμές ενός χρώματος είναι γνωστές και η Y (φωτεινότητα) είναι άγνωστη, τότε από τις σχέσεις 3.8 θα ισχύει για το $[X, Y, Z]$ διάνυσμα:

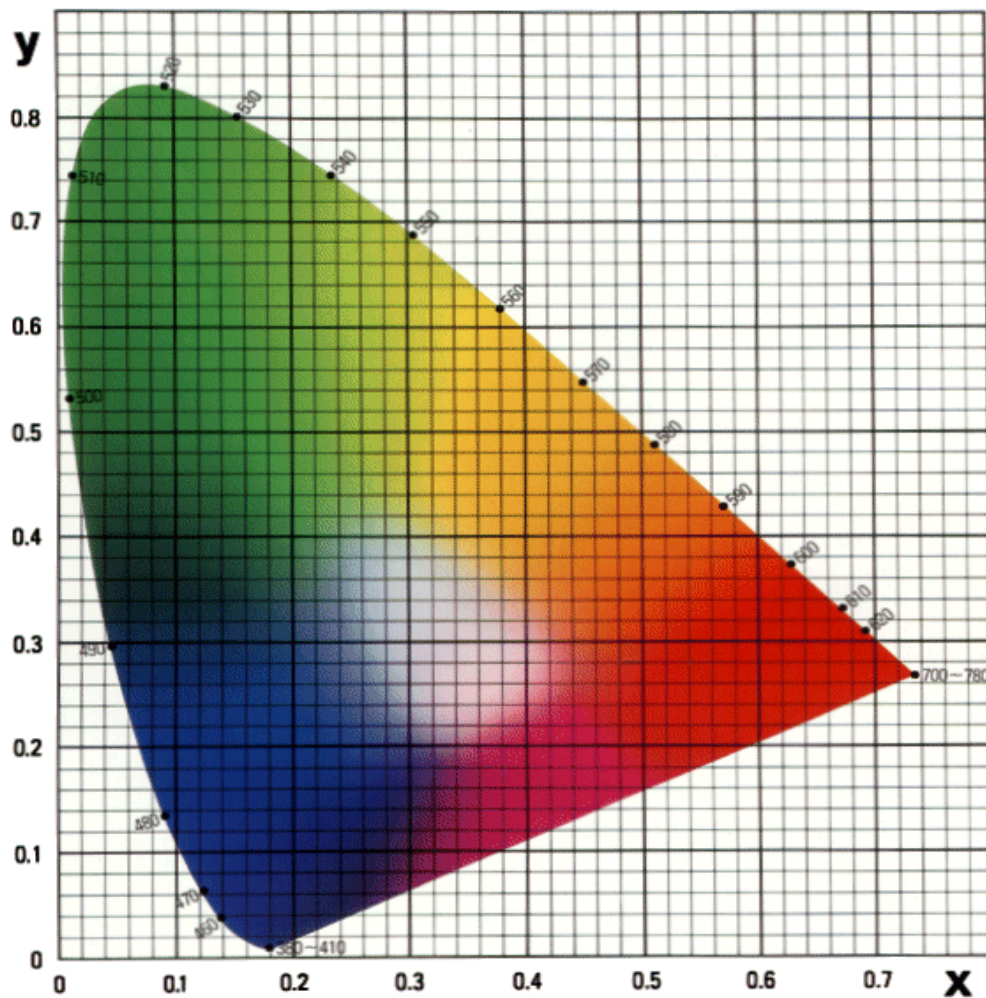
$$[X, Y, Z] = Y \left[\frac{1}{Y}x, 1, \frac{1}{Y}(1-x-y) \right] \quad (3.10)$$

Οι x , y συντεταγμένες φέρουν λοιπόν, την πληροφορία κατεύθυνσης του $[X, Y, Z]$ διανύσματος, όπως και την πληροφορία χρωματικότητας και ονομάζονται χρωματικές συντεταγμένες (chromaticity coordinates) [Χαραλαμπίδης, 2008].

3.3.1 Διάγραμμα χρωματικότητας x - y

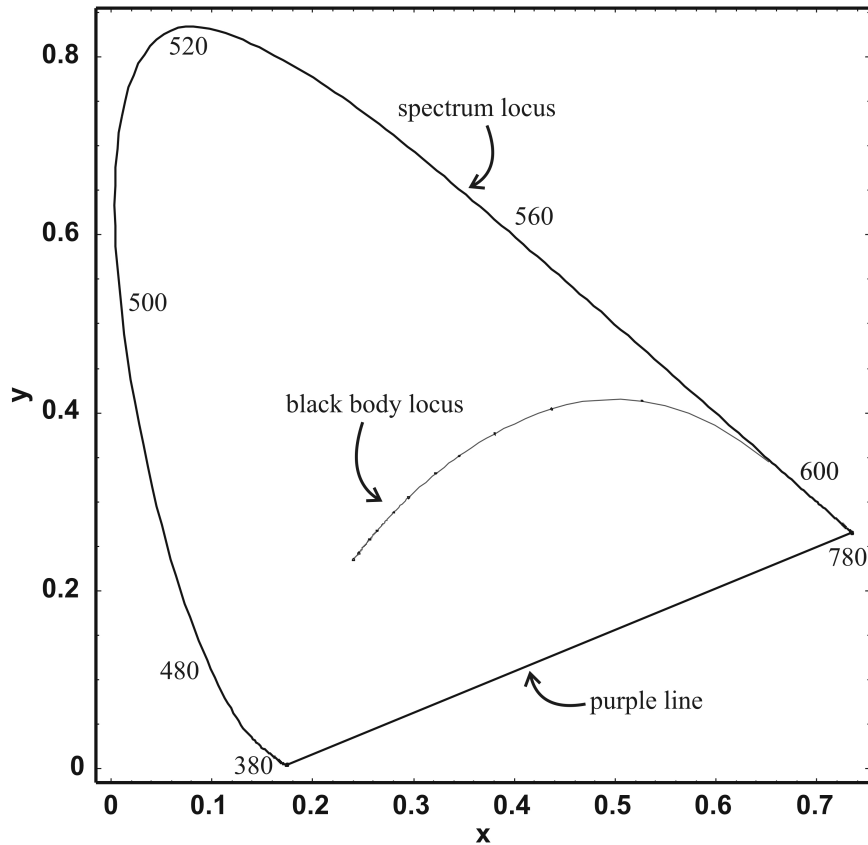
Ο χρωματικός χώρος που δημιουργείται από τις δύο χρωματικές συντεταγμένες x και y ονομάζεται CIE xy . Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η καμπύλη που απεικονίζει το ορατό μονοχρωματικό φάσμα στο διάγραμμα χρωματικότητας CIE xy . Οι τιμές που εικονίζονται κατά μήκος της καμπύλης, δίνουν το μήκος

κύματος σε nm του εκάστοτε χρώματος που βρίσκεται στο συγκεκριμένο σημείο της περιφέρειας της καμπύλης και αντιστοιχεί σε μονοχρωματική ακτινοβολία.



*Σχήμα 3.5: Ορατό φάσμα στο διάγραμμα χρωματικότητας
(Από <http://escience.anu.edu.au/lecture/cg/Color/>)*

Το εσωτερικό του κυρτού χώρου (convex hull), του οποίου τα άκρα ενώνονται με μία ευθεία γραμμή (purple line) απεικονίζει όλα τα ορατά φάσματα που υπάρχουν. Αποτέλεσμα της γραμμικής σχέσης ανάμεσα στο φάσμα και στις τριχρωματικές του τιμές, είναι ότι αν στο χρωματικό διάγραμμα συνδυαστούν δύο διαφορετικά φάσματα για την παραγωγή ενός χρώματος, τότε οι χρωματικές συντεταγμένες του θα προσδιορίσουν τη θέση αυτού, πάνω στο ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τα σημεία των δύο αρχικών φασμάτων [Wyszecki and Stiles, 1982].

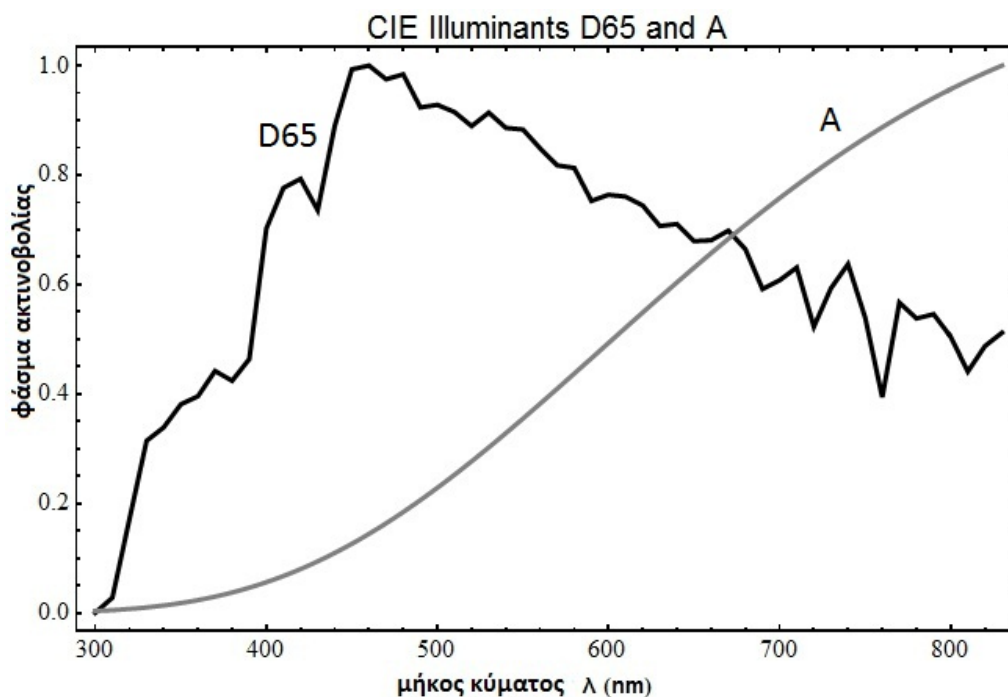


Σχήμα 3.6: Καμπύλη χρωματικότητας μέλανος σώματος

Στο Σχήμα 3.6 εικονίζεται η καμπύλη χρωματικότητας της ακτινοβολίας μέλανος σώματος (black body locus), καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία του. Μέλαν σώμα καλείται το ιδεατό σώμα, το οποίο απορροφά πλήρως την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που δέχεται για κάθε μήκος κύματος. Για τον ίδιο λόγο αποτελεί και ιδανικό εκπομπό θερμικής ακτινοβολίας, η ένταση της οποίας περιγράφεται από την εξίσωση του Planck [Kuo-Nan, 1980; Graeme, 1994]. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες αντιστοιχούν σε περισσότερο κόκκινα χρώματα, ενώ οι υψηλότερες σε μπλε χρώματα.

Κάθε πηγή ακτινοβολίας που φωτίζει το χώρο, έχει συγκεκριμένες x , y συντεταγμένες, οι οποίες γενικά βρίσκονται κοντά στην καμπύλη μέλανος σώματος [Sharma, 2003; Pratt, 1991]. Η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα στις χρωματομετρικές συντεταγμένες της πηγής και σε αυτές ενός μέλανος σώματος συγκεκριμένης θερμοκρασίας T (°K), καθορίζει και τη CCT (Correlated Color Temperature) θερμοκρασία της πηγής φωτός [Hernández-Andrés et al., 2001, Jacobson et al., 1988]. Καθώς οι πηγές φωτός και οι σχετικές με αυτές CCT θερμοκρασίες είναι σημαντικές

για τον ορισμό χρωματικών χώρων, την αντιληπτική ικανότητα του ανθρώπου σε διαφορές χρωμάτων και θέματα ισορροπίας λευκού, ο οργανισμός CIE έχει προτυποποιήσει φάσματα τέτοιων πηγών. Δύο τέτοια φάσματα των προτύπων D65 (Daylight, CCT 6500K), A εμφανίζονται στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 3.7):



Σχήμα 3.7: Φάσματα ακτινοβολίας πρότυπων φωτιστικών πηγών

3.3.2 Χρωματικός χώρος Lab και αντιληπτικά ομοιογενείς χώροι

Ένα πρόβλημα του χρωματικού χώρου CIE XYZ, αποτελεί το γεγονός ότι οι χρωματικές συντεταγμένες X , Y και Z δεν παρουσιάζουν κάποια σύνδεση με την ανθρώπινη αντίληψη για το χρώμα, η οποία χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά όπως τη φωτεινότητα, τον κορεσμό και την απόχρωση [Wyszecki and Stiles, 1982; Pratt, 1991]. Ακόμη, η απόσταση δύο χρωμάτων στο χώρο CIE XYZ δεν σχετίζεται με άμεσο τρόπο με την αντιληπτική χρωματική διαφορά του παρατηρητή, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ομοιογένεια στον χρωματικό χώρο.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, η CIE ανέπτυξε δύο νέους χρωματικούς χώρους, τον CIE 1976 $L^*u^*v^*$ και τον CIE 1976 $L^*a^*b^*$ ή CIELAB, με κοινή κλίμακα φωτεινότητας L^* . Ο μετασχηματισμός των L^* , a^* και b^* στο χώρο CIELAB δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις [Pratt, 1991, Sharma, 2003]:

$$L^* = 116 f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (a)$$

$$a^* = 500 f\left(\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right) \quad (b) \quad (3.11)$$

$$b^* = 200 f\left(\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right) \quad (c)$$

και

$$f(x) = \begin{cases} x^{\frac{1}{3}} & x > 0.008856 \\ 7.787 + \frac{16}{116} & x \leq 0.008856 \end{cases} \quad (3.12)$$

όπου X_n , Y_n και Z_n είναι οι συντεταγμένες του επιλεγμένου λευκού χρώματος αναφοράς (π.χ. D65). Ο προσδιορισμός αυτός του λευκού αναφοράς και η ομοιογένεια του χρωματικού χώρου $L^*a^*b^*$ είναι σημαντικοί παράγοντες, καθώς επηρεάζουν την αντιληπτική χρωματική ικανότητα του παρατηρητή.

3.4 Χρωματικές διαφορές

Κατά την κατασκευή του χώρου CIELAB ήταν επιθυμητό, η Ευκλείδεια απόσταση ΔE_{Eu}^* μεταξύ δύο χρωμάτων, που έχουν συντεταγμένες (L_1^*, a_1^*, b_1^*) και (L_2^*, a_2^*, b_2^*) , να εκφράζει τη χρωματική διαφορά τους. Η απόσταση αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta E_{Eu}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (3.13)$$

Μία διαφορά ΔE_{Eu}^* των 2,3 μονάδων αντιστοιχεί σύμφωνα με τους Mahy et al. (1994) σε “ελάχιστη παρατηρούμενη διαφορά” JND (Just Noticeable Difference), η οποία θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα (3.6). Η σχέση 3.13 συνδέει τη διαφορά χρώματος με την ευκλείδεια απόσταση, ενώ ο χώρος CIELAB θεωρείται προσεγγιστικά ομοιογενής και χαίρει μεγάλης αποδοχής.

Οι νέες προσπάθειες για ομοιογένεια σε χρωματικούς χώρους, οδήγησε στην ανάπτυξη πολυπλοκότερων εξισώσεων χρωματικής διαφοράς, οι οποίες δεν συσχετίζονται με την Ευκλείδεια απόσταση, αλλά εμπλέκουν όρους, όπως τη διαφορά

φωτεινότητας (L), κορεσμού (C) και απόχρωσης (H). Έτσι, αναπτύχθηκαν οι φόρμουλες CIE-94 [CIE, 1995] και CIE-DE2000 [Luo et al., 2001]. Στην παρούσα έρευνα θα χρησιμοποιηθεί η φόρμουλα CIE-94, καθώς η CIE-DE2000 παρουσιάζει προβλήματα στην περιοχή των μπλε αποχρώσεων [Sharma, 2003]. Στην επόμενη ενότητα δίνεται λεπτομερέστερα η φόρμουλα CIE-94, καθώς πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, τόσο στο θεωρητικό, όσο και στο πειραματικό μέρος της προτεινόμενης έρευνας.

3.4.1 Η φόρμουλα ΔE_{CIE-94}

Ο οργανισμός CIE το 1994 δημιούργησε το μοντέλο διαφοράς χρώματος CIE 1994, ΔE_{CIE-94} το οποίο βασίζεται στο χώρο CIELAB και όρισε τις παρακάτω συνθήκες κάτω από τις οποίες επιτυγχάνεται σωστή χρήση αυτού [CIE, 1995]. Συγκεκριμένα απαιτείται:

- ▲ Τα δείγματα να έχουν χρωματική ομοιογένεια.
- ▲ Η διαφορά χρώματος τους να είναι μικρότερη των 5 μονάδων.
- ▲ Να τοποθετούνται σε επαφή το ένα με το άλλο.
- ▲ Η γωνία θέασης παρατηρητή να είναι πάνω από 4°.
- ▲ Τα δείγματα να φωτίζονται με 1000lux από πηγή της οποίας το φάσμα να προσεγγίζει το πρότυπο D65 και να βρίσκονται σε ομοιόμορφο γκρι φόντο ($L^*=50$).

Στην περίπτωση δύο χρωμάτων με CIELAB συντεταγμένες για το πρώτο L_1^* , a_1^* και b_1^* , ενώ για το δεύτερο αντίστοιχα θα είναι L_2^* , a_2^* και b_2^* . Η συνάρτηση για τον υπολογισμό της διαφοράς χρώματος θα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta E_{CIE-94}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H S_H}\right)^2} \quad (3.14)$$

όπου,

$$\Delta L^* = L_2^* - L_1^* \quad (3.15)$$

$$\Delta C^* = C_{\alpha, b, 2}^* - C_{\alpha, b, 1}^* \quad (3.16)$$

$$\text{όπου} \quad C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (3.17)$$

και το ΔH^* θα δίνεται από τη:

$$\Delta H^* = \frac{2(\alpha_2^* b_1^* - \alpha_1^* b_2^*)}{\sqrt{C_{ab,2}^* C_{ab,1}^* + \alpha_2^* \alpha_1^* + b_2^* b_1^*}} \quad (3.18)$$

Και τα S_c και S_H υπολογίζονται σύμφωνα με τις:

$$S_c = 1 + 0,045 C_{ab}^* \quad S_H = 1 + 0,015 C_{ab}^* \quad (3.19)$$

$$\text{και} \quad S_L = 1, \quad k_L = k_C = k_H = 1$$

3.5 Ελάχιστη αντιληπτή διαφορά χρώματος

Για όλες τις αισθήσεις, οι ουδοί είναι απαραίτητοι, αλλιώς θα υπήρχε συνεχής διάσπαση της προσοχής από μικρές, ασήμαντες μεταβολές στο περιβάλλον. Ουδός ή κατώφλι ή Ελάχιστη Αντιληπτή Διαφορά JND (Just Noticeable Difference) ορίζεται η μικρότερη ποσότητα, ή μεταβολή σε ένα ερέθισμα, η οποία γίνεται αισθητή. Όμως, στην πραγματικότητα οι αισθήσεις δεν λειτουργούν κατ' αυτόν τον απλό τρόπο.

Καθώς η μεταβολή στο φυσικό ερέθισμα αυξάνει, αυξάνει και η πιθανότητα για τον παρατηρητή να εντοπίσει τη μεταβολή αυτή. Επίσης, λόγω του ότι σε κάθε άνθρωπο διαφέρει η ευαισθησία των αισθήσεών του από των άλλων, η γενική απόκριση του πληθυσμού σε ένα ερέθισμα θα περιγραφόταν καλύτερα από μία πιθανότητα ανίχνευσης. Έτσι, οι ουδοί και τα JND πάντοτε προσδιορίζονταν από τις πιθανότητες ανίχνευσης του ερεθίσματος [Henry, 2002].

Κεφ. 4: Προτεινόμενη μεθοδολογία

4.1. Η Κεντρική ιδέα

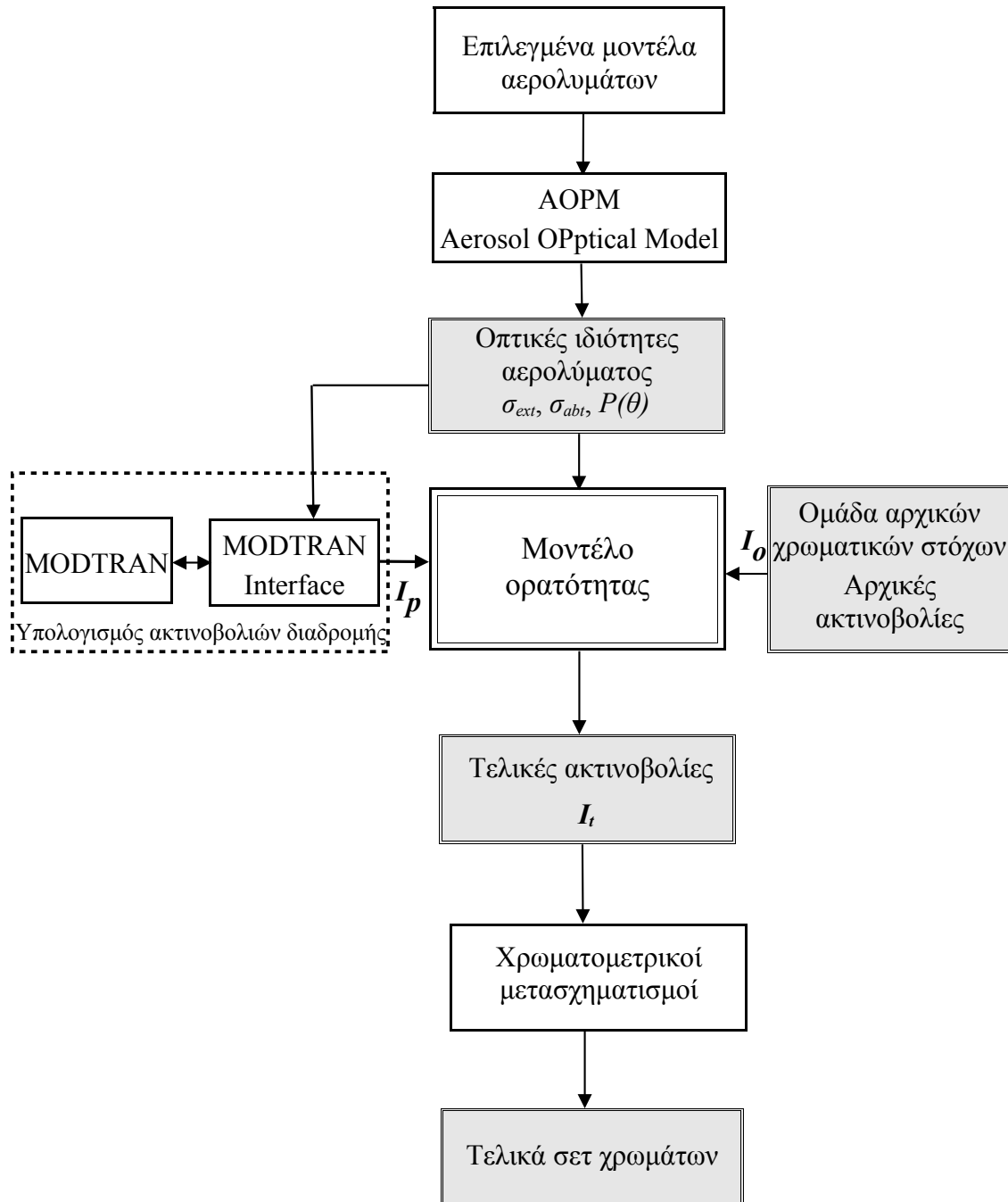
Βασικοί στόχοι της διδακτορικής αυτής μελέτης είναι αρχικά να προσομοιωθεί το χρώμα στόχων που παρατηρούνται διαμέσου ατμόσφαιρας με ρύπους και στη συνέχεια να βρεθεί η ευαισθησία του παρατηρητή στις μεταβολές των αρχικών χρωματικών τιμών των στόχων, οι οποίες λαμβάνουν χώρα λόγω των ρύπων αυτών. Τέλος, στόχος είναι να πραγματοποιηθεί σύνδεση της ευαισθησίας της αντιληπτικής ικανότητας του παρατηρητή με τις μεταβολές στα αερολυματικά χαρακτηριστικά. Η προτεινόμενη μεθοδολογία θα βασιστεί αρχικά σε προσομοίωση χρωματικών μεταβολών με επίδραση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών αστικών αερολυμάτων για την παραγωγή συνθετικών εικόνων των αντικειμένων σε συνθήκες ρύπων, η οποία θα πραγματοποιηθεί σε δύο στάδια (Σχήματα 4.1 και 4.2).

Στην πρώτη φάση για επιλεγμένες κατανομές αστικού αερολύματος, με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους καθώς και τη χημική τους σύσταση (όπως αυτή εκφράζεται από το δείκτη διάθλασης), θα υπολογιστούν οι οπτικές ιδιότητες του συγκεκριμένου αερολύματος. Οι οπτικές αυτές ιδιότητες θα χρησιμεύσουν για να παραχθεί η προσομοίωση διάδοσης της ακτινοβολίας (ορατού φάσματος) στην ατμόσφαιρα υπό την παρουσία του αερολύματος. Η διαδικασία αυτή θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

Έπειτα, σε δεύτερο χρόνο, θα υλοποιηθεί μοντέλο ορατότητας, το οποίο με αφετηρία συγκεκριμένες ακτινοβολίες αναφοράς[†] (I_0) και τις οπτικές ιδιότητες του εκάστοτε αερολύματος, θα υπολογίζει τη διάδοση της ακτινοβολίας σε οριζόντια διαδρομή για δεδομένη απόσταση, έως το σημείο που βρίσκεται ο υποθετικός παρατηρητής. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας θα είναι η ακτινοβολία από το χρωματικό δείγμα που θα φθάνει στον παρατηρητή, απ' όπου θα εξαχθούν οι χρωματικές συντεταγμένες, οι οποίες θα αντιστοιχούν σε ένα χρώμα για την κάθε περίπτωση. Το σύνολο των χρωμάτων αυτών θα χρησιμοποιηθεί ως βάση δεδομένων για την περαιτέρω μελέτη της ευαισθησίας των παρατηρητών στις χρωματικές μεταβολές.

[†] Ως ακτινοβολία αναφοράς θα θεωρηθεί η ακτινοβολία που εκπέμπει ένας χρωματικός στόχος.

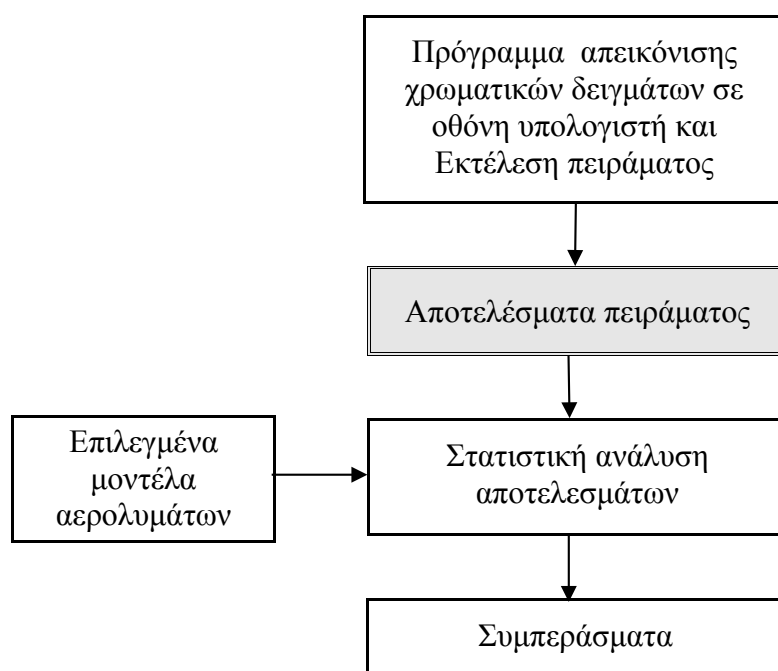
Το διάγραμμα (Σχήμα 4.1) που ακολουθεί περιγράφει τη διάρθρωση του πρώτου μέρους της έρευνας για τον υπολογισμό της τελικής ακτινοβολίας και των αντίστοιχων χρωματικών δειγμάτων:



Σχήμα 4.1: Πρώτο στάδιο της έρευνας

Στο δεύτερο μέρος, θα αναπτυχθεί κατάλληλο λογισμικό για την προβολή των χρωματικών δειγμάτων, που εξήχθησαν από το μοντέλο ορατότητας, σε παρατηρητές μέσω οθόνης υπολογιστή προκειμένου να πραγματοποιηθεί το πειραματικό τμήμα της μελέτης.

Τα τελικά χρωματικά σεντ θα εισαχθούν σε πρόγραμμα απεικόνισής τους στον υπολογιστή, από όπου και μέσω κατάλληλης ψυχοφυσικής μεθόδου θα υλοποιηθεί το πειραματικό μέρος της έρευνας με πραγματικούς παρατηρητές, ενώ θα ακολουθήσει ανάλυση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα (Σχήμα 4.2). Στο στάδιο της ανάλυσης, οι μετρούμενες χρωματικές διαφορές θα συνδεθούν με τα μοντέλα αερολύματος.



Σχήμα 4.2: Δεύτερο στάδιο της έρευνας

4.2 Επιλογή προφίλ αερολυμάτων

Ένα σημαντικό θέμα που προκύπτει, κατά την διερεύνηση των παραμέτρων της παρούσας μελέτης, είναι η επιλογή των τύπων των αερολυμάτων, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν, προκειμένου να γίνει η προσομοίωση των χρωματικών μεταβολών των στόχων. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται συνοπτικά πιθανές πηγές αερολυματικών μοντέλων, το πειραματικό σύστημα μετρήσεων AERONET και το

PMCAMx. Και τα δύο μπορούν να προμηθεύσουν μοντέλα αερολυματικής ρύπανσης. Επίσης, θα παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα κάθε ενός από αυτά τα συστήματα.

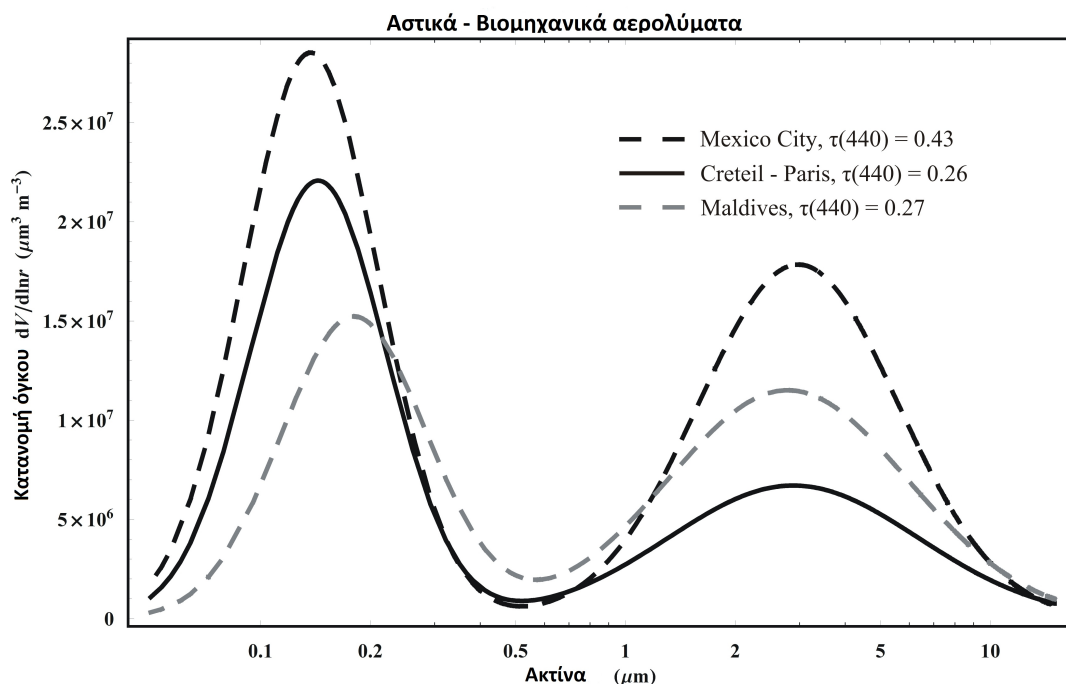
4.2.1 Συνεχείς κατανομές AERONET

Το σύστημα AERONET (Aerosol Robotic NETwork) αναπτύχθηκε από τη NASA και είναι ένα σύνολο από επίγειους τηλεσκοπικούς σταθμούς μέτρησης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μελέτη και μέτρηση των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας [Holben et al., 1998]. Τα δίκτυα αυτά έχουν τη δυνατότητα με χρήση αλγορίθμου αντιστροφής, να υπολογίζουν την κατανομή μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων για ολόκληρη την ατμοσφαιρική στήλη [Dubovik and King, 2000]. Βασική στην παρούσα ερευνητική πρόταση θεωρείται η εργασία των Dubovik et al., [2002], όπου προτείνεται ένας αριθμός στάνταρ αστικών αερολυματικών κατανομών μεγέθους κατάλληλου για προσομοιώσεις οπτικής ρύπανσης. Το τελευταίο είναι σημαντικό, καθώς η τεχνική εξαγωγής των αερολυματικών προφίλ από το AERONET και το πρόβλημα της οπτικής μοντελοποίησης των αερολυμάτων είναι συγγενικά πεδία. Τα πλεονεκτήματα των κατανομών που λαμβάνονται με το συγκεκριμένο σύστημα είναι τα παρακάτω:

- ▲ Έχουν σχετικά μικρή παραμετροποίηση,
- ▲ Είναι συμβατά με μελέτες οπτικών εφαρμογών,
- ▲ Τα μοντέλα του αερολύματος όπως προτείνονται από τη μελέτη των Dubovik et al. [2002] είναι απλά και εύκολα στη χρήση τους,
- ▲ Οι παραμετροποίηση των αερολυμάτων αυτών επιτρέπουν τις επιμέρους μεταβολές των χαρακτηριστικών τους, για τη μελέτη καθενός από αυτά ξεχωριστά,
- ▲ Έχουν εφαρμοστεί σε συγγενική έρευνα σχετική με χρωματικές μεταβολές [Haralabidis and Pilinis, 2008].

Βασικό μειονέκτημα των συγκεκριμένων κατανομών που λαμβάνονται από το AERONET είναι ότι ανταποκρίνονται σε μέσες καταστάσεις ατμοσφαιρικής στήλης, ενώ στην παρούσα έρευνα η ατμοσφαιρική (οπτική) διαδρομή θεωρείται οριζόντια.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μέσω κατανομών για τρεις διαφορετικές αστικές περιοχές όπως αυτές παρέχονται από το σύστημα AERONET. Όπως είναι φανερό από το σχήμα, η κατανομή όγκου ($dV/d\ln r$) προσεγγίζεται από άθροισμα δύο λογαριθμικών κατανομών παρομοίων με την σχέση (4.1).



Σχήμα 4.3: Χαρακτηριστικές κατανομές όγκου – ακτίνας σωματιδίου για αστικά αερολύματα από το σύστημα AERONET για την πόλη του Μεξικού, το Παρίσι και τις Μαλδίβες. Τα δεδομένα προέρχονται από την εργασία των Dubovic et al. [2002]. Το οπτικό πάχος (τ) παρέχεται στα 440nm.

Για την συγκεκριμένη περίπτωση η σχέση είναι [Dubovic et al. 2002]:

$$\frac{dV(r)}{d \ln r} = \sum_{i=1}^2 \frac{C_{V,i}}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_{V,i})^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (4.1)$$

όπου, r (μm) η ακτίνα των σωματιδίων, $C_{V,i}$ η συνολική συγκέντρωση όγκου των σωματιδίων, $r_{V,i}$ η μέση ακτίνα τους και σ_i η γεωμετρική τυπική απόκλιση για την i κατανομή. Για την συγκεκριμένη περίπτωση, αντιστοιχούμε την κατανομή $i = 1$, με την λεπτή περιοχή (f, fine) και την $i = 2$, με την αδρή περιοχή (c, coarse) του αερολύματος. Αν λάβουμε υπόψη το πραγματικό η, και το φανταστικό k μέρος του

δ.δ για τις δύο περιοχές, τότε σχηματίζεται ένα σύνολο δέκα παραμέτρων, πέντε για κάθε υποπεριοχή : $\{C_{V,f}, r_{V,f}, \sigma_f, n_f, k_f\}, \{C_{V,e}, r_{V,e}, \sigma_e, n_e, k_e\}$.

Τυπικές τιμές που αποτελούν την βάση του αερολυματικού μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Στην λογική της παρούσας ερευνητική μελέτης είναι η χρήση του ίδιου ή σχετικού μοντέλου ώστε να μεταβληθούν από την βασική τους κατάσταση οι τιμές και να μελετηθεί το αποτέλεσμα που θα υπάρξει στην ορατότητα.

Πίνακας 4.1: Παράμετροι μοντέλου αερολύματος συστήματος AERONET
[Από Dubovic et al. 2002]

Παράμετροι μοντέλου αερολύματος συστήματος AERONET

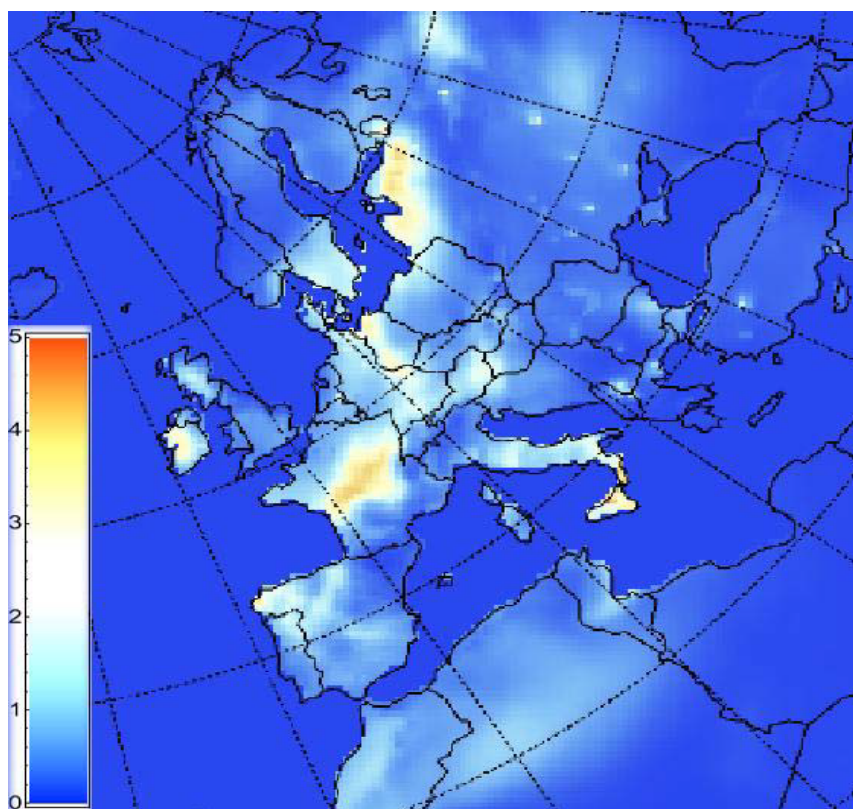
Παράμετρος	Τιμές μέσης κατάστασης αερολύματος		
	Creteil – Παρίσι < $\tau(440)$ > ^a = 0.26	Πόλη του Μεξικού < $\tau(440)$ > ^a = 0.43	Μαλδίβες < $\tau(440)$ > ^a = 0.27
Median radius r_{Vf} (μm) Μέση ακτίνα	0.144	0.137	0.180
Volume concentration C_{Vf} (μm ³ m ⁻³) Συγκέντρωση όγκου	2.379×10 ⁷	3.074×10 ⁷	1.754×10 ⁷
Standard deviation σ_f Τυπική απόκλιση	0.430	0.430	0.460
Median radius r_{Ve} (μm) Μέση ακτίνα	2.885	2.978	2.785
Volume concentration C_{Ve} (μm ³ m ⁻³) Συγκέντρωση όγκου	1.328×10 ⁷	2.818×10 ⁷	2.192×10 ⁷
Standard deviation σ_e Τυπική απόκλιση	0.790	0.630	0.760
Real refractive index ^b n_f, n_e Πραγματικό μέρος του δείκτη διάθλασης	1.400	1.470	1.440
Imaginary refractive index ^b k_f, k_e Φανταστικό μέρος του δείκτη διάθλασης	0.009	0.014	0.011

^a Το οπτικό πάχος (optical thickness) είναι μετρημένο στα 440 nm [Dubovic et al., 2002].

^b Σε όλα τα αερολύματα θεωρούμε ότι η λεπτή και η αδρή περιοχή της κατανομής χαρακτηρίζονται από τις ίδιες τιμές στους συντελεστές n και k .

4.2.2 Αερολύματα από το PMCAMx

Το PMCAMx (Particulate Matter Comprehensive Air-quality Model with extensions) αναπτύχθηκε ως ειδική έκδοση του μοντέλου ποιότητας της ατμόσφαιρας CAMx [Environ, 2003], προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις σύνθεσης και μάζας των σωματιδίων της ατμόσφαιρας. Η έκδοση που προτείνεται να χρησιμοποιηθεί είναι το PMCAMx-2008. Πρόκειται για ένα τρισδιάστατο μοντέλο χημικής μεταφοράς CTM (Chemical Transport Model), το οποίο περιγράφει τις διεργασίες οριζόντιας και κάθετης μεταφοράς και διασποράς, υγρή και ξηρή εναπόθεση, καθώς και χημεία αέριας φάσης [Fountoukis et al., 2011]. Η χημεία αέριας φύσης περιγράφεται από το χημικό μηχανισμό SAPRC99 [Environ, 2003; Carter, 2000]. Στο μοντέλο προσομοιώνεται το ανόργανο τμήμα της αερολυματικής μάζας και η υγρής φάσης [Fahey and Pandis, 2001]. Το μοντέλο PMCAMx-2008 δίνει έμφαση στη χημεία οργανικών ενώσεων, λόγω του ότι περιλαμβάνει την πτητικότητα των οργανικών αερολυμάτων [Tsimpidi et al., 2010; Stanier et al., 2008; Donahue et al., 2006]. Στο Σχήμα 4.4, παρουσιάζεται ένα γράφημα διασποράς ρύπων παραγόμενο από το PMCAMx.



Σχήμα 4.4: Συγκεντρώσεις ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) σωματιδιακής μάζας νιτρικών PM_{1-10} για την 19η Μαΐου 2008. Το σχήμα προέρχεται από διερευνητική εφαρμογή του μοντέλου PMCAMx από το τμήμα Περιβάλλοντος και εμφανίζεται εδώ ως παράδειγμα.

Τα αερολυματικά δεδομένα που λαμβάνουμε από το PMCAMx, παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- ▲ Παρέχονται περισσότεροι τύποι αερολυμάτων, καθώς η προσομοίωση παράγει πληθώρα δεδομένων,
- ▲ Παράγονται αναλυτικά χημικά προφίλ του αερολύματος,
- ▲ Το CTM είναι πιο ρεαλιστική προσέγγιση στην προσομοίωση των αστικών αερολυμάτων και οι πληροφορίες είναι πιο πλήρεις για τη φυσική κατάσταση του αερολύματος,
- ▲ Παρέχεται περιγραφή της καθ' ύψους διαστρωμάτωσης του αερολύματος, επομένως μπορούμε εύκολα να απομονώσουμε τα χαρακτηριστικά του αερολύματος που βρίσκεται στην οριζόντια οπτική διαδρομή,
- ▲ Ανάλογη χρήση τους έχει γίνει στο παρελθόν από το τμήμα και επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα να γίνει υποστήριξη και εφαρμογή του PMCAMx από το Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

Όμως, κάποια μειονεκτήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν τη χρήση του μοντέλου PMCAMx στην παρούσα έρευνα, όπως ότι τα ληφθέντα δεδομένα προσθέτουν πολυπλοκότητα λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων και το γεγονός ότι δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σε οπτικές εφαρμογές. Τόσο το μοντέλο, όσο και τα δεδομένα εισόδου αποτελούν αυτήν την στιγμή αντικείμενο αξιολόγησης από εν εξελίξει έρευνα του τμήματος, ώστε να διαπιστωθεί η καταλληλότητα και η πληρότητά τους για οπτικές εφαρμογές.

4.3 Μοντέλο προσομοίωσης ορατότητας

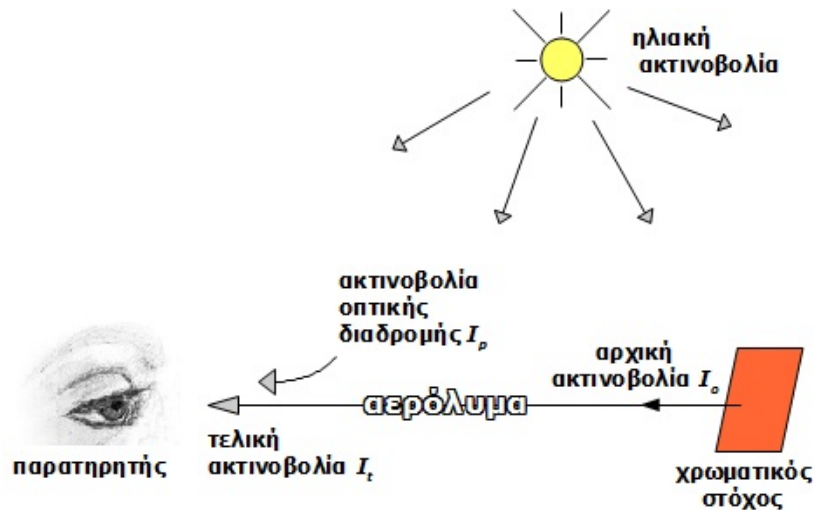
Στην ενότητα 2.2.4 παρουσιάστηκαν η έννοια της ορατότητας και οι σχέσεις που περιγράφουν τη διαδιδόμενη ακτινοβολία από έναν παρατηρούμενο στόχο διαμέσου αερολυματικής ατμόσφαιρας. Στα πλαίσια της προτεινόμενης έρευνας, θα αναπτυχθεί το λογισμικό ενός μοντέλου ορατότητας, το οποίο θα προσομοιώνει τις ακτινοβολίες που λαμβάνει ένας παρατηρητής, από χρωματικούς στόχους ευρισκόμενους σε δεδομένη απόσταση.

Για τον υπολογισμό των ακτινοβολιών αυτών, θα θεωρηθούν οι αρχικές ακτινοβολίες των χρωματικών στόχων (I_o) και ότι ανάμεσα στο παρατηρούμενο αντικείμενο και στον παρατηρητή, μεσολαβεί ατμόσφαιρα που περιέχει διαφορετικό κάθε φορά αερόλυμα, ενώ οι τύποι των επιλεγμένων αερολυμάτων θα καθοριστούν μετά από αξιολόγηση σύμφωνα με όσα αναφέρονται στις προηγούμενες ενότητες 4.2.1. και 4.2.2. Παρόμοια μοντέλα ορατότητας με σύνθεση εικόνων, προκειμένου να προσομοιωθεί η επίδραση του ατμοσφαιρικού αερολύματος στην προσλαμβάνουσα εικόνα έχουν παρουσιαστεί και στο παρελθόν [Eldering et al., 1993; Larson et al., 1988; Henry, 1979].

Το μοντέλο ορατότητας θα περιλαμβάνει τις σχέσεις της ενότητας 2.2.4, καθώς και το λογισμικό MODTRAN για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας της οπτικής διαδρομής. Στην τελική ακτινοβολία που φτάνει στον παρατηρητή πρέπει να συνυπολογιστεί η ακτινοβολία η οποία εισέρχεται στην οπτική διαδρομή (μεταξύ παρατηρητή και στόχου), λόγω του φαινομένου της σκέδασης της ακτινοβολίας [Mahadev and Henry, 1999; Larson et al., 1988]. Οι τιμές της ακτινοβολίας οπτικής διαδρομής (I_p) θα προκύψουν από το λογισμικό MODTRAN, ενώ στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθούν σαν παράμετροι για το μοντέλο ορατότητας. Ο χειρισμός της MODTRAN πραγματοποιείται μέσα από προγραμματιστική διεπαφή, η οποία επιτρέπει την πλήρη παραμετροποίηση, συνεργασία και έλεγχο της MODTRAN από το Mathematica.

Για την εφαρμογή του μοντέλου MODTRAN, θα απαιτηθεί η εύρεση των οπτικών ιδιοτήτων των αερολυμάτων που θα χρησιμοποιηθούν. Τέτοιες παράμετροι είναι ο συντελεστής σκέδασης b_{scat} και απορρόφησης b_{abs} και η συνάρτηση φάσης $P(\theta)$ του αερολύματος. Έτσι, για τον υπολογισμό τους, θα χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο οπτικών ιδιοτήτων για αερολύματα AOPM (Aerosol Optical Model). Το AOPM έχει αναπτυχθεί σε κώδικα Mathematica και θα επεξεργάζεται τις τιμές των χαρακτηριστικών της κάθε αερολυματικής κατανομής.

Στο σχήμα 4.5, το οποίο ακολουθεί, έχει σχεδιαστεί η οπτική γεωμετρία του συστήματος χρωματικός στόχος – παρατηρητής, καθώς και οι επιδράσεις της αερολυματικής ατμόσφαιρας στην προσλαμβάνουσα ακτινοβολία I_i στο σημείο που βρίσκεται ο παρατηρητής.



*Σχήμα 4.5: Οπτική γεωμετρία του μοντέλου χρωματικού στόχου – παρατηρητή.
(Σχέδιο ματιού από <http://caitiri83.deviantart.com>)*

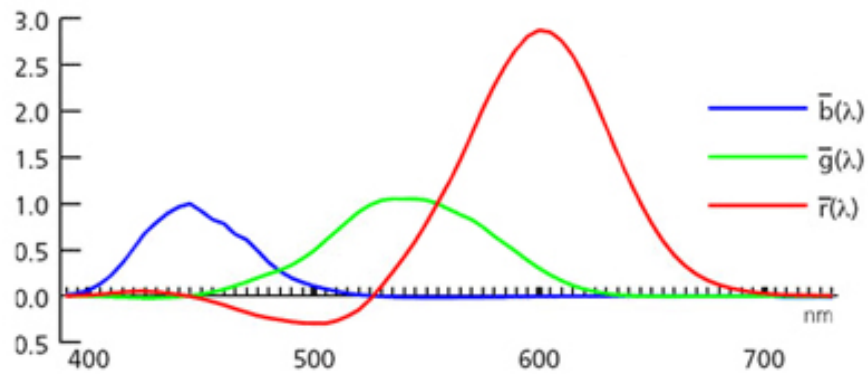
Έπειτα από τον υπολογισμό των τελικών ακτινοβολιών, η χρωματική προσομοίωση των προσληφθέντων φασμάτων ακτινοβολίας, θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού και θα παρέχει τα νέα χρωματικά δείγματα.

4.4 Πειραματικό μέρος

Όπως αναφέρθηκε και στις παραπάνω ενότητες στο πειραματικό μέρος θα προβληθούν με ειδικό λογισμικό, χρωματικά δείγματα σε παρατηρητές, τα οποία θα αποτελούν προσομοιώσεις των χρωματικών στόχων, κάτω από διαφορετικές αερολυματικές συνθήκες. Το λογισμικό εκτέλεσης των ψυχοφυσικών πειραμάτων, κατά τα οποία θα προσδιορίζονται τα κατώφλια ευαισθησίας των χρωματικών αποκλίσεων, πρόκειται να υλοποιηθεί σε Visual Basic. Οι ψυχοφυσικές μετρήσεις με προβολή δειγμάτων σε πραγματικούς παρατηρητές έχει χρησιμοποιηθεί και στο παρελθόν σε έρευνες με μεταβολές της ορατότητας λόγω ατμοσφαιρικών αερολυμάτων [Henry, 1987; Latimer and Hogo, 1981].

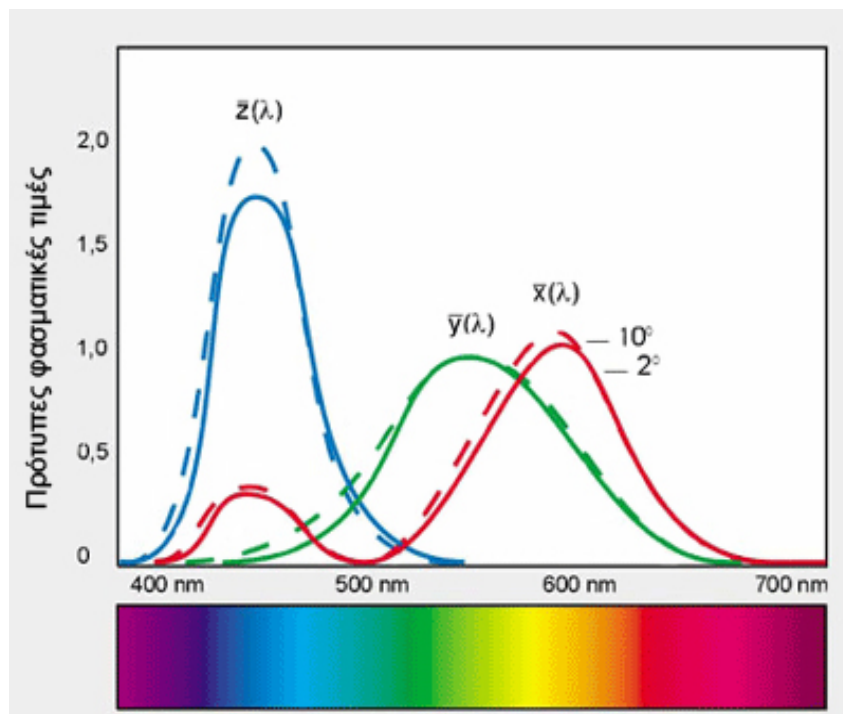
Για να μπορέσει να συνυπολογιστεί η παράμετρος της φύσης της ανθρώπινης αντίληψης, σε πειράματα χρωματομετρίας τα οποία εκτελούνται κάτω από ελεγχόμενες μεθόδους και με πραγματικούς παρατηρητές, έπρεπε να προσδιοριστεί μία προτυποποίηση για την ανθρώπινη όραση. Αυτή αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τον οργανισμό CIE το 1931 (CIE standard observer). Το πρότυπο CIE 1931 όριζε έναν πρότυπο χρωματομετρικό παρατηρητή παρέχοντας δύο σελτ συναρτήσεων

χρωματικής ταύτισης (CMFs). Το πρώτο σετ καλείται CIE RGB CMFs, $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ και $b(\lambda)$ και εικονίζεται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: CIE RGB συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης από τους Stiles και Burch για οπτικό πεδίο 2° το οποίο υπολογίστηκε από 10 παρατηρητές [Από Stiles and Burch, 1955]

Το δεύτερο σετ συναρτήσεων χρωματικής ταύτισης είναι γνωστό ως CIE XYZ CMFs, $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ και $z(\lambda)$ και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7. Στο διάγραμμα αυτό η συνεχόμενη γραμμή αναπαριστά τις συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης για παρατηρητή με οπτικό πεδίο 2° (CIE 1931), ενώ με διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζονται οι συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης παρατηρητή με οπτικό πεδίο 10° (CIE 1931).

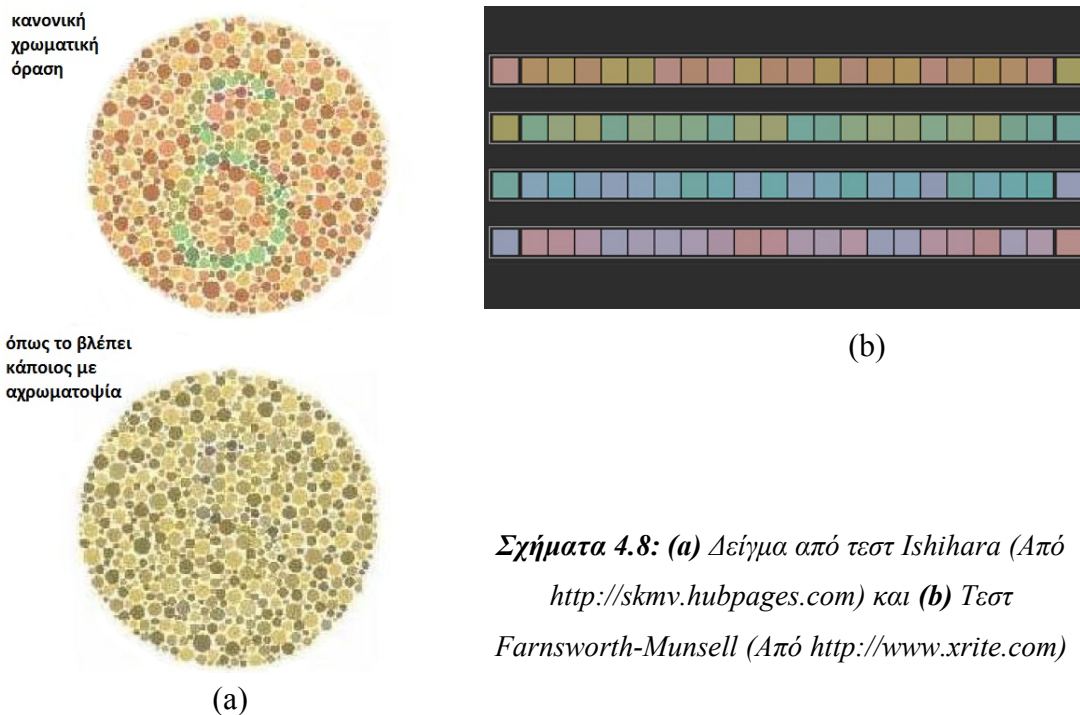


Σχήμα 4.7: CIE συναρτήσεις χρωματικής ταύτισης για τον πρότυπο παρατηρητή κατά CIE 1931 (2°) και CIE 1964 (10°) [Techkon GmbH, 2002]

Έτσι, τα χρωματομετρικά χαρακτηριστικά των παρατηρητών που θα συμμετέχουν στο πειραματικό στάδιο, θα πρέπει να ανταποκρίνονται στις τριχρωματικές φασματικές τιμές $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ οι οποίες έχουν οριστεί για τον πρότυπο παρατηρητή (standard observer) κατά CIE.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, θα ζητηθεί από πραγματικούς παρατηρητές (καλούνται υποκείμενα), οι οποίοι πληρούν τις προδιαγραφές CIE, να προσδιορίσουν τα σημεία όπου διακρίνουν κάποια μεταβολή είτε στο χρωματικό δείγμα που τους προβάλλεται, είτε στη σύγκριση μεταξύ χρωματικών δειγμάτων (εύρεση ουδού).

Η όραση των υποκειμένων θα πρέπει να πιστοποιηθεί ως χρωματικά κανονική, με μία δοκιμασία, όπως τα τεστ Ishihara και Farnsworth-Munsell [Gorraiz et al., 1986; Kirk, 1982]. Δείγματά τους εικονίζονται στα Σχήματα 4.8 (a) και (b), αντίστοιχα.



Σχήματα 4.8: (a) Δείγμα από τεστ Ishihara (Από <http://skmv.hubpages.com>) και (b) Τεστ Farnsworth-Munsell (Από <http://www.xrite.com>)

Ο προσδιορισμός του ουδού σε πειράματα διάκρισης χρωμάτων από πραγματικούς παρατηρητές υλοποιείται με ψυχοφυσικά πειράματα [Kirk, 1982; Stiles, 1959] Οι ψυχοφυσικές μεθοδολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πειραματικό στάδιο της έρευνας και έχουν εφαρμοστεί στο παρελθόν σε μελέτες για την εύρεση ουδών, κατά τη διάρκεια παρόμοιων πειραμάτων [Martínez et al., 1996; Arden et al., 1988; Kirk, 1982; Blackwell, 1952], προκειμένου να προσδιοριστούν τα

κατώφλια για το οπτικό σύστημα είναι οι παρακάτω [Πλαΐνης; Ehrenstein and Ehrenstein, 1999]:

Μέθοδος της ρύθμισης MOA (method of adjustment).

Σε αυτήν τη μέθοδο το υποκείμενο έχει ενεργό ρόλο στη διαδικασία του πειράματος και ο ίδιος μεταβάλλει την ένταση ενός μεταβαλλόμενου, οπτικού στη συγκεκριμένη περίπτωση, ερεθίσματος, έως ότου αντιληφθεί κάποια αλλαγή σε σχέση με την αρχική σταθερή ένταση ερεθίσματος, ή μέχρι η τιμή του μεταβαλλόμενου ερεθίσματος να ταυτιστεί με τη συγκρινόμενη σταθερή κατάσταση. Η μέθοδος της ρύθμισης είναι μία απλή και πρακτική τεχνική, ειδικά για τον εντοπισμό ουδών οι οποίοι μεταβάλλονται στο χρόνο.

Οι επόμενες μέθοδοι που θα παρουσιαστούν, διαφέρουν ως προς το ότι, σε αντίθεση με τη μέθοδο της ρύθμισης, δεν επιτρέπουν στο υποκείμενο να ελέγξει την μεταβολή του ερεθίσματος και αποτελούν πιο τυποποιημένες μεθόδους μέτρησης.

Μέθοδος των ορίων ML (method of limits).

Τα ερεθίσματα μεταβάλλονται αυξάνοντας ή μειώνοντας την τιμή του παράγοντα που τα επηρεάζει. Αρχικά, όπως και στην πρώτη μέθοδο, το ερέθισμα είναι αρκετά μικρής έντασης για να ανιχνευθεί και έπειτα αυξάνεται σταθερά μέχρι να γίνει ορατό (ή το αντίθετο). Στον Πίνακα 4.2 εικονίζεται παράδειγμα με υποθετικές απαντήσεις (N: ΝΑΙ και O: ΟΧΙ) σε ένα πείραμα, όπου στα υποκείμενα προβάλλεται ένα αυξανόμενο οπτικό ερέθισμα, κατά τη διάρκεια τεσσάρων επαναλήψεων (Τεστ) [McCourt, 2001].

Συνήθως σε κάθε τεστ παραλείπονται όλα τα επόμενα ερεθίσματα, αμέσως μετά από αυτό που προκάλεσε την πρώτη θετική απάντηση (στον Πίνακα 4.2 είναι το πρώτο N κάθε στήλης). Ο προσδιορισμός του κατωφλίου σε εφαρμογές του οπτικού συστήματος γίνεται με σύγκριση δύο εικόνων με δύο τρόπους: ή της πρώτης εικόνας σε ταυτόχρονη θέαση με την δεύτερη, ή με ακολουθία της μίας εικόνας μετά την άλλη, ενώ ως κατώφλι ορίζεται το σημείο εκείνο, κατά το οποίο αλλάζει η απόκριση του υποκειμένου.

Πίνακας 4.2: Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος με τη μέθοδο των ορίων

Υποθετικές Απαντήσεις στο Προβαλλόμενο Ερέθισμα (Αυξανόμενο) για Τέσσερις Επαναλήψεις Χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο των Ορίων						
Αυξανόμενο Ερέθισμα	Ερέθισμα	Τεστ 1	Τεστ 2	Τεστ 3	Τεστ 4	% ΝΑΙ [†] Απαντήσεις
	E 01	O	O	O	O	0/4 (0%)
	E 02	O	O	O	O	0/4 (0%)
	E 03	O	O	O	O	0/4 (0%)
	E 04	O	O	O	O	0/4 (0%)
	E 05	O	O	O	O	0/4 (0%)
	E 06	N	O	O	O	1/4 (25%)
	E 07	N	O	N	O	2/4 (50%)
	E 08	N	O	N	N	3/4 (75%)
	E 09	N	N	N	N	4/4 (100%)
	E 10	N	N	N	N	4/4 (100%)
	E 11	N	N	N	N	4/4 (100%)
	E 12	N	N	N	N	4/4 (100%)

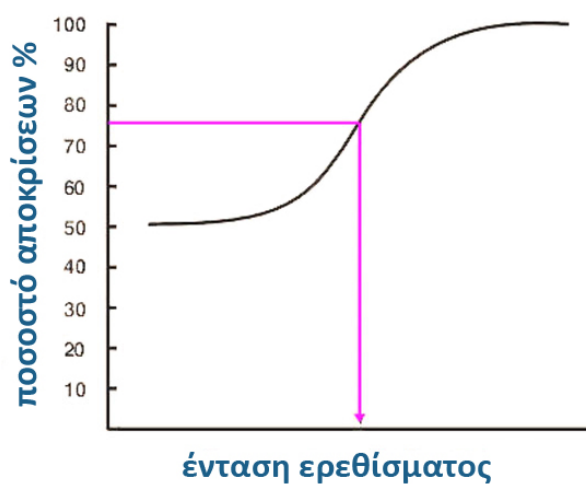
Στον Πίνακα αυτόν, παρατηρείται επίσης, ότι οι ουδοί διαφέρουν από στήλη σε στήλη, παρόλο που πρόκειται για την ίδια σειρά ερεθισμάτων (E 01, E 02, E 03, κ.λ.π.). Αυτό συνάδει με την έννοια ενός στοχαστικού και όχι σταθερού ουδού, είτε γιατί το κατώφλι όντως μεταβάλλεται στο χρόνο, εφόσον αλλάζουν και τα επίπεδα της νευρικής ευερεθιστότητας του υποκειμένου, είτε διότι ένα μεταβαλλόμενο ισοδύναμο ερέθισμα, που ονομάζεται θόρυβος, προστίθεται στον μηχανισμό αντίχενωσης σε διαφορετικές σειρές δοκιμών.

Μέθοδος των προκαθορισμένων τιμών MOCS (method of constant stimuli).

Ένα πρόβλημα με τη μέθοδο της ρύθμισης ή τη μέθοδο των ορίων είναι ότι το υποκείμενο γνωρίζει ποια ένταση του ερεθίσματος να περιμένει σε κάθε τεστ: είτε ένα ελαφρώς αυξημένο σε ένταση ερέθισμα όταν πρόκειται για αύξουσα σειρά ερεθισμάτων, είτε ένα ελαφρώς εξασθενημένο σε ένταση ερέθισμα στην περίπτωση της φθίνουσας σειράς ερεθισμάτων. Αυτό οδηγεί σε μικρές, αδύνατες να μετρηθούν αλλαγές στην ευαισθησία του υποκειμένου [Pelli and Farell, 1995]. Το γεγονός αυτό μπορεί να επηρεάσει το μετρούμενο κατώφλι. Για να ξεπεραστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα δημιουργήθηκε η μέθοδος των προκαθορισμένων τιμών.

Στη μέθοδο αυτή ο πειραματιστής διαλέγει ένα σύνολο από τιμές ερεθισμάτων (συνήθως πέντε έως εννέα) τα οποία με βάση πρότερη έρευνα με άλλη μέθοδο, είναι πιθανά να περιέχουν την τιμή κατωφλίου. Έτσι προβάλλονται με τυχαίο τρόπο

ερεθίσματα με τιμές γύρω από την τιμή ουδού και το υποκείμενο καλείται να αναφέρει αν το ερέθισμα εμφανίστηκε, ή αν η έντασή του ήταν πιο μεγάλη ή ηπιότερη, χωρίς να προβλέπει την ένταση του επερχόμενου ερεθίσματος. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε έναν πίνακα παρόμοιο με αυτό της μεθόδου των ορίων (Πίνακας 4.2) και μπορεί να σχεδιαστεί ένα γράφημα “ψυχομετρικής συνάρτησης”, όπως αυτό του Σχήματος 4.9, απ’ όπου προσδιορίζεται η τιμή του ουδού.



Σχήμα 4.9: Παράδειγμα Ψυχομετρικής Συνάρτησης. Το κατώφλι λαμβάνεται στο 75%.

Μέθοδος προσαρμογής (*adaptive testing method*).

Σε αυτήν τη μέθοδο χρησιμοποιούνται διαδικασίες για να διατηρήσουν το ερέθισμα που ελέγχεται κοντά στον ουδό. Αυτό πραγματοποιείται με προσαρμογή της ακολουθίας των παρουσιάσεων του ερεθίσματος ανάλογα με την απόκριση του υποκειμένου [Ehrenstein and Ehrenstein, 1999].

Μία μέθοδος αυτού του τύπου είναι και η *μέθοδος της σκάλας SM (staircase method)*, μια παραλλαγή της μεθόδου των ορίων, όπου οι τιμές του ερεθίσματος αυξάνονται συνεχώς βήμα - βήμα μέχρι να αλλάξει η απάντηση του υποκειμένου και έπειτα μειώνονται με τον ίδιο τρόπο μέχρι να ξαναλλάξει απάντηση το υποκείμενο. Αυτό συνεχίζεται περιορίζοντας κάθε φορά όλο και περισσότερο το διάστημα που περικλείει τον ουδό.

Ακόμη μία είναι η *μέθοδος Υπολογισμού Παραμέτρου με Διαδοχικούς Ελέγχους PEST (Parameter Estimation by Sequential Testing)*, η οποία θεωρείται πιο

αποτελεσματική από την προαναφερθείσα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε υπολογιστή και προσαρμόζει το ποσό αλλαγής στο ερέθισμα στη βάση δεδομένων, η οποία έχει ήδη συγκεντρωθεί σύμφωνα με τις αποδόσεις του υποκειμένου.

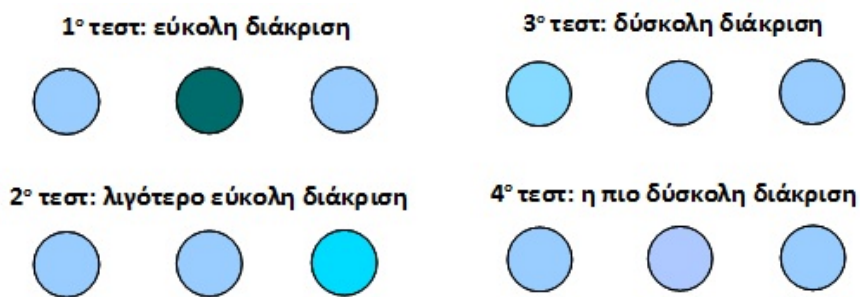
Ένα πρόβλημα που δημιουργείται λόγω της χρήσης συνεχούς ερεθίσματος είναι ότι μόνο το ερέθισμα κοντά στον ουδό παρέχει σχετική πληροφορία, ενώ πολλές από τις τιμές που παρουσιάζονται είναι μακριά από το κατώφλι που αναζητείται. Οι πιο αποτελεσματικές στρατηγικές συνδυάζουν την πρότερη γνώση του πειραματιστή για το κατάλληλο εύρος στην τιμή του ερεθίσματος και την απόκριση του υποκειμένου σε προηγούμενες δοκιμές για να επιλεγεί η ένταση του σήματος του επόμενου τεστ.

Μέθοδος της υποχρεωτικής επιλογής FC (forced-choice procedure).

Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι βασίζονται στην υποκειμενική κρίση του υποκειμένου για αυτό που αντιλήφθηκε. Με τον τρόπο αυτόν, οι απαντήσεις του δεν καθορίζονται μόνο από το κατώφλι του παρατηρούμενου ερεθίσματος και δεν υπάρχει τρόπος να επιβεβαιωθεί η ορθότητά της απάντησης, καθώς άλλα υποκείμενα είναι περισσότερο επιφυλακτικά και άλλα το αντίθετο. Επίσης, τα υποκείμενα μπορεί κατά τη διάρκεια του πειράματος να αλλάξουν τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία απαντούν.

Με τη μέθοδο της υποχρεωτικής επιλογής παρακάμπτεται το πρόβλημα των κριτηρίων απόκρισης. Σε αυτήν τη μέθοδο, το υποκείμενο υποχρεώνεται να επιλέξει κάποιο από τα δείγματα σε κάθε δοκιμασία, ακόμα και αν το ερέθισμα δεν είναι ανιχνεύσιμο από το υποκείμενο και η επιλογή χαρακτηρίζεται, χωρίς μεσολάβηση κριτηρίου, ως “σωστή” ή “λάθος” [McCourt, 2001].

Τα δείγματα μπορούν να παρουσιαστούν ταυτόχρονα ή και διαδοχικά. Πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο εναλλακτικά δείγματα για την επιλογή, αλλά μπορούν να αυξηθούν και ως τέσσερα ή πέντε (παραπάνω συνήθως προκαλούν σύγχυση στο υποκείμενο). Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται ένα τεστ χρωματικής διάκρισης με διαφορετικά επίπεδα αυξανόμενης δυσκολίας.



Σχήμα 4.10: Μέθοδος υποχρεωτικής επιλογής

Έχει διαπιστωθεί ότι το ποσό πληροφορίας του ερεθίσματος για να ληφθεί μια απόφαση φαίνεται να είναι μεγαλύτερο όταν η επιλογή δεν είναι υποχρεωτική [Windhorst and Johansson, 1999].

Η επιλογή ανάμεσα στις προτεινόμενες ψυχοφυσικές μεθόδους για το πειραματικό τμήμα της μελέτης, θα γίνει έτσι ώστε να επιτευχθούν τα ακριβέστερα δυνατά αποτελέσματα στον προσδιορισμό των ουδών για κάθε περίπτωση χρωματικού στόχου. Επίσης, ο αριθμός των υποκειμένων θα καθοριστεί με παρόμοια κριτήρια που θα εγγυώνται επιπλέον την εγκυρότητα και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Αφού πραγματοποιηθούν μετρήσεις ουδών για το σύνολο των αρχικών χρωματικών δειγμάτων και των δειγμάτων με την επίδραση των παραμέτρων που μεταβλήθηκαν, θα υπάρξει αντιστοίχιση των μετρήσεων αυτών με συγκεκριμένους τύπους αερολύματος, ώστε να μπορέσουν να γίνουν συσχετισμοί μεταξύ της αντιληπτικής χρωματικής ικανότητας των υποκειμένων και των αερολυματικών χαρακτηριστικών. Τέλος, θα γίνει στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων για την επίδραση των χαρακτηριστικών του ατμοσφαιρικού αερολύματος στον τρόπο πρόσληψης των χρωμάτων από τον παρατηρητή.

4.5. Αναμενόμενα προϊόντα

Τα ερευνητικά προϊόντα τα οποία προβλέπεται να παραχθούν κατά τη διάρκεια της προτεινόμενης μελέτης, θα πραγματεύονται τη σχέση μεταξύ της οπτικής ποιότητας της ατμόσφαιρας, έτσι όπως αυτή διαμορφώνεται με την παρουσία συγκεκριμένων τύπων αερολυμάτων και της αντιληπτικής απόκρισης του παρατηρητή. Αναλυτικότερα:

- ^ Θα επιδιωχθεί ο άμεσος συσχετισμός βασικών χαρακτηριστικών των αερολυμάτων, όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, η χημική τους σύσταση και επιμέρους χαρακτηριστικά αυτής, με τις ελάχιστα αντιληπτές από τον παρατηρητή, χρωματικές μεταβολές.
- ^ Θα επιχειρηθεί να επιτευχθεί εξάλειψη της χρωματικής παραμέτρου στον υπολογισμό των χρωματικών διαφορών. Με αυτόν τον τρόπο θα αναπτυχθεί μία φόρμουλα όπου παρέχοντας το αρχικό χρώμα και τον τύπο του αερολύματος, θα υπολογίζεται το τελικό χρώμα που γίνεται αντιληπτό από τον παρατηρητή σε μία δεδομένη απόσταση.
- ^ Θα αναπτυχθεί ένα εξειδικευμένο αρθρωτό λογισμικό, για την προσομοίωση των μεταβολών χρώματος από το μοντέλο ορατότητας, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην υλοποίηση του πειραματικού τμήματος της έρευνας. Παράλληλα, κατά την εκπόνηση της μελέτης, αναμένεται η βελτίωση ήδη υπάρχοντος λογισμικού για τη μελέτη ορατότητας της ατμόσφαιρας, που θα αφορά στο εύρος παραμετροποίησης, στην ταχύτητα εκτέλεσης, καθώς και στην αξιοπιστία του κώδικα.
- ^ Θα επεκταθεί και συνεχιστεί προϋπάρχουσα έρευνα του τμήματος [Haralabidis, 2008; 2005]
- ^ Θα εισαχθεί τεχνογνωσία στο τμήμα Περιβάλλοντος, γύρω από την Οπτική Αντίληψη και τα Πειράματα με Ψυχοφυσικές Μεθόδους.

4.6 Χρονοδιάγραμμα

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα εργασιών για την εκπόνηση και ολοκλήρωση της προτεινόμενης διδακτορικής διατριβής. Η μελέτη προβλέπεται να ολοκληρωθεί σε τρία έτη από την παρουσίαση της πρότασης.

Στο πρώτο έτος θα επιλεγθούν οι αερολυματικοί τύποι που θα χρησιμοποιηθούν και θα υπολογιστεί η ακτινοβολία οπτικής διαδρομής. Στη συνέχεια θα ξεκινήσει συγγραφή του μοντέλου ορατότητας, ενώ παράλληλα θα επιλεγθούν οι χρωματικοί στόχοι και προκειμένου να παραχθούν οι τελικές χρωματικές συντεταγμένες.

Στο δεύτερο έτος θα γίνει δημοσίευση του έργου του πρώτου έτους, το οποίο θα αφορά την ανάλυση και την εκτέλεση του μοντέλου ορατότητας. Ακόμα, θα αναπτυχθεί λογισμικό για το πειραματικό μέρος και θα γίνει επιλογή των παρατηρητών. Αφού ολοκληρωθούν τα πειράματα, θα γίνει καταγραφή και στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων τους.

Κατά τη διάρκεια του τρίτου έτους θα αξιολογηθούν τα αποτελέσματα, θα γίνει δημοσίευση του έργου που παράχθηκε κατά το δεύτερο έτος και σχετίζεται με το πειραματικό μέρος της έρευνας, της ανάπτυξης του λογισμικού εφαρμογής του, καθώς και της εκτέλεσής του.

Ακολουθεί Πίνακας (4.3) με τα επιμέρους στάδια του τριετούς χρονοδιαγράμματος, χωρισμένο σε περιόδους που θεωρούνται ικανές για την υλοποίηση των επιμέρους εργασιών.

Πίνακας 4.3: Τριετές χρονοδιάγραμμα εργασιών

	0	3 μήνες	6 μήνες	9 μήνες	12 μήνες
1^ο έτος					
	<i>Επιλογή αερολυματικών δειγμάτων Υπολογισμός οπτικών ιδιοτήτων αερολυμάτων</i>	<i>Εξοικείωση με το λογισμικό MODTRAN Υπολογισμός ακτινοβολίας οπτικής διαδρομής μέχρι τον παρατηρητή</i>	<i>Συγγραφή μοντέλου ορατότητας Επιλογή και προσδιορισμός ακτινοβολιών χρωματικών στόχων Υπολογισμός χρωματικών συντεταγμένων</i>		
2^ο έτος					
	<i>Δημοσίευση έργου A Συγγραφή λογισμικού για την απεικόνιση χρωματικών συντεταγμένων Επιλογή παρατηρητών</i>		<i>Πραγματοποίηση πειραμάτων</i>	<i>Καταγραφή αποτελεσμάτων πειραμάτων Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων</i>	
3^ο έτος					
	<i>Αξιολόγηση αποτελεσμάτων, Δημοσίευση έργου B, Συγγραφή διδακτορικής διατριβής</i>				

Βιβλιογραφία

Anderson, J., Brogniez, C., Cazier, L., Saxena, V. K., Lenoble, J. and McCormick, M. P., (2000). *Characterization of aerosols from simulated SAGE III measurements applying two retrieval techniques*. J. Geophys. Res., 105, pp. 2013-2027.

Anderson G. P., Pukall B., Allred C.L., Jeong L.S., Hoke M., Chetwynd J.H., Adler-Golden S.M., Berk A., Bernstein L.S., Richtsmeier S.C., Acharya P.K., Matthew M.W. Res. Lab. Hanscom AFB MA (1999). *FLAASH and MODTRAN4: state-of-the-art atmospheric correction for hyperspectral data*. IEEE Proceedings of Aerospace Conference, pp. 177-181, Snowmass at Aspen, CO, USA

Arden G. B., Gunduz K., Perry S. (1988). Colour vision testing with a computer graphic system: preliminary results. Doc Ophthalmol; 69: 111.

Berk, A., Bernstein L. S., Anderson G. P., Acharya P. K., Robertson D. C., Chetwynd J. H., and Adler-Golde S. M. (1998). *MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS*. Remote Sensing of Environment, Vol. 65, No. 3, 367-375.

Blackwell H. R., (1952). *Studies of psychophysical methods for measuring visual thresholds*. Journal of the Optical Society of America, 42, 606-616.

Bodrogi P. and Tarczali T., (2000). *Color memory for various sky skin and plant colors: Effect of the image context*. COLOR Research and Application 25(4), 278–289 .

Bohren C.F. and Huffman D.,(1983). *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley, New York .

CIE, (1995). Industrial Color Difference Evaluation. CIE Publication No. 116 – 1995, Central Bureau of the CIE, Vienna.

Dogras C.K., Ioannidou M.P. and Chrissoulidis D.P., (2003). *Analytical study of the changes in the color of daylight due to sulfate droplets and soot grains in the*

atmosphere. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, vol. 84, pp. 223-238.

Donahue N. M., Robinson A. L., Stanier C. O., and Pandis S. N., (2006). *Coupled partitioning, dilution, and chemical aging of semivolatile organics*. Environ. Sci. Technol., 40, 2635-2643, 2006.

Dubovik O. and King M., (2000). *A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements*. J. Geophys. Res., 105, pp. 20673-20696.

Dubovik O., Holben B., Eck T. F., Smirnov A., Kaufman Y. J., King M., Tanré D. and Slutsker I., (2002). *Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations*. J. Atmos. Sci., 59, pp. 590-608

Ehrenstein, W.H. And Ehrenstein, A. (1999). *Psychophysical methods*. In Windhorst, U. and Johansson, H. (eds), Modern Techniques in Neuroscience Research. Springer, Berlin, pp. 1211–1241

Eldering A., Hall J. R., Hussay K. J. and Cass G. R., (1996). *Visibility model based on satellite – generated landscape data*. Environ. Sci. Technol., 30(2): pp. 361-370.

Eldering A., Larson S. M., Hall J. R., Hussay K. J. and Class G. R. (1993). *Development of an Improved Image Processing Based Visibility Model*. Environ. Sci. Technol. 27(4), pp.626-635.

ENVIRON, (2003). *User's Guide to the Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx), Version 4.02*. Report, ENVIRON Int. Corp., Novato, Calif., available at: <http://www.camx.com>

EPA, (1996). *Air quality criteria for particulate matter*. EPA/600/P-95/001aF pp. 3/131

EPA, (1999). *Visibility Monitoring Guidance*. EPA/454/R-99/003 pp. 4-30

EPA, (2004). *Air quality criteria for particulate matter*. EPA/600/P-99/002aF pp. 2/14

Fahey, K., and Pandis, S. N., (2001). *Optimizing model performance: variable size resolution in cloud chemistry modeling*. Atmos. Environ., 35, 4471–4478.

Fountoukis C., Racherla P. N., Denier van der Gon H. A. C., Polymeneas P., Charalampidis P. E., Wiedensohler A., Pilinis C., Pandis S. N., (2011). *Evaluation of a three-dimensional chemical transport model (PMCAMx) in the European domain during the EUCAARI May 2008 campaign*. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions (11) doi:10.5194/acp-11-10331-2011

Friedlander S. K., (1970). *The characterization of aerosols distributed with respect to size and chemical composition*. J. Aerosol Sci. 1:295-307

Gedzelman S.D., (2007). *The Impact of Aerosols on the Color and Brightness of the Sun and Sky*. The City College of New York, New York, NY

Gorraiz J., Horvath H., Raimann G., (1986). *Influence of small color differences on the contrast threshold. Its application to atmospheric visibility*. Applied Optics. Band 25, Heft 15, S. 2537-2545.

Graeme L. S., (1994). *Remote sensing of the lower atmosphere: An introduction*, Oxford University Press, New York, ISBN 0-19-508188-9

Haralabidis P. E. and Pilinis C. (2008). *Skylight Color Shifts Due To Variations of Urban Industrial Aerosol Properties: Observer Color Difference Sensitivity Compared to a Digital Camera*. J. Aerosol Sci. and Technol. 42 (8), 658-673

Haralabidis P. E. and Pilinis C. (2005). *A linear color camera model for a skylight colorimeter with emphasis on the imaging pipeline noise performance*. J. Electron. Imaging, Vol. 14, 043005

Henry R.C. (2002). *Just noticeable Differences in Atmospheric Haze*. Journal of the Air & Waste Management Association, 52 (2002), pp. 1238–1243

Henry R.C. (1987). *Psychophysics, visibility and perceived atmospheric transparency*. Atmospheric Environment 21, 159–164

Henry, R. C. (1979). *The Human Observer and Visibility - Modern Psychophysics Applied to Visibility Degradation*. View on Visibility Regulatory and Scientific. Air Pollution Control Association, Pittsburgh, Pennsylvania

Hernández-Andrés, J. Romero, J. and Lee Jr. R., (2001). Colorimetric and spectroradiometric characteristics of narrow-field-of-view clear skylight in Granada, Spain", *Journal of the Optical Society of America*, vol. 18, pp. 412-42

Hernández-Andrés J., Lee R. L. and Romero J., (1999). *Calculating correlated color temperatures across the entire gamut of daylight and skylight chromaticities*. *Appl. Opt.*, 38(27): 5703-5709.

Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanré D., Buis J. P., Setzer A., Vermote E., Reagan J. A., Kaufman Y. J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I. and Smirnov A., (1998). *AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization*. *Remote Sens. Environ.*, 66: 1–16.

Horvath, H. (1981). *Atmospheric Visibility*. *Atmos. Environ.* 15: 1785–1796.

Houghton J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press.

Hyslop, N. P. (2009). *Impaired visibility: the air pollution people see*. *Atmospheric Environment*, 43, 182 – 195

Jacobson, M. Z. (2005). *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge University Press. pp.

Jacobson R. E., Ray S. F., and Attridge G. G. (1988). *The Manual of Photography*. 8th ed., London and Boston: Focal Press, pp. 32, 50-52.

Kahn R., Banerjee, P., and McDonald D., (2001), *Sensitivity of multiangle imaging to natural mixtures of aerosols over ocean*. *J. Geophys. Res.*, 106, pp. 18,219-18,238.

Kant Y., Ghosh A. B., Sharma M. C., Gupta P. K., Prasad V. K., Badarinath K. V. S., and Mitra A. P., (2000). *Studies in aerosol optical depth in biomass burning areas*

using satellite and ground-based observations. Infrared Physics & Technology, 41, pp. 21-28.

Kerker. M., (1969). *The scattering of light and other electromagnetic radiation.* Academic Press, New York. pp. 46-48

Kim K. and Kim Y., (2005). *Perceived visibility measurement using the HSI color different method.* Journal of the Korean Physical Society, 46(5):1243-1250.

Kirk, D. B. (1982). *Color discrimination at threshold: the approach through increment threshold sensitivity.* Vision. Res. 22. 713-720,

Kneizys X. F., Shettle P. E., Abreu W. L., Chetwynd H. J., Anderson P. G., Gallery O. W., Selby A. E. J. and Clough A. S., (1988). *Users guide to LOWTRAN 7.* USA Air Force Geophysics Laboratory, AFGL-TR-88-0177, Env. Res. Papers, no. 1010.

Kokhanovsky Alexander A., (2008). *Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere.* Springer Jointly published with Praxis Publishing ISBN 978-3-540-23734-1

Lahraoua M. and Raissouni N., (2011). *Satellite Remote Sensing Spectral Analysis & Modtran Simulation: Sw-Lst Noaa19 Improvement & Noaa20 Proposal.* International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), 3 (6), 5169 - 5179.

Λαζαρίδης Μ. (2010). *Ατμοσφαιρική Ρύπανση με Στοιχεία Μετεωρολογίας.* Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ. pp.

Larson M. S., Cass R. G., Hussey J. K. and Luce F. (1988). *Verification of image processing based visibility models.* Environ. Sci. Technol., 22, pp. 629-637

Latimer, D.A., Hogo H. and Daniel T.C., (1981). *The effects of atmospheric optical conditions on perceived scenic beauty.* Atmospheric Environment, 15, pp. 1865–1874.

Lee R. L., Jr. and Hernández-Andrés J. (2005). *Colors of the daytime overcast sky.* Applied Optics 44, pp. 5712-572

- Lewis, R. and Schwartz, S. E. (2008). *Sea Salt Aerosol Production: Mechanisms, Methods, Measurements, and Models – A Critical Review*. Geophysical monograph 152, 413~pp., American Geophysical Union, Washington, DC,.
- Liou K. N. Chou M. D. and Hsu H. H. (2008). *Progress In Atmospheric Sciences: Applications to the Asia-pacific Region*. World Scientific Publishing Company.
- Liou K. N. (1980). *An introduction to atmospheric radiation*. Academic Press, Inc., San Diego, CA, USA, pp.
- Mahadev, S. and Henry, R.C., (1999). *Application of a color appearance model to vision through atmospheric haze*. Color Research and Application 24, 112–120.
- Mahy M., Van Eyckden L. and Oosterlinck A., (1994). *Evaluation of uniform color spaces developed after the adoption of CIELAB and CIELUV*. Color Res. Appl., 19(2), pp. 105 – 121.
- Malm, W. C. and Kreidenweis S. M. (1997). *The effects of models of aerosol hygroscopicity on the apportionment of extinction*. Atmos. Env., 31, pp. 1965-1976.
- Malm, W. C. (1979) *Considerations in the measurement of visibility*. J. Air Polk. Control Ass. 29, 1742.
- Martínez J. A., Poza A. J., Melgosa M. and Hita E., (1997). *Influence of colour matching functions on threshold and large colour differences*. Journal of Optics, Volume 28, Issue 1, pp. 26-36.
- Miller K. A., Siscovick D.S., Sheppard L., Shepherd K., Sullivan J.H., Anderson G.L. and Kaufman J. D., (2007). *Long-term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women*. N Engl J Med, 356: 447-458.
- Mishchenko, M.I., L.D. Travis, and J.W. Hovenier (1999). *Introduction to special section: Electromagnetic scattering by nonspherical particles*. J. Geophys. Res., 104, 31671-31672

- Molenár A. and Mészáros E. (2001). *On the relation between the size and chemical composition of aerosol particles and their optical properties*. Atmos. Environ., 35: 5053–5058.
- National Research Council, (1993). *Protecting visibility in national parks and wilderness areas*. Washington, DC: National Academy Press. 3v.
- Pelli, D. G. and Farell, B. (1995) *Psychophysical methods*. In: M. Bass, E. W. Van Stryland, D. R. Williams, & W. L. Wolfe (Eds.), *Handbook of Optics*, 2nd ed., I (pp. 29.21-29.13). New York: McGraw-Hill
- Pilinis C. and Pandis S. N., (1995). *Physical, Chemical and Optical Properties of Atmospheric Aerosols*. The handbook of Environmental Chemistry, Airborn Particulate Matter, Springer, pp. 99 – 124.
- Pitchford M.L. and Malm, W.C. (1994). *Development and applications of a standard visual index*. Atmospheric Environment, 28 , pp. 1049–1054.
- Plainis S., Tsilimbaris M. K., Pallikaris I.G. (2007). *Νευροφυσιολογία του αμφιβληστροειδή και των οπτικών οδών*, Οφθαλμολογία, 19: 269-283.
- Pratt W. K., (1991). *Digital Image Processing*, 2nd ed., p. 74, Wiley, New York .
- Pust N. J. and Shaw J. A. (2011). *Comparison of Skylight Polarization Measurements and MODTRAN-P Calculations*. J. Appl. Remote Sens.5(1), 053529.
- Seinfeld, J. (1986). *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. John Wiley and Sons, NY
- Seinfeld H. J. and Pandis, N. S. (1998). *Atmospheric chemistry and physics*. John Wiley & Sons, USA. pp.
- Sharma G. (2003). *Digital Color Imaging*. CRC Press, pp.
- Siegel, M. H., (1969). *The effect of forced choice on color discrimination*. Behavior Research Methods & Instrumentation 1: 303-304, January 01.

Sifakis N. and Deschamps P.Y. (1992). *Mapping of air pollution using SPOT satellite data*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58, pp. 1433-1437.

Stanier C. O., Donahue N. M., and Pandis S. N., (2008). *Parameterization of secondary organic aerosol mass fraction from smog chamber data*. Atmos. Environ., 42, 2276-2299,

Stiles W. S., (1959). *Color vision: the approach through increment threshold sensitivity*. Proc. Nat. Acad. Sci. U.S. 45, 229–243

Stiles W. S. and Burch J. M. (1959). *NPL colour-matching investigation: Final report*. Optica Acta, 6, 1-26.

Techkon GmbH, (2002). Color Measurement Technology for the Printing Industry. Available: http://www.aleqs.nl/producten-manuals/COLOR_E.PDF

Trijonis J. C., Malm W. C., Pitchford M., White W.H., Charison R. and Husar R. (1990). *Visibility: Existing and Historical Conditions- Causes and Effects*. NAPAP Report 24, III, pp.(24-31).

Tsigaridis, K., M. Krol, F.J. Dentener, Y. Balkanski, J. Lathière, S. Metzger, D.A. Hauglustaine, and Kanakidou M., (2006). *Change in global aerosol composition since preindustrial times*. Atmos. Chem. Phys., 6, 5143-5162, doi:10.5194/acp-6-5143-2006.

Tsimpidi A. P., Karydis V. A., Zavala M., Lei W., Molina L., Ulbrich I. M., Jimenez J. L. and Pandis S. N., (2010). *Evaluation of the volatility basis-set approach for the simulation of organic aerosol formation in the Mexico City metropolitan area*. Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 525–546,

Van de Hulst, H.C. (1981). *Light Scattering by Small Particles*. Wiley, NY, 1957; Dover, NY.

Watson, J.G. (2002). *Visibility: Science and regulation – 2002 Critical Review*. Journal of the Air & Waste Management Association, 52(6):628–713.

Watson, J. G. and Chow, J. C. (1994) *Clear sky visibility as a challenge for society*. *Annu. Rev. Energy Environ.* 19: 241-266.

Windhorst U. and Johansson H. (1999). *Modern techniques in neuroscience research*. Springer pp. Ehrenstein W. H., Ehrenstein A. (Psychophysical Method),

Wyszecki, G. and Stiles, W. S. (1982). *Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*. 2nd ed. New York, NY: [John Wiley & Sons](#).

Ζερεφός Σ.Χ. (1984). *Μαθήματα φυσικής της ατμόσφαιρας και φυσικής του περιβάλλοντος*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη.

Zhang, R., Khalizov, A., Pagels, J., Zhang, D., Xue, H., and McMurry, P. (2008). *Variability in morphology, hygroscopicity, and optical properties of soot aerosols during atmospheric processing*. *PNAS*, vol. 105, pp. 10291-10296

Χαραλαμπίδης Π. (2008). *Διδακτορική διατριβή: “Ποιότητα της ατμόσφαιρας και ουράνιο χρώμα: Προσέγγιση της συμπεριφοράς παρατηρητή στις μεταβολές του χρώματος με τη χρήση ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής”*. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος.

E-books & Ιστότοποι

Carter, W. P. L. *Programs and Files Implementing the SAPRC-99 Mechanism and its Associates Emissions Processing Procedures for Models-3 and Other Regional Models*: <http://pah.cert.ucr.edu/~carter/SAPRC99.htm>, last access: 31 January 2000.

Fact Sheet, (2008). *Acid Deposition*. New Hampshire Department of Environmental Services Air Resources Division. Available: <http://des.nh.gov/>

Καφετζόπουλος Ε., (2011). *Νευροεπιστήμη και Ψυχολογία. Από τα απλά ανατακλαστικά μοντέλα και τα ένστικτα στις σύνθετες γνωστικές λειτουργίες*. Available:

http://cs.phs.uoa.gr/el/courses/neuroscience/neuroscience_and_psychology.pdf

McCourt M., (2001). *Visual Psychophysics*. Department of Psychology North Dakota State University Fargo. Available:

<http://www.psych.ndsu.nodak.edu/mccourt/Psy460/Visual%20psychophysics/Visual%20psychophysics.html>

Παπαγιάννης Α., (2005). *Φυσική Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος*. Αθήνα. Available:

http://www.environ-develop.ntua.gr/uploads/k_5.pdf

Πλαΐνης Σ. *Εισαγωγή στις Ψυχοφυσικές Μεθόδους*. Σημειώσεις από το Ινστιτούτο Οπτικής και Όρασης IVO (Institute of Vision & Optics) του Πανεπιστημίου Κρήτης.

Available: [http://www.ivo.gr/files/items/1/109/psychophysical_methods\(notes\).pdf](http://www.ivo.gr/files/items/1/109/psychophysical_methods(notes).pdf)