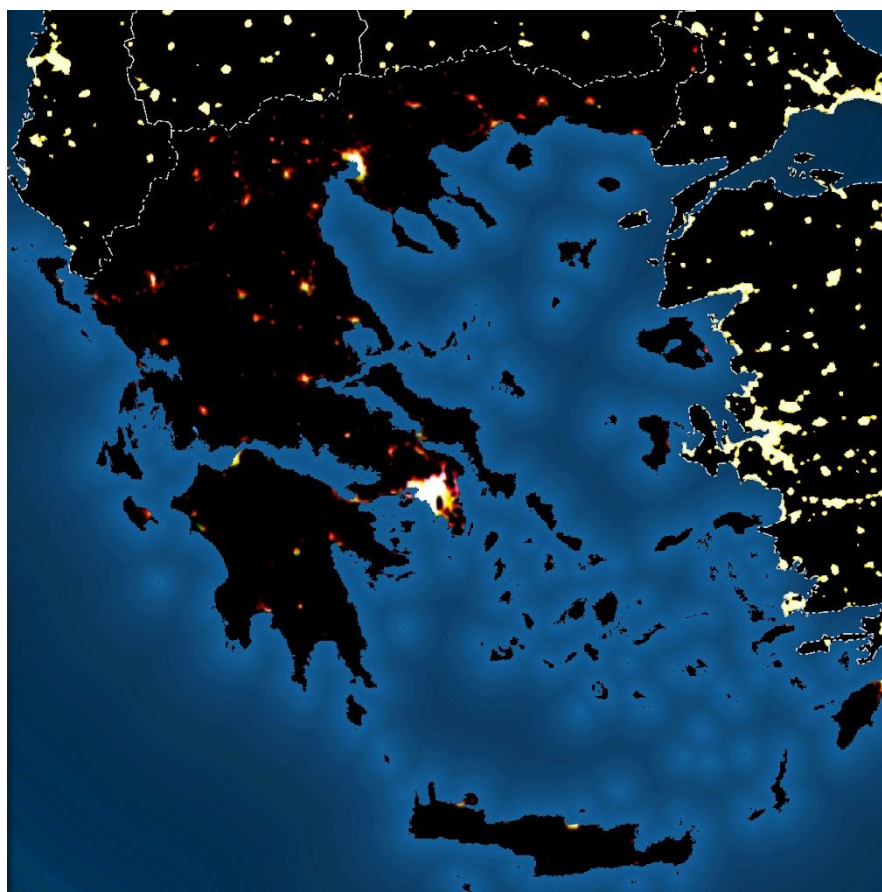




ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
Τμήμα Γεωγραφίας

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΓΠ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΩΤΟΥΡΥΠΑΝΣΗΣ



Πτυχιακή εργασία του Κλάδη Δημήτρη

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
Τμήμα Γεωγραφίας

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΓΠ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΩΤΟΡΥΠΑΝΣΗΣ

Πτυχιακή εργασία του Κλάδη Δημήτρη

Επιβλέπων καθηγητής: Χρίστος Χαλκιάς

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Πρόλογος.....	I
Περίληψη.....	II
Abstract.....	IV
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Μορφές φωτορύπανσης.....	2
1.2.1 Φωτιστική καταπάτηση (Light Trespass – Intrusive light)	3
1.2.2 Υπερφωτισμός (Over-Illumination).....	4
1.2.3 Συσσωμάτωση τεχνητών πηγών φωτισμού (Light Clutter).....	4
1.2.4 Θάμβωση (Glare).....	4
1.2.5 Τεχνητός φωτεινός ουράνιος θόλος (Artificial Sky Glow)	6
1.3 Αίτια της φωτορύπανσης.....	10
1.3.1 Φυσικές πηγές φωτός	10
1.3.2 Τεχνητές πηγές φωτός.....	12
1.4 Επιπτώσεις της φωτορύπανσης.....	14
1.4.1 Νυχτερινές δραστηριότητες	15
1.4.1.1 Παρεμπόδιση της θέασης του νυχτερινού ουρανού	15
1.4.1.2 Ατυχήματα.....	17
1.4.2 Ανθρώπινη υγεία και βιοτικό επίπεδο	18
1.4.3 Φυσικό περιβάλλον	20
1.4.4 Οικονομία και Κοινωνία	22
1.4.4.1 Οικονομικές – Ενεργειακές απώλειες.....	22
1.4.4.2 Τεχνητός φωτισμός και εγκληματικότητα	23
1.5 Εργαλεία αντιμετώπισης της φωτορύπανσης	24
1.5.1 Προτεινόμενα μέτρα.....	25
1.5.1.2 Έλεγχος τεχνητού φωτισμού	25
1.5.1.3 Νομοθετικές διατάξεις.....	26
1.5.1.4 Περιβαλλοντικές ζώνες φωτισμού	27
1.5.2 Χαρτογράφηση και μοντελοποίηση της φωτορύπανσης.....	28
ΔΟΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΝΥΧΤΕΡΙΝΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ	29

1.6 Εισαγωγή.....	29
1.6.1 Δορυφορικά συστήματα καταγραφής του νυχτερινού φωτισμού.....	29
1.6.1.1 Δορυφορικό πρόγραμμα DMSP	29
1.6.1.1.1 Γενικά.....	29
1.6.1.1.2 Όργανα καταγραφής.....	32
1.6.1.1.3 Δεδομένα DMSP	35
1.6.1.1.4 Εφαρμογές δεδομένων DMSP – OLS	37
1.6.1.1.5 Δυνατότητες και περιορισμοί των δεδομένων	38
1.6.1.2 Δορυφορικό πρόγραμμα Suomi - NPP	41
1.6.1.2.1 Γενικά.....	41
1.6.1.2.2 Όργανα καταγραφής.....	42
1.6.1.2.3 Συγκριτική αξιολόγηση DMSP-OLS & VIIRS-DNB.....	45
1.6.2 Εναλλακτικά μέσα απόκτησης δεδομένων νυχτερινού φωτισμού	47
1.6.2.1 Διεθνής διαστημικός σταθμός.....	48
1.6.2.2 Εναέρια συστήματα τηλεπισκόπησης	50
1.6.2.3 Μελλοντικά συστήματα.....	51
1.7 Βιβλιογραφική ανασκόπηση συναφών μελετών.....	53
1.7.1 Χαρτογράφηση και μοντελοποίηση της φωτορύπανσης.....	53
Αξιοποίηση ΣΓΠ στη μοντελοποίηση της φωτορύπανσης.....	55
1.7.2 Συσχέτιση των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού με στατιστικά δεδομένα	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Υλικά και μέθοδοι	57
2.1.1 Χωρικά δεδομένα.....	57
2.1.2 Κοινωνικό-οικονομικά δεδομένα.....	59
2.2 Ψηφιακή επεξεργασία & ανάλυση δορυφορικών εικόνων.....	62
2.2.1 Προεπεξεργασία δορυφορικών δεδομένων νυχτερινού φωτισμού	62
2.2.1.1 Αποκοπή & γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων.....	62
2.2.1.2 Σχετική ραδιομετρική βαθμονόμηση των δορυφορικών δεδομένων	63
2.2.1.2.1 Αξιολόγηση της μεθόδου βαθμονόμησης.....	71
2.2.2 Βελτιώσεις και μετασχηματισμοί των εικόνων	74
2.2.2.1 Τμηματοποίηση δορυφορικών εικόνων	74

2.2.2.1.1 Κατωφλίωση με προσέγγιση του ιστογράμματος των εικόνων.....	75
2.2.2.1.2 Κατωφλίωση με τη μέθοδο του Otsu.....	76
2.2.2.2 Σχετική γεωμετρική εγγραφή επιλεγμένων εικόνων.....	79
2.2.2.3 Ενίσχυση της αντίθεσης των δορυφορικών εικόνων	80
2.3 Ανάλυση & Αποτελέσματα.....	82
2.3.1 Διαχρονική ανάλυση των μεταβολών στα χωρικά πρότυπα των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού	82
2.3.2 Συσχέτιση των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού με κοινωνικό-οικονομικές μεταβλητές.....	96
2.3.3 Μοντελοποίηση και χαρτογράφηση του φαινομένου της φωτορύπανσης	100
2.3.3.1 Άμεση φωτορύπανση.....	100
2.3.3.1 Έμμεση φωτορύπανση.....	106
2.3.3.1.1 Λήψη μετρήσεων των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού	106
3. Συζήτηση - Συμπεράσματα.....	111

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Διάχυτο φως και πρόκληση φωτιστικής καταπάτησης απο λανθασμένου σχεδιασμού φωτιστικά σώματα στην περιοχή του Υμηττού, Αθήνα.	3
Εικόνα 2. Το φαινόμενο της τεχνητής ουράνιας λάμψης πάνω απο το Λεκανοπέδιο Αθηνών.....	7
Εικόνα 3. Χαρακτηριστικής μορφής φωτεινός ουράνιος θόλος πάνω απο μια πόλη στην Arizona, ΗΠΑ	9
Εικόνα 4. Οριακό μέγεθος ουράνιων αντικειμένων σε συνάρτηση με τα επίπεδα φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού σε επιλεγμένα παρατηρητήρια	16
Εικόνα 5. Τεχνητή φωτεινότητα του νυχτερινού ουρανού, στο ζενίθ, στο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας, στην Ευρώπη το 1996-1997	17
Εικόνα 6. Εκτόξευση του πρώτου δορυφόρου DMSP το 1962.....	30
Εικόνα 7. Ο δορυφόρος DMSP της σειράς Block 5D	31
Εικόνα 8. Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στην ευρύτερη περιοχή μελέτης το έτος 2009.	33
Εικόνα 9. Δορυφορική εικόνα του DMSP-OLS των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού στην ευρύτερη περιοχή του Los Angeles, California, 2003	39
Εικόνα 10. Ο δορυφόρος Suomi NPP	41

Εικόνα 11. Οι αισθητήρες του δορυφόρου Suomi-NPP	42
Εικόνα 12. Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στην Ευρώπη. Είναι εμφανής η χωρική συγκέντρωση έντονων πηγών τεχνητού φωτισμού από τα πολυπληθή αστικά κέντρα στη Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη	43
Εικόνα 13. Άποψη του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού.....	48
Εικόνα 14. Η ευρύτερη περιοχή του Λεκανοπεδίου Αττικής όπως λήφθηκε από τον ISS στις 22/02/2011.....	49

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Αναπαράσταση της σκέδασης φωτός Mie και Rayleigh απο σωματίδια της ατμόσφαιρας	8
Σχήμα 1.1. Χρήσιμος και παρασιτικός φωτισμός απο ένα τυπικό φωτιστικό σώμα.....	10
Σχήμα 1.2. Καμπύλες της ανθρώπινης φωτοπικής και κίρκαδικής ευαισθησίας στο μπλε φως απο λαμπτήρες τύπου LED	20
Σχήμα 1.3. Αστερισμός των δορυφόρων DMSP	30
Σχήμα 1.4. Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στην ευρύτερη περιοχή του Δελχί, Ινδία...46	
Σχήμα 1.5 Αεροφωτογραφία νυχτερινής λήψης της πόλης του Las Vegas, Nevada κατά τη διάρκεια όπως αποκτήθηκε από το αεροσκάφος ER-2 της NASA στις 27/09/200450	
Σχήμα 2.1 Χρονοσειρά ετήσιων δορυφορικών εικόνων της περιόδου 1992 - 2013.....	58
Σχήμα 2.2 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της ευρύτερης περιοχής μελέτης.....	58
Σχήμα 2.3 Ποσοστιαία μεταβολή μόνιμου πληθυσμού σε επίπεδο νομών, 1991 - 201160	
Σχήμα 2.4 Ποσοστιαία μεταβολή συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε χιλιάδες kWh, σε επίπεδο νομών, 1993 - 2012	60
Σχήμα 2.5 Ποσοστιαία μεταβολή του ΑΕΠ (mm €) σε επίπεδο νομών, 1995 - 2012	61
Σχήμα 2.6 Σύνθετη ψευδέχρωμη εικόνα των δεδομένων νυχτερινού φωτισμού σε συνδυασμό RGB.....	65
Σχήμα 2.7 Συντελεστής προσδιορισμού των δύο μοντέλων παλινδρόμησης	66
Σχήμα 2.8 Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στον Ελλαδικό χώρο το έτος 2009.	68
Σχήμα 2.9 Εξισώσεις παλινδρόμησης για την σχετική ραδιομετρική βαθμονόμηση της χρονοσειράς δορυφορικών εικόνων DMSP Stable Lights.....	69
Σχήμα 2.10 Αθροιστικές και μέσες τιμές φωτεινότητας (SOL) στο σύνολο του Ελλαδικού χώρου της χρονοσειράς των πρωτογενών δορυφορικών δεδομένων DMSP - OLS Stable lights.....	72

Σχήμα 2.11 Αθροιστικές και μέσες τιμές φωτεινότητας (SOL) στο σύνολο του Ελλαδικού χώρου της χρονοσειράς των βαθμονομημένων δορυφορικών δεδομένων DMSP - OLS Stable lights.....	73
Σχήμα 2.12 Συχνότητα τιμών της δορυφορικής εικόνας DMSP – OLS F18 του έτους 2012	76
Σχήμα 2.13 Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στον Ελλαδικό χώρο το έτος 2009	78
Σχήμα 2.14 Ροή διαδικασιών της προτεινόμενης μεθοδολογίας.....	81
Σχήμα 2.15 Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στην ευρύτερη περιοχή μελέτης όπως αποτυπώνονται στις τελικές τμηματοποιημένες δορυφορικές εικόνες DMSP – OLS	87
Σχήμα 2.16 Ετήσιες μεταβολές των ΝΕΦ στον Ελλαδικό χώρο για την χρονοσειρά δορυφορικών δεδομένων DMSP – OLS Stable lights 1992 - 2013	91
Σχήμα 2.17 Μεταβολές στα πρότυπα των ΝΕΦ στον Ελλαδικό την περίοδο 1992 – 2013.	92
Σχήμα 2.18 Ποσοστιαία μεταβολή των αλλαγών στη χωρική έκταση των πρότυπων των ΝΕΦ σε επίπεδο νομών κατά την χρονική περίοδο 1992 - 2013.....	94
Σχήμα 2.19 Ποσοστιαία μεταβολή των αλλαγών των αθροιστικών τιμών SOL σε επίπεδο νομών κατά την χρονική περίοδο 1992 - 2013	94
Σχήμα 2.20. Διάγραμμα σκεδασμού των τιμών του R^2 μεταξύ των αθροιστικών τιμών SOL – GDP και SOL - Pop.....	97
Σχήμα 2.21 Άμεση φωτορύπανση στον Ελλαδικό χώρο κατά το έτος 1992	101
Σχήμα 2.22 Άμεση φωτορύπανση στον ευρύτερο χώρο του νομού Αττικής κατά το έτος 1992	102
Σχήμα 2.23. Άμεση φωτορύπανση στον ευρύτερο χώρο του νομού Θεσσαλονίκης κατά το έτος 1992.	102
Σχήμα 2.24. Άμεση φωτορύπανση στον Ελλαδικό χώρο κατά το έτος 2013	103
Σχήμα 2.25 Άμεση φωτορύπανση στον ευρύτερο χώρο του νομού Αττικής κατά το έτος 2013.	104
Σχήμα 2.26 Άμεση φωτορύπανση στον ευρύτερο χώρο του νομού Θεσσαλονίκης κατά το έτος 2013	104
Σχήμα 2.27 Γωνίες αζιμούθιου για τη λήψη μετρήσεων των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού.....	108
Σχήμα 2.28 Μετρήσεις νυχτερινού φωτισμού στο Λεκανοπέδιο Αθηνών όπως λήφθηκαν από το λόφο Κουφού, Πεντέλη Αττικής.	108
Σχήμα 2.29. Σχηματική απεικόνιση του τεχνητού φωτεινού ουράνιου θόλου στο Λεκανοπέδιο Αθηνών.....	109

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο *Εφαρμογές ΣΓΠΠ στην ανάλυση φωτορύπανσης* σηματοδοτεί το τέλος των τετραετών σπουδών μου στο τμήμα Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου. Στη μελέτη αυτή γίνεται αντικείμενο αναφοράς ένα σύγχρονο παγκόσμιο περιβαλλοντικό και κοινωνικό-οικονομικό πρόβλημα, το φαινόμενο της φωτορύπανσης, και αναπτύσσεται συγκεκριμένη μεθοδολογία για την μελέτη και ανάλυση μέσα στα πλαίσια ενός ολοκληρωμένου Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών.

Αυτό, το εν τέλει άκρως ενδιαφέρον θέμα, μου ανατέθηκε από τον Αναπληρωτή Καθηγητή στο τμήμα Γεωγραφίας του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου, Χρίστο Χαλκιά, του οποίου η καθοδήγηση και οι συμβουλές, αλλά και οι γνώσεις που μου προσέφερε τα τελευταία δύο χρόνια ήταν καθοριστικές για την διεκπεραίωση της εργασίας.

Ευχαριστίες επίσης οφείλω και στον επιβλέπων της πρακτικής μου άσκησης, κύριο ερευνητή στο Ι.Ε.Π.Β.Α (Ινστιτούτο Ερευνών & Βιώσιμης Ανάπτυξης), του Ε.Α.Α (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών), Βασίλειο Ψυλόγλου, για τον προγραμματισμό και την οργάνωση του πειράματος για την λήψη μετρήσεων των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού αλλά και την γενικότερη καθοδηγητική του στάση στα πλαίσια της συνεργασίας μας.

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες μια νέα μορφή περιβαλλοντικής ρύπανσης έχει προκαλέσει το έντονο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Η μορφή αυτή ρύπανσης οφείλεται στην υπέρμετρη χρήση των ανθρωπογενών τεχνητών πηγών φωτισμού, μεταβάλλοντας τα φυσιολογικά επίπεδα φωτεινότητας του νυχτερινού περιβάλλοντος. Το φαινόμενο αυτό, η φωτορύπανση, λαμβάνει προβληματικές και ανησυχητικές διαστάσεις κυρίως σε περιοχές έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως είναι μεγάλα αστικά κέντρα και βιομηχανικές περιοχές, ωστόσο, ακόμα και περιφερειακές αγροτικές περιοχές δέχονται τις επιπτώσεις του φαινομένου αυτού. Επιφέρει ένα μεγάλο αριθμό άμεσων και έμμεσων επιπτώσεων όχι μόνο στο τοπικό αστικό-περιαστικό περιβάλλον στο οποίο εκδηλώνεται, αλλά και σε ολόκληρο το φυσικό περιβάλλον. Μεταξύ άλλων συμβάλλει στην παρεμβολή των νυχτερινών δραστηριοτήτων, όπως είναι η αστροπαρατήρηση, στην υπομόνευση του βιοτικού επιπέδου των ανθρώπων αλλά και των ζωικών και φυτικών οργανισμών.

Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη και ανάλυση του φαινομένου της φωτορύπανσης στο σύνολο του Ελλαδικού χώρου κατά το χρονικό διάστημα 1992 – 2013. Οι επιμέρους στόχοι που τέθηκαν αφορούν τη διαχρονική ανίχνευση των μεταβολών που σημειώνονται στα χωροχρονικά πρότυπα των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού (ΝΕΦ), την ποσοτικοποίηση αυτών καθώς και την προσπάθεια κατανόησης των αιτιογενών παραγόντων που οδήγησαν στις μεταβολές αυτές, και τέλος την μοντελοποίηση και χαρτογράφηση δύο κύριων εκφάνσεων της φωτορύπανσης, την άμεση και έμμεση φωτορύπανση.

Για τις ανάγκες της εργασίας αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο ΣΓΠ στο οποίο δημιουργήθηκε μια ειδικά σχεδιασμένη γεωγραφική βάση δεδομένων στην οποία οργανώθηκαν τα δεδομένα. Τον κύριο πυρήνα της γεωβάσης αποτελούν τα δορυφορικά δεδομένα νυχτερινού φωτισμού των δορυφόρων DMSP – OLS, καθώς και το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής μελέτης. Αξιοποιώντας κατάλληλα εργαλεία που προσφέρει τόσο η τεχνολογία των ΣΓΠ όσο και της τηλεπισκόπησης κατέστη εφικτή η διεκπεραίωση των στόχων.

Από την ανάλυση των διαχρονικών μεταβολών στα χωρικά πρότυπα των ΝΕΦ της χρονοσειράς δεδομένων βρέθηκε ότι κατά τα τελευταία 22 χρόνια αφενός σημειώθηκε μια σημαντική αύξηση στις τεχνητές πηγές φωτισμού, αφετέρου υπάρχουν ενδείξεις

πτωτικής τάσης εντός των κύριων αστικών κέντρων όπως το πολεοδομικό συγκρότημα Αθηνών, γεγονός το οποίο συνδέεται τόσο με τον περιορισμό χρήσης του δημόσιου και δημοτικού ηλεκτροφωτισμού εξαιτίας της βαρύνουσας οικονομικής κατάστασης των τελευταίων ετών αλλά και με την εφαρμογή δράσεων και συστημάτων διαχείρισης της ενέργειας. Οι νομοί οι οποίοι σημείωσαν ραγδαίες αυξητικές τάσεις στην χωρική έκταση των προτύπων φωτισμού αποτελούν ο νομός Αττικής με 35.24%, ο νομός Ζακύνθου με 28.29%, οι νομοί Θεσσαλονίκης, Πιερίας, Καβάλας και Ημαθίας με 21.4%, 21.04%, 19.69% και 19.15% αντίστοιχα.

Από την ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ των δεδομένων των ΝΕΦ και τριών επιλεγμένων μεταβλητών που αφορούν τον μόνιμο πληθυσμό, το ΑΕΠ, και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, βρέθηκε μια ικανοποιητική γραμμική συσχέτιση. Η ανάλυση έδειξε ότι στην πλειονότητα των νομών τόσο η πληθυσμιακή αύξηση όσο και η οικονομική δραστηριότητα διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο την εξέλιξη των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού.

Τέλος η μοντελοποίηση και η χαρτογράφηση του φαινομένου της φωτορύπανσης ανέδειξε τις σημαντικές διαστάσεις που λαμβάνει το φαινόμενο αυτό ακόμα και εκατοντάδες χιλιόμετρα από τα αστικά κέντρα. Οι νομοί της περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, καθώς και ο νομός Αττικής έχουν «εγκλωβιστεί» σε ένα τεράστιο φωτεινό πέπλο επηρεάζοντας άμεσα τόσο τις νυχτερινές δραστηριότητες, αλλά και το βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων αλλά και όλων των ζωικών και φυτικών οργανισμών. Στο νομό Αττικής, υπολογίστηκε ότι σε απόσταση 13.70 km από το κέντρο της πόλης η φωτεινότητα του νυχτερινού υποβάθρου είναι έως και 5858% υψηλότερη από την φυσική φωτεινότητα ενώ η ζώνη επιρροής του οχληρού φωτός προσεγγίζει τα 422km.

Abstract

Over the last decades a novel kind of environmental pollution, has attracted the interest of the scientific community. This form of pollution, called light pollution, is defined as the alteration of natural quantity of light in the night environment due to excessive introduction of manmade light. In the last few years it has been recognized as a serious pollution problem with negative consequences on environment and human health.

The main objective of this study is to model the light pollution spatial patterns and monitor changes in trends of spatial distribution during the time period 1992 – 2013 in Greece, using a series of nighttime light satellite images from the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) operational linescan system (OLS). Based on the Intercalibration of the nighttime light images of the study area obtained a series of change maps. The result shows a widespread increase of light pollution mainly in province of Attica, Zante, Pieria and Kavala while decrease patterns observed within major urban centers. These decrease patterns may be attributable to economic decline as well as many municipalities began switching off public lighting for financial reasons and energy efficiency.

From the regression analysis between sum of light and three main variables concerning, population, GDP, and energy consumption, it was found that both GDP and population growth showed a strong linear relationship. Finally, light pollution viewshed maps showed a general increment trend mainly in region of Central Macedonia and province of Attica. From the interpretation of night light measurements it was found that the artificial night sky luminance above Athens metropolitan area is up to 5858% higher than the natural sky luminance.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΦΩΤΟΡΥΠΑΝΣΗΣ

1.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες η υπέρμετρη χρήση του τεχνητού φωτισμού από τον άνθρωπο έχει οδηγήσει σε μια δραματική αύξηση της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού στο σύνολο σχεδόν των χωρών ολόκληρου του πλανήτη. Αυτή η μεταβολή των φυσικών επιπέδων του νυχτερινού φωτισμού παρατηρήθηκε περί τα μέσα της δεκαετίας του 1970 από τους αστρονόμους οι οποίοι ξαφνικά άρχισαν να αντιμετωπίζουν προβλήματα στην παρατήρηση των ουράνιων σωμάτων εξαιτίας της αυξημένης φωτεινότητας του έναστρου ουρανού. Το ζήτημα αυτό ήταν η αφορμή για τη συστηματική παρακολούθηση του, αρχικά από τους αστρονόμους και μετέπειτα και από άλλους μελετητές, το οποίο οδήγησε στην δημιουργία ενός νέου όρου, της φωτορύπανσης.

Η φωτορύπανση είναι ένας ευρύς όρος ο οποίος αναφέρεται στην μεταβολή των φυσικών επιπέδων φωτισμού του εξωτερικού περιβάλλοντος εξαιτίας της υπερβολικής και ακατάλληλης χρήσης τεχνητών πηγών φωτισμού που προέρχονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Cinzano et al., 2000). Πρόκειται δηλαδή για οχληρό, παρασιτικό, ανεπιθύμητο φως, το οποίο εξαιτίας της ποσότητας, της κατεύθυνσης ή του φασματικού του περιεχομένου σε ένα δεδομένο περιβάλλον, γίνεται αιτία για πρόκληση ενόχλησης ή μείωσης της ικανότητας διάκρισης βασικών λεπτομερειών (Διεθνής Επιτροπή Φωτισμού, CIE). Αποτελεί ένα παγκόσμιο φαινόμενο και αποκτά προβληματικές και ανησυχητικές διαστάσεις κυρίως πάνω από περιοχές έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως είναι μεγάλα αστικά κέντρα και βιομηχανικές περιοχές της Ευρώπης, της Βόρειας Αμερικής και της Ιαπωνίας, ωστόσο, ακόμα και αγροτικές περιοχές δέχονται τις επιπτώσεις από το φαινόμενο αυτό.

Η αύξηση της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού αποτελεί μια από τις πιο αξιοσημείωτες εκφάνσεις του πολυδιάστατου φαινομένου της φωτορύπανσης και σήμερα έχει αναγνωριστεί ως ένας σύγχρονος, ταχεία αυξανόμενος παράγοντας αλλοίωσης του φυσικού περιβάλλοντος που δεν απειλεί μόνο τις αστρονομικές

παρατηρήσεις αλλά και την ίδια την αντίληψη του ανθρώπου για το σύμπαν (Cinzano, Falchi & Elvidge, 2001). Γενικά, το μέγεθος της φωτορύπανσης σε μια συγκεκριμένη περιοχή εξαρτάται κυρίως από τις εκπομπές του τεχνητού φωτός στο νυχτερινό περιβάλλον και την μετέπειτα σκέδαση και ανάκλαση των φωτονίων από τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας.

Στην βιβλιογραφία, ο όρος της φωτορύπανσης συναντάται με δύο κύριες μορφές. Την Αστρονομική φωτορύπανση (Astronomical Light Pollution ή Photopollution) η οποία χρησιμοποιείται από τους αστρονόμους για να περιγράψουν τις αρνητικές επιπτώσεις στην παρατήρηση ουράνιων αντικειμένων, και την Οικολογική φωτορύπανση (Ecological Light Pollution) η οποία χρησιμοποιείται από επιστήμονες του φυσικού περιβάλλοντος και βιοοικολογίας για να περιγράψουν τις επιπτώσεις της φωτορύπανσης στα φυσικά οικοσυστήματα, και στο φυσικό περιβάλλον γενικότερα. Ωστόσο επειδή αυτοί οι δύο όροι επικεντρώνονται αποκλειστικά μόνο σε μια διάσταση του φαινομένου της φωτορύπανσης, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο γενικός όρος «φωτορύπανση» ο οποίος εμπεριέχει όλες τις πτυχές που υπεισέρχονται σε αυτήν την έννοια και εξετάζεται ως ολότητα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η διαχρονική μελέτη του φαινομένου της φωτορύπανσης στον Ελλαδικό χώρο κατά την χρονική περίοδο 1992 – 2013. Συγκεκριμένα εξετάζονται οι διαχρονικές μεταβολές που σημειώθηκαν στα χωρικά πρότυπα των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού (ΝΕΦ) καθώς και η ποσοτικοποίηση των μεταβολών αυτών. Έπειτα πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης για την διερεύνηση της συσχέτισης των ΝΕΦ με επιλεγμένες μεταβλητές, και τέλος εφαρμόζεται μεθοδολογία για της μοντελοποίηση και χαρτογράφηση των δύο κύριων παραμέτρων του φαινομένου της φωτορύπανσης.

Στις επόμενες ενότητες γίνεται προσπάθεια για την καταγραφή και ανάλυση της πολυδιάστατης φύσης του φαινομένου της φωτορύπανσης, αποσυνθέτοντας τα κύρια κομμάτια που την απαρτίζουν.

1.2 Μορφές φωτορύπανσης

Η ανάπτυξη της ηλεκτρικής τεχνολογίας έχει συμβάλει στην εισαγωγή τεράστιων ποσοτήτων τεχνητού φωτισμού στο περιβάλλον, με μεγάλο μέρος αυτού να μην εξυπηρετεί κανένα σκοπό, με αποτέλεσμα να εκπέμπεται στο περιβάλλον ως διάχυτο φως (spill light) επιφέροντας σημαντικές επιπτώσεις οι οποίες αναλύονται σε επόμενη

ενότητα. Η φωτορύπανση, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη αυτού του παρασιτικού εξωτερικού φωτισμού μπορεί να γίνει αντιληπτή με πέντε διαφορετικούς τρόπους:

1.2.1 Φωτιστική καταπάτηση (Light Trespass – Intrusive light)

Υφίσταται στις περιπτώσεις όπου το φως απο εξωτερικές εγκαταστάσεις φωτισμού (π.χ. φωτιστικά σώματα δημοτικού φωτισμού) εισβάλλει ως διάχυτο φως σε ανεπιθύμητες περιοχές για τις οποίες δεν προορίζεται, προκαλώντας ενόχληση, δυσφορία, διάσπαση της προσοχής ή μείωση της ορατότητας συμβάλλοντας έτσι στη υπομόνευση της ποιότητας ζωής των επηρεαζόμενων ατόμων. Είναι ένα ιδιαίτερα συχνό φαινόμενο στις σύγχρονες μεγαλουπόλεις, κυρίως σε περιοχές που γειτνιάζουν με οχληρές ζώνες όπως εμπορικά κέντρα, περιοχές αναψυχής και βιομηχανικές ζώνες, ωστόσο πολλές φορές οφείλεται στην εγκατάσταση λανθασμένου φωτισμού απο τους ίδιους του ιδιοκτήτες. Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που το φαινόμενο αυτό έχει γίνει αντικείμενων καταγγελιών μεταξύ πολιτών γεγονός που υποδηλώνει στην σοβαρή έλλειψη αντιμετώπισης του φαινομένου σχεδόν στο σύνολο των αρμόδιων διοικητικών αρχών παγκοσμίως.



Εικόνα 1. Διάχυτο φως και πρόκληση φωτιστικής καταπάτησης απο λανθασμένου σχεδιασμού φωτιστικά σώματα στην περιοχή του Υμηττού, Αθήνα.

1.2.2 Υπερφωτισμός (Over-Illumination)

Είναι η υπερβολική χρήση φωτός που δίνει μεγαλύτερη λαμπρότητα από την γενικά αποδεκτή και απο ότι απαιτείται για μια συγκεκριμένη δραστηριότητα. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο αυτό είναι κυρίως η έλλειψη συστημάτων ελέγχου φωτισμού ώστε να αποτρέπεται η σπατάλη φωτός και ενέργειας τις ώρες που δεν απαιτείται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση φωτισμού σε εμπορικές και βιομηχανικές επιχειρήσεις κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών χωρίς να υφίσταται κάποια δραστηριότητα.

1.2.3 Συσσωμάτωση τεχνητών πηγών φωτισμού (Light Clutter)

Είναι η εκτεταμένη ομαδοποίηση φωτιστικών πηγών. Είναι ιδιαίτερα συχνό φαινόμενο στο οδικό δίκτυο όπου συστάδες φωτιστικών σωμάτων κακού σχεδιασμού ή έντονα φωτιζόμενων διαφημιστικών πινακίδων εκπέμπουν φως με αποτέλεσμα τη σύγχυση της οπτικής αντίληψης και απομάκρυνσης της προσοχής του παρατηρητή από τυχόν εμπόδια και ενδεχομένως την πρόκληση ατυχημάτων.

1.2.4 Θάμβωση (Glare)

Η θάμβωση, όπως υποδηλώνει και το όνομά της, συνδέεται με φαινόμενα παρεμπόδισης ή πλήρους εξάλειψης της ικανότητας στην οπτική αντίληψη των αντικειμένων. Πρόκειται για έντονο και εκτυφλωτικό φως το οποίο διαχέεται εντός του ανθρώπινου οφθαλμού προκαλώντας το φαινόμενο της διάχυτης λαμπρότητας (Veiling luminance, L_u). Η διάχυτη λαμπρότητα είναι η αίσθηση που δημιουργείται από την έντονη φωτεινότητα μέσα στο οπτικό πεδίου του παρατηρητή που είναι αρκετά μεγαλύτερη από την φωτεινότητα στην οποία οι οφθαλμοί είναι προσαρμοσμένοι και προκαλεί ενόχληση, δυσφορία ή απώλεια στην οπτική απόδοση και ικανότητα.

Η ένταση του φαινομένου της θάμβωσης εξαρτάται από παράγοντες όπως το μέγεθος, η θέση, η φωτεινότητα της πηγής και του επιπέδου φωτεινότητας στην οποία είναι προσαρμοσμένοι οι οφθαλμοί. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αντίθεση

μεταξύ σκοτεινών και φωτεινών περιοχών τόσο μεγαλύτερη είναι η θάμβωση καθώς ο ανθρώπινος οφθαλμός αδυνατεί να προσαρμοστεί σε αυτήν την ακαριαία μεταβολή των συνθηκών φωτεινότητας. Η θάμβωση μπορεί να διακριθεί σε άμεση, στην οποία το έντονο φως από την πηγή εκπέμπεται απευθείας εντός του οπτικού πεδίου του παρατηρητή, και στην έμμεση στην οποία το φως ανακλάται ύστερα από την πρόσπτωση του σε κάποια επιφάνεια.

Σύμφωνα με την IES (Illuminating Engineering Society of North America) η θάμβωση μπορεί να διακριθεί σε τρεις κύριες κατηγορίες:

❖ **Απόλυτη – εκτυφλωτική θάμβωση (Dazzle, Blinding glare)**

Οφείλεται στην ύπαρξη υπερβολικά μεγάλης λαμπρότητας (brightness) του φωτός με τιμές μεγαλύτερες από 10.000 cd/m^2 μέσα στο πεδίο οράσεως ενός παρατηρητή. Για ένα αξιόλογο χρονικό διάστημα μετά το ερέθισμα, κανένα αντικείμενο δεν μπορεί να διακριθεί ή να γίνει εύκολα αντιληπτό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η απευθείας παρατήρηση του ήλιου με γυμνό μάτι το οποίο έχει ως επακόλουθο την μείωση της οπτικής ικανότητας και την προσωρινή τύφλωση.

❖ **Ψυχολογική θάμβωση – Θάμβωση δυσφορίας (Psychological – Discomfort glare)**

Αυτή η μορφή θάμβωσης προκαλείται από πηγές φωτισμού που να μεν είναι πάνω από τα όρια ανοχής του ανθρώπινου οφθαλμού, προκαλώντας διαταραχές και δυσφορία στον αποδέκτη χωρίς ωστόσο να προκαλείται μείωση της οπτικής ικανότητας και απόδοσης. Είναι συχνό φαινόμενο κατά την οδήγηση τις νυχτερινές ώρες όπου ο υψηλός έντασης φωτισμός και η άνιση κατανομή των πηγών φωτός στο οδικό δίκτυο συμβάλλουν στη μακροπρόθεσμη κόπωση και τελικά στη μείωση της οδηγικής απόδοσης και της ασφάλειας (Bullough et al., 2003)

❖ **Φυσιολογική θάμβωση – Θάμβωση ανικανότητας (Physiological glare – Disability glare)**

Όπως υποδηλώνει και ο όρος, οι επιδράσεις αυτού του είδους θάμβωσης σχετίζονται με αντιδράσεις φυσιολογικού χαρακτήρα. Ο μηχανισμός δημιουργίας της είναι παρόμοιος με αυτόν στην περίπτωση της απόλυτης

θάμβωσης, και περιλαμβάνει την σκέδαση του εκπεμπόμενου φωτός εντός του ανθρώπινου οφθαλμού δημιουργώντας ένα ομοιόμορφο φωτεινό πέπλο (light veil) σε όλη την έκταση του οπτικού πεδίου μειώνοντας την αντίθεση της εικόνας στον αμφιβληστροειδή χιτώνα και τελικώς την μείωση της οπτικής αντίληψης. Η φυσιολογική θάμβωση απαντάται συχνά κυρίως σε οδικό δίκτυο χαμηλής ποιότητας φωτισμού όπου το φως διαχέεται άνομα και αποτελεί συχνή αιτία πρόκλησης ατυχημάτων κατά την διάρκεια οδήγησης τις νυχτερινές ώρες. Επιπλέον εκτός των φωτιστικών σωμάτων κατά μήκος ενός δικτύου, άλλος παράγοντας εμφάνισης του φαινομένου είναι η ακατάλληλη χρήση των φώτων απο διερχόμενα αυτοκίνητα.

Τόσο η Ψυχολογική όσο και η Φυσιολογική θάμβωση σχετίζονται με την παραγόμενη φωτεινή ροή, το μέγεθος της πηγής, τη μετατόπιση της γωνίας της πηγής απο την κατεύθυνση παρατήρησης, τα επίπεδα φωτεινότητας στα οποία είναι προσαρμοσμένο το μάτι, τον χρόνο έκθεσης, την κίνηση, την ηλικία του παρατηρητή καθώς και τη φυσική κατάσταση του ανθρώπινου οφθαλμού. Τα ηλικιωμένα άτομα προσβάλλονται σε μεγαλύτερο βαθμό απο το φαινόμενο της θάμβωσης καθώς το σύστημα οράσεως τους είναι αποδυναμωμένο και προσαρμόζεται δύσκολα σε δραματικές αλλαγές της φωτεινότητας σε ένα δεδομένο περιβάλλον.

1.2.5 Τεχνητός φωτεινός ουράνιος θόλος (Artificial Sky Glow)

Η τεχνητή ουράνια λάμψη είναι ίσως η πιο άμεσα συνυφασμένη (και πιο εμφανής) έννοια με το φαινόμενο της φωτορύπανσης. Έγινε γνωστή και μελετήθηκε αρχικά από τους αστρονόμους καθώς αποτελεί τον βασικό ανασταλτικό παράγοντα παρατήρησης βασικών αντικειμένων στον νυχτερινό έναστρο ουρανό, όπως είναι τα ουράνια σώματα.

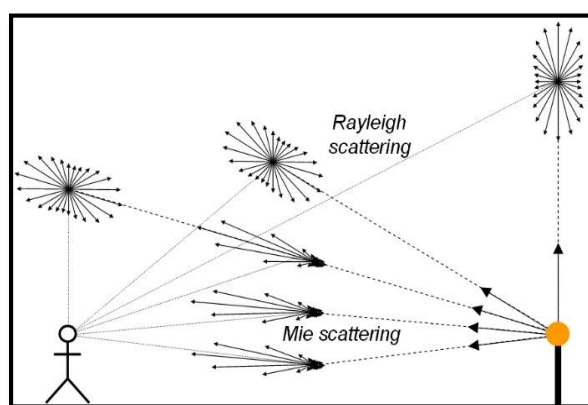


Εικόνα 2. Το φαινόμενο της τεχνητής ουράνιας λάμψης πάνω απο το Λεκανοπέδιο Αττικής.

Ο μηχανισμός δημιουργίας της ουράνιας λάμψης βασίζεται στις βασικές ιδιότητες του φωτός όπως είναι η ανάκλαση και η σκέδαση. Το φως που εκπέμπεται απευθείας προς τα πάνω απο τα επίγεια φωτιστικά σώματα (χαμηλής ποιότητας και έλλειψης απαραίτητων προστατευτικών καλυμμάτων) καθώς και αυτό που ανακλάται απο φυσικά και τεχνητά στοιχεία της επιφάνειας της γης (δρόμοι, γρασίδι, κτίρια κ.α.) κατά τη διάδοσή του υφίσταται σε φαινόμενα ανάκλασης και σκέδασης απο τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα μέρος αυτού να επιστρέφει πίσω στην επιφάνεια της γης αυξάνοντας την φωτεινότητα του νυχτερινού ουρανού. Στην πραγματικότητα η εκπομπή φωτός υπό ρηχή γωνία άνωθεν του οριζόντιο επιπέδου απο ένα φωτιστικό θα συναντήσει περισσότερα σκεδάζοντα σωματίδια συμβάλλοντας σε μεγαλύτερο βαθμό στην ουράνια λάμψη (Cinzano, 2003, Cinzano και Diaz Castro, 2000). Πληροφοριακά αναφέρεται ότι τα φαινόμενα της σκεδασιμότητας του φωτός στην ατμόσφαιρα εξαρτώνται απο το μήκος κύματος (λ). Όταν το μήκος κύματος του φωτός είναι μεγαλύτερο απο τα σκεδάζοντα σωματίδια όπως είναι μόρια της ατμόσφαιρας (N_2 , O_2 , H_2O) τότε εμφανίζεται το φαινόμενο σκέδασης Rayleigh στο

οποίο οφείλεται η ύπαρξη του μπλε χρώματος του ουρανού κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα σε περιπτώσεις που τα σκεδάζοντα σωματίδια έχουν διάμετρο συγκρίσιμη με το μήκος κύματος του φωτός τότε εμφανίζεται το φαινόμενο σκέδασης Mie. Τέτοια σωματίδια μπορεί να είναι φυσικής προέλευσης (σύννεφα, ομίχλη) είτε να προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες (ρύποι όπως η αιθάλη από βιομηχανικές εγκαταστάσεις). Έχει αποδειχθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του φαινομένου της ουράνιας λάμψης κυρίως σε περιοχές κοντά στην πηγή (Kyba et al., 2011, Crawford, 2000). Υπάρχει δηλαδή μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ του φαινομένου της φωτορύπανσης και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Kosai & Isobe, 1991, Garstang 1991).

Η ουράνια λάμψη εντοπίζεται κυρίως στο ουράνιο θόλο μεγάλων πολυπληθών μητροπόλεων όπου δεκάδες πηγές τεχνητού φωτισμού διαχέουν το φως στην ατμόσφαιρα χωρίς ωστόσο να αποτελεί ένα τοπικό φαινόμενο καθώς μπορεί να γίνει αντιληπτό ακόμα και από επαρχιακές περιοχές εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά. Σε περιφέρειες ή χώρες με



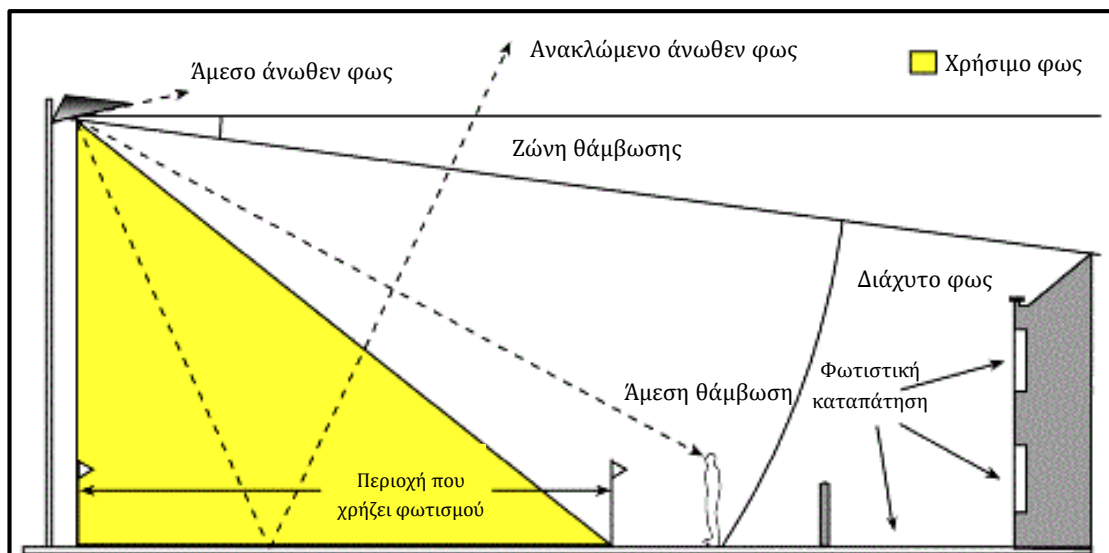
Σχήμα 1. Αναπαράσταση της σκέδασης φωτός Mie και Rayleigh από σωματίδια της ατμόσφαιρας.

υψηλή αστική διάχυση όπου μεγάλα αστικά κέντρα βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, όπως συμβαίνει για παράδειγμα κατά μήκος της ανατολικής ακτής των ΗΠΑ, σε χώρες της Βόρειας Ευρώπης, όπως το Βέλγιο, η Ολλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο, είναι δυνατό να ταξιδεύει κανείς τις νυχτερινές ώρες μεγάλες αποστάσεις σε ουσιαστικά αγροτικές περιοχές χωρίς να «ξεφύγει» ποτέ από την ζώνη επιρροής της φωτεινής τεχνητής ουράνιας λάμψης που δημιουργείται από τα γειτονικά αστικά κέντρα (Mizon, 2002:30). Παρατηρώντας την ουράνια λάμψη πάνω από μια μεγάλη πόλη, από μακρινή απόσταση, εμφανίζεται να παίρνει τη μορφή ενός θόλου ο οποίος ονομάζεται φωτεινός ουράνιος θόλος (light dome) (Εικόνα 3).



Εικόνα 3. Χαρακτηριστικής μορφής φωτεινός ουράνιος θόλος πάνω απο μια πόλη στην Arizona, ΗΠΑ. **Πηγή:** The City Dark, Wicked Delicate Films LLC

Σύμφωνα με την IDA (International Dark Sky Association) ο φωτεινός ουράνιος θόλος που δημιουργείται πάνω απο την πόλη του Los-Angeles γίνεται διακριτός με το αεροπλάνο ακόμα και απο περίπου 300 χιλιόμετρα μακριά. Η δημιουργία του ουράνιου θόλου (και της ουράνιας λάμψης) μειώνει την αντίθεση της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού σε τέτοιο βαθμό που είναι αδύνατη η παρατήρηση βασικών λεπτομερειών τόσο απο επαγγελματίες και ερασιτέχνες αστρονόμους όσο και από απλούς παρατηρητές. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις επιπτώσεις της ουράνιας λάμψης στην παρατήρηση του έναστρου ουρανού δίδονται σε επόμενη ενότητα. Οι μορφές φωτορύπανσης που περιγράφηκαν παραπάνω παρουσιάζονται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1. Χρήσιμος και παρασιτικός φωτισμός από ένα τυπικό φωτιστικό σώμα.
Πηγή: Επεξεργασία από Baldrey et al., 2005.

1.3 Αίτια της φωτορύπανσης

Το γεγονός ότι ο νυχτερινός ουρανός δεν είναι εντελώς σκοτεινός, οφείλεται στην παρουσία φωτός το οποίο μπορεί να προέρχεται από δύο ειδών πηγές, τις φυσικές και τις τεχνητές.

1.3.1 Φυσικές πηγές φωτός

Η φυσική φωτεινότητα του νυχτερινού ουρανού ή η φυσική ακτινοβολία υποβάθρου ορίζεται ως η ακτινοβολία που προκύπτει από την σκέδαση του φυσικού φωτός από φυσικά σωματίδια. (Narisada και Schreuder, 2004:61). Αυτή η φυσική ουράνια λάμψη (natural sky glow) του νυχτερινού ουρανού οφείλει τη παρουσία της στη συμβολή διαφόρων συνιστωσών φυσικού φωτός. Παραβλέποντας τη μικρή συνεισφορά του εξω-γαλαξιακού φωτεινού υποβάθρου καθώς και το διάχυτο φως από αντικείμενα εκτός του γαλαξιακού επιπέδου, η οποία αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στο 20% της συνολικής φωτεινότητας των άστρων (Leinert και Mattila, 1998), οι κύριες συνιστώσες του νυχτερινού φωτισμού είναι οι παρακάτω (Πίνακας 1).

Ηλιακό φως

Η σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας απο διαστημικά και ατμοσφαιρικά σωματίδια αποτελεί μια σημαντική συνιστώσα της φυσικής νυχτερινής ουράνιας φωτεινότητας. Η κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας διαφέρει τόσο σε ημερήσιο επίπεδο, με την μέγιστη να παρατηρείται κατά το λυκόφως (twilight) όταν το ύψος του ήλιου είναι ακόμα πάνω απο τον ορίζοντα ενώ η ελάχιστη ακτινοβολία παρατηρείται κατά το αστρονομικό λυκόφως (astronomical twilight) όπου το ύψος του ηλίου είναι 18° κάτω απο τον ορίζοντα, όσο και σε πολυετές επίπεδο εξαιτίας του 11ετούς ηλιακού κύκλου.

Σεληνόφως

Κατά μείζονα λόγο, πρόκειται ουσιαστικά για ηλιακό φως το οποίο αφού προσπέσει στην σεληνιακή επιφάνεια σκεδάζεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Φως το οποίο λαμβάνεται άμεσα απο τη σελήνη καθώς και αυτό που σκεδάζεται απο τα σωματίδια της ατμόσφαιρας αποτελεί την σημαντικότερη νυχτερινή φυσική πηγή φωτός ενώ ακόμα αποτελεί το πιο εγγύς και ορατό ουράνιο σώμα απο την επιφάνεια της γης.

Άστρα και πλανήτες

Παρότι το φως που προέρχεται απο τα άστρα και τους πλανήτες είναι σημαντική ως πηγή φωτισμού μόνο τις ασέληνες νύχτες, η παρουσία τους στον νυχτερινό ουρανό είναι ζωτικής σημασίας (Jensen et al., 2001).

Ζωδιακό φως

Πρόκειται για μια αχνή, κωνικής μορφής, διάχυτη λάμψη που δημιουργείται λόγω της σκέδασης του ηλιακού φωτός απο κοσμική σκόνη και γίνεται ορατή σε συνθήκες πλήρους σκότους κατά μήκος του ορίζοντα, ανατολικά λίγο πριν το λυκαυγές ή δυτικά λίγο πριν το λυκόφως.

Ατμοσφαιρική φωταύγεια (Airglow – Nightglow)

Φωτοχημικές, χημικές και δυναμικές διεργασίες στο ύψος της ανώτερης ατμόσφαιρας συμβάλλουν στην απελευθέρωση της αποροφούμενης ηλιακής ενέργειας ως ακτινοβολούμενη αμυδρή λάμψη η οποία ονομάζεται ατμοσφαιρική φωταύγεια (Roach και Gordon, 1973:47). Το φαινόμενο αυτό παίρνει τη χαρακτηριστική μορφή ενός θόλου ο οποίος εντοπίζεται στο εξωτερικό όριο της ανώτερης ατμόσφαιρας. Η σύγχυση αυτού του φαινομένου με το φαινόμενο του τεχνητού ουράνιο θόλου που περιγράφηκε

στην προηγούμενη ενότητα είναι λανθασμένη καθώς οφείλονται σε διαφορετικούς αιτιογενείς παράγοντες.

Συνιστώσα	Ακτινοβολία (W/m ²)
Ηλιακό φως	$1.3 \cdot 10^3$
Σεληνόφως	$2.1 \cdot 10^{-3}$
Λαμπεροί πλανήτες	$2.0 \cdot 10^{-6}$
Ζωδιακό φως	$1.2 \cdot 10^{-7}$
Αστρόφως	$3.0 \cdot 10^{-8}$
Ατμοσφαιρική φωταύγεια	$5.1 \cdot 10^{-8}$
Διάχυτο γαλαξιακό φως	$9.1 \cdot 10^{-9}$

Πίνακας 1. Τυπικές τιμές φυσικών πηγών νυχτερινού φωτισμού. **Πηγή:** Επεξεργασία από Jensen et al., 2001.

Αυτές οι φυσικές πηγές φωτός που περιγράφηκαν παραπάνω αν και συνυπάρχουν, δεν παρατηρούνται ταυτόχρονα. Οι ασθενέστερες από αυτές κάνουν αισθητή την παρουσία τους μόνο τις σκοτεινές νύχτες και εφόσον οι συνθήκες ορατότητας είναι ιδανικές. Η κατανόηση και η γνώση των αλληλεπιδράσεων και της συνεισφοράς τους στη φωτεινότητα του νυχτερινού ουρανού είναι απαραίτητη για την ορθολογική μελέτη του φαινομένου της φωτορύπανσης. Γνωρίζοντας τη συνολική συνεισφορά των φυσικών πηγών φωτός στο νυχτερινό ουρανό γίνεται δυνατή η αναγνώριση της πλεονάζουσας φωτεινότητας που οφείλεται σε τεχνητές πηγές φωτισμού από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Το σκεπτικό αυτό, αποτέλεσε (και αποτελεί) την πρωταρχική βάση για τη μοντελοποίηση του φαινομένου της φωτορύπανσης με σημείο αναφοράς τη μελέτη του Walker (1977). Σε επόμενη ενότητα γίνεται σχολαστική αναφορά στις μεθόδους μοντελοποίησης της φωτορύπανσης.

1.3.2 Τεχνητές πηγές φωτός

Η πυκνότητα και η κατανομή του συνεχώς αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού συνδέεται σε όλο και μεγαλύτερο βαθμό με το φαινόμενο της δημογραφικής αστικοποίησης. Η αυξανόμενη τάση της μετατόπισης μεγάλων πληθυσμιακών ομάδων προς τα αστικά κέντρα έχει συμβάλει στην υπερμεγέθυνση των σύγχρονων πόλεων. Σύμφωνα με προβλέψεις του ΟΗΕ, έως το 2025 σχεδόν τα δύο τρίτα του

αναπτυσσόμενου κόσμου θα διαμένουν σε πόλεις με τουλάχιστον έξι απο αυτές να διπλασιάζονται σε μόλις 20 χρόνια. Η συνεχής αυτή προαστικοποίηση έχει ως επακόλουθο την δημιουργία νέων απαραίτητων εγκαταστάσεων υποδομών για την εξυπηρέτηση του νεοεισερχόμενου πληθυσμού, όπως νέοι αυτοκινητόδρομοι, κτίσματα, χώροι στάθμευσης, υπηρεσίες κοινής ωφέλειας κ.α.

Οι σύγχρονες αυτές κοινωνίες αποτελούν πολύπλοκα συστήματα που περιλαμβάνουν μια πληθώρα ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και πιο συγκεκριμένα η χρήση του τεχνητού φωτισμού αποτελεί ένα άρρηκτα συνδεδεμένο στοιχείο που επιτρέπει την διένεξη αυτών των δραστηριοτήτων και κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών. Η τεχνολογική ανάπτυξη στον τομέα των ηλεκτρικών λαμπτήρων, η ενεργειακή αποδοτικότητα καθώς και το φαινόμενο της κοινωνικής αστικοποίησης έχουν οδηγήσει στην υπέρμετρη χρήση του τεχνητού φωτισμού με αποτέλεσμα την επιδείνωση του φαινομένου της φωτορύπανσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα και μία μόνο μονάδα φωτισμού μπορεί να διαταράξει τα φυσικά επίπεδα φωτεινότητας του νυχτερινού περιβάλλοντος (Crawford D., 2000).

Στο σύνολό τους, όλες οι πηγές τεχνητού φωτισμού μπορεί να προκαλέσουν φωτορύπανση. Η έμφαση δίδεται ιδιαίτερα στον εξωτερικό τεχνητό φωτισμό (outdoor lighting), σε πηγές που εκπέμπουν φως άνωθεν του οριζόντιου επιπέδου όπως είναι τα χαμηλής ποιότητας και σχεδιασμού φωτιστικά σώματα που εκπέμπουν μεγαλύτερης έντασης φωτεινότητας από ότι απαιτείται, στοχεύουν σε περιοχές που δεν είναι αναγκαίο και σε πολλές περιπτώσεις η ύπαρξή τους δεν είναι απαραίτητη, καθώς δεν εξυπηρετούν κάποια λειτουργική δραστηριότητα του ανθρώπου συμβάλλοντας στην δημιουργία διαφόρων μορφών φωτορύπανσης που αναλύθηκαν στη προηγούμενη ενότητα. Στη μελέτη του ο Falchi (2011) αξιοποιώντας μετρήσεις 12 χρόνων της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού σε διαφορετικές περιοχές της Ιταλίας, διαπίστωσε ότι κατά μέσο όρο το 75% της τεχνητής φωτεινότητας του νυχτερινού οφείλεται στην απευθείας (άμεση) φωτεινή ροή (flux) απο τις εγκαταστάσεις φωτισμού ενώ μόλις το 25% οφείλεται απο την έμμεση διάδοση του φωτός (ανακλώμενο φως), η οποία ωστόσο δεν πρέπει να θεωρείται αμελητέα.

Σύμφωνα με την CIE (International Commission on Illumination, 1997) οι κύριες πηγές τεχνητού φωτισμού οι οποίες μπορεί να συμβάλουν στο φαινόμενο της φωτορύπανσης είναι:

- ❖ Φωτισμός απο βιομηχανικές περιοχές, αεροδρόμια και εργοτάξια
- ❖ Φωτισμός οδικού δικτύου
- ❖ Φωτιζόμενες διαφημιστικές πινακίδες
- ❖ Έντονος φωτισμός απο προβολείς κτιρίων, αρχαίων μνημείων και αθλητικών εγκαταστάσεων
- ❖ Φωτισμός αγροτικών θερμοκηπίων
- ❖ Φωτισμός από περιοχές πωλήσεων, εμπορικά κέντρα, χώροι στάθμευσης κλπ.

Το μέγεθος της συνεισφοράς των παραπάνω πηγών τεχνητού φωτισμού είναι αμφιλεγόμενο και διαφορετικό για την εκάστοτε περιοχή. Ορισμένες μελέτες αναφέρουν τον οδικό φωτισμό ως την πιο σημαντική συνιστώσα στο φαινόμενο της φωτορύπανσης, αν και οι εκτιμήσεις διαφέρουν από 14% (Schreuder, 1991) έως και 50% (Shalfik, 1997). Επιπλέον, τεχνητές πηγές φωτισμού που εντοπίζονται σε θαλάσσιες περιοχές όπως κρουαζιερόπλοια, αλιευτικά σκάφη, φάροι και θαλάσσιες πλατφόρμες εξόρυξης ορυκτών καυσίμων όπως πετρέλαιο και φυσικό αέριο, θα πρέπει να λαμβάνονται εξίσου υπόψιν (Elvidge et al., 2001).

1.4 Επιπτώσεις της φωτορύπανσης

Η ραγδαία ανάπτυξη της φωτορύπανσης-κυρίως σε περιοχές έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας- επιφέρει ένα μεγάλο αριθμό άμεσων και έμμεσων επιπτώσεων όχι μόνο στο τοπικό αστικό-περιαστικό περιβάλλον στο οποίο εκδηλώνεται, αλλά και σε ολόκληρο το φυσικό περιβάλλον. Σε αναντιστοιχία με άλλα εγγενή περιβαλλοντικά ζητήματα όπως για παράδειγμα η ηχορύπανση, η ατμοσφαιρική ρύπανση, η ρύπανση των υδάτων, η συστηματική μελέτη και έρευνα σχετικά με το φαινόμενο της φωτορύπανσης και τις ενδεχόμενες επιπτώσεις, χρονολογείται πολύ πρόσφατα, μόλις στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Την τελευταία δεκαετία οι επιπτώσεις της φωτορύπανσης έχουν ταξινομηθεί στις παρακάτω κατηγορίες.

1.4.1 Νυχτερινές δραστηριότητες

1.4.1.1 Παρεμπόδιση της θέασης του νυχτερινού ουρανού

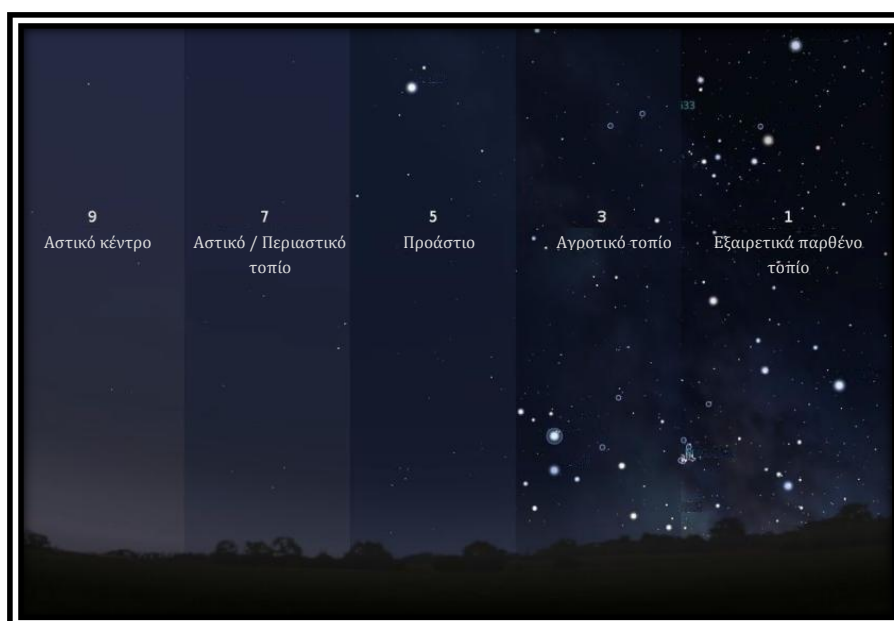
Ο ανεξέλεγκτος τεχνητός φωτισμός συντελεί στην δημιουργία ενός φωτεινού υποβάθρου πάνω από μεγάλα αστικά κέντρα και βιομηχανικές περιοχές με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντίθεση της φωτεινότητας στο νυχτερινό ουρανό. Η μορφή αυτή φωτορύπανσης αντιστοιχεί στον τεχνητό φωτεινό ουράνιο θόλο που περιγράφηκε στην ενότητα 1.2.5. Οι αστρονόμοι ήταν οι πρώτοι που παρατήρησαν αυτή την αυξανόμενη ανάπτυξη της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού και δικαίως επισήμαναν τον κίνδυνο για την υποβάθμιση της ποιότητας του νυχτερινού ουρανού.

Η αύξηση αυτή της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανό παραμβάλλει βασικές αστρονομικές μετρήσεις όπως η υψηλής ανάλυσης φασματοσκοπία των αστέρων, η αστροφωτογραφία, η παρατηρησιακή κοσμολογία, οι οποίες απαιτούν χαμηλά επίπεδα φωτεινότητας (Riegel, 1973). Ωστόσο, δεν απειλείται μόνο η παρατήρηση του νυχτερινού ουρανού από τους Αστρονόμους αλλά και η ίδια η αντίληψη του ανθρώπου για το Σύμπαν (Cinzano et al., 2000, Crawford, 1991). Ο έναστρος νυχτερινός ουρανός αποτελεί αναμφισβήτητα ένα εξαιρετικό αντικείμενο επιστημονικού ενδιαφέροντος και φυσικής ομορφιάς. Ενώ σε φυσικές συνθήκες φωτεινότητας ενός μη φωτορυπασμένου νυχτερινού υποβάθρου, τουλάχιστον 2500 αστέρια γίνονται ορατά με γυμνό μάτι, σε ένα τυπικό προάστειο μιας σύγχρονης μεγαλούπολης μόλις 250 – 300 αστέρια είναι δυνατόν να διακριθούν, με τον αριθμό αυτόν να πέφτει κατακόρυφα, με μόλις το πολύ 12 αστέρια να γίνονται διακριτά στο κέντρο της πόλης (Fraknoi, 2008).

Γενικά, φωτορυπασμένος θεωρείται ο νυχτερινός ουρανός όταν τα επίπεδα του τεχνητού φωτισμού υπερβούν το 10% του αντίστοιχου φωτισμού που προέρχεται από φυσικές πηγές (Smith, 1979). Περίπου τα δύο τρίτα του παγκόσμιου πληθυσμού, και το 99% του πληθυσμού των ΗΠΑ και της Ευρώπης κατοικούν σε περιοχές όπου τα επίπεδα φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού είναι πάνω από αυτό το καθορισμένο όριο (Cinzano et al, 2001, Εικόνα 5). Μεγάλο ποσοστό του προαναφερθής πληθυσμού δεν έχει παρατηρήσει ποτέ την πραγματική φυσική μορφή του νυχτερινού έναστρου ουρανού ενώ η αντίληψή του για τον Γαλαξία (Milky Way) είναι άγνωστη.

Ο Bob Mizon (Campaign for The Dark Skies, 2009:8) αναφέρει χαρακτηριστικά: *“Το φως από τα μακρινά αστέρια χρειάζεται εκατοντάδες, χιλιάδες ή ακόμα και εκατομμύρια χρόνια για να φτάσει στον πλανήτη μας. Τι τραγωδία να στερούμαστε αυτό το θέαμα για το τελευταίο χιλιοστό του δευτερολέπτου του ταξιδιού του.”*

Για την μέτρηση της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού ο John Bortle (2001) δημιούργησε μια εμπειρική βαθμονομημένη κλίμακα (Bortle Dark-Sky Scale) προκειμένου να περιγράψει τα διάφορα επίπεδα φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού που μπορούν να γίνουν αντιληπτά από μια οποιαδήποτε τοποθεσία, δίνοντας έτσι ένα σημαντικό εργαλείο στον οποιοδήποτε παρατηρητή να καταγράφει την ποιότητα του νυχτερινού ουρανού. Τα κριτήρια της κλίμακας αφορούν, το οριακό μέγεθος με γυμνό μάτι (Naked-eye limiting magnitude) όσο και με τη χρήση ενός μέσου οργάνου (limiting magnitude).¹ Η βαθμονόμηση της κλίμακας εκτείνεται στο διάστημα 1 – 9, με την ελάχιστη και μέγιστη τιμή να αντιστοιχούν σε εξαιρετικά υψηλά και χαμηλά επίπεδα φωτεινότητας αντίστοιχα. Το αντίκτυπο της φωτορύπανσης στη φωτεινότητα του νυχτερινού ουρανού και στο πλήθος των αστερών που μπορεί να γίνουν αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι μπορεί να γίνει κατανοητό από το παρακάτω γράφημα στο οποίο παρουσιάζονται διάφορα επίπεδα της ουράνιας φωτεινότητας σύμφωνα με την κλίμακα Bortle (Εικόνα 4).

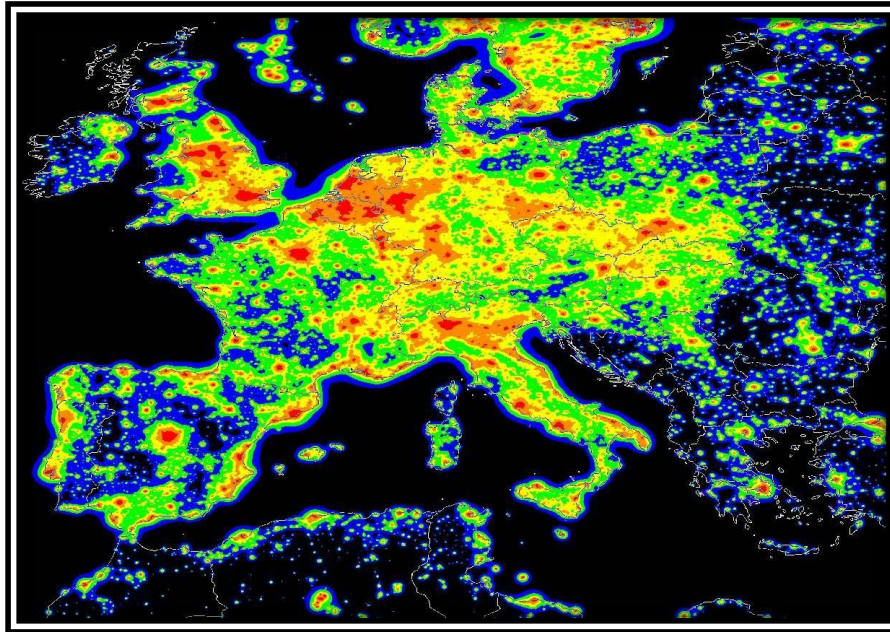


Εικόνα 4. Οριακό μέγεθος ουράνιων αντικειμένων σε συνάρτηση με τα επίπεδα φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού σε επιλεγμένα παρατηρητήρια.

Πηγή: Επεξεργασία από gizmodo.com.

¹ Στην αστρονομία, με τον όρο οριακό μέγεθος (limiting magnitude) εκφράζεται το φαινόμενο μέγεθος του πιο αμυδρού ουράνιου αντικειμένου που μπορεί να γίνει αντιληπτό με τη χρήση ενός μέσου οργάνου.

Στην μελέτη τους οι Cinzano et al., (2001) μοντελοποίησαν την τεχνητή φωτεινή ουράνια φωτεινότητα σε παγκόσμιο επίπεδο, δημιουργώντας τον πρώτο παγκόσμιο Άτλαντα της τεχνητής ουράνιας λάμψης.



Εικόνα 5. Τεχνητή φωτεινότητα του νυχτερινού ουρανού, στο ζενίθ, στο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας, στην Ευρώπη το 1996-1997. **Πηγή:** Cinzano, Falchi & Elvidge, 2001

1.4.1.2 Ατυχήματα

Το φαινόμενο της θάμβωσης που περιγράφηκε στην ενότητα 1.2.4 αποτελεί συχνό αίτιο πρόκλησης ατυχημάτων κατά την νυχτερινή οδήγηση. Ηλικιωμένα άτομα εξαιτίας της υψηλής οπτικής ευαισθησίας στις αιφνίδιες αλλαγές των επιπέδων φωτεινότητας είναι οι πιο επιρρεπείς πληθυσμιακές ομάδες σε αυτού του είδους το φαινόμενο (Anderson & Holliday, 1995; Babizhayev, 2003; Van der beg J., et al., 2009).

Νυχτερινές αεροπορικές δραστηριότητες επηρεάζονται εξίσου από το φαινόμενο της θάμβωσης. Στην μελέτη τους οι Nakagawara et al., (2007) εξέτασαν τη συμβολή της έκθεσης σε έντονες πηγές φωτισμού στην πρόκληση αεροπορικών ατυχημάτων και περιστατικών. Η αιφνίδια αλλαγή των επιπέδων φωτεινότητας του νυχτερινού περιβάλλοντος εξαιτίας των εγκαταστάσεων φωτισμού των αερολιμένων προκαλεί το φαινόμενο της θάμβωσης και προσωρινής τύφλωσης στο οπτικό σύστημα των πιλότων με αποτέλεσμα την απώλεια ελέγχου του αεροσκάφους. Η πλειοψηφία των

ατυχημάτων σε ποσοστό 57% συνέβησαν κατά τη διάρκεια προσέγγισης και προσγείωσης της πτήσης.

1.4.2 Ανθρώπινη υγεία και βιοτικό επίπεδο

Ο άνθρωπος όπως και άλλα είδη έχουν προσαρμόσει και εξελίξει για εκατομμύρια χρόνια τη παρουσία τους στο πλανήτη υπό την πίεση και την επίδραση εξωγενών παραγόντων του περιβάλλοντος. Ένας από αυτούς τους παράγοντες είναι ο φυσικός ημερήσιος 24ώρος κύκλος φωτός – σκότους (ημέρας – νύχτας) ο οποίος οφείλεται στην περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της (Duffy και Czeisler, 2009). Βασικές, δομικές σωματικές λειτουργίες και βιολογικές διεργασίες του ανθρώπινου οργανισμού συντονίστηκαν και απέκτησαν ρυθμικότητα σε αυτήν την ημερήσια φωτοπερίοδο (φωτοπεριοδισμός)². Οι διακυμάνσεις αυτές ονομάζονται βιολογικοί ρυθμοί και η περιοδικότητά τους επιτυγχάνεται χάρη σε ένα ενδογενή μηχανισμό μέτρησης του χρόνου, το βιολογικό ρολόι ή Κιρκάδιο σύστημα, το οποίο επιτρέπει τον προγραμματισμό των δραστηριοτήτων σύμφωνα με τις επερχόμενες εναλλαγές του φωτός – σκότους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της επιρροής του Κιρκαδιανού συστήματος στην ανθρώπινη φυσιολογία είναι η σωστή λειτουργία του ενδοκρινολογικού συστήματος, η συμπεριφορά, καθώς και η έκκριση πολύτιμων ορμονών όπως είναι η μελατονίνη η οποία παράγεται αποκλειστικά κατά τη διάρκεια των νυκτερινών ωρών και αναστέλλεται κατά την έκθεση στο φως (Reiter, 1991). Η μελατονίνη επιφέρει σημαντικές ευεργετικές ιδιότητες, και μεταξύ άλλων σχετίζεται με μηχανισμούς ρύθμισης του ύπνου, τη θερμορύθμιση, τη αντιξειωτική και αντικαρκινική προστασία του οργανισμού κ.α. (Pauley, 2004; Rodriguez et al., 2004; Kajochen et al., 2003; Ravindra et al., 2006).

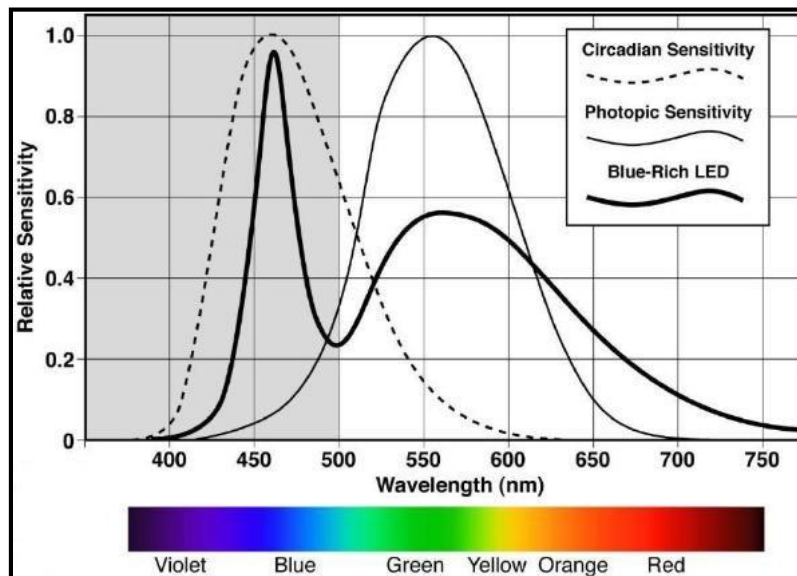
Η ικανότητα του ανθρώπου να μεταβάλλει τις φυσικές ισορροπίες του ημερήσιου κύκλου μέσω της εισαγωγής του τεχνητού φωτισμού ενδέχεται να επιφέρει πολλαπλές σημαντικές άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις όχι μόνο στην ανθρώπινη υγεία αλλά και σε όσους έμβιους οργανισμούς επηρεάζονται από αυτόν. Δεδομένης της σχετικά πρόσφατης ευρείας χρήσης του τεχνητού φωτισμού, η μελέτη για την κατανόηση της

² Στη επιστήμη της Βιολογίας, φωτοπεριοδισμός αποκαλείται η ικανότητα των οργανισμών να αντιλαμβάνονται τον ημερήσιο κύκλο φωτός – σκότους και να προσαρμόζουν κατάλληλα ορισμένες σημαντικές σωματικές τους λειτουργίες.

επίδρασης και των πιθανών επιπτώσεων του τεχνητού φωτός ήταν περιορισμένη. Ωστόσο, από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, και ακόμα εντατικότερα την τελευταία δεκαετία, ένας σημαντικός αριθμός επιστημονικών μελετών έχει αναδείξει και καταγράψει τις αρνητικές πτυχές της έκθεσης στον τεχνητό φωτισμό.

Πράγματι, η έκθεση στον τεχνητό φωτισμό κατά τις βραδινές ώρες τείνει να γίνει ζήτημα υγείας. Σε αυτήν την περίπτωση, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στον εσωτερικό τεχνητό φωτισμό (indoor lighting). Σύμφωνα με τον Travis Longcore υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι με τους οποίους ο εξωτερικός παρασιτικός φωτισμός μπορεί να συμβάλλει στην αυξημένη έκθεση φωτός σε εσωτερικούς χώρους. Στην πρώτη περίπτωση, ο εξωτερικός φωτισμός εισέρχεται άμεσα ως εισβάλλον φως (φαινόμενο της φωτιστικής καταπάτησης) σε τέτοια επίπεδα που μπορούν να επηρεάσουν την φυσιολογική λειτουργία του ατόμου. Στη δεύτερη περίπτωση, η οπτική ενόχληση που προκαλείται από εξωτερικές πηγές φωτισμού συμβάλλει στην χρήση του εσωτερικού φωτισμού με αποτέλεσμα ακόμα μεγαλύτερη έκθεση. Η παρατεταμένη έκθεση ενός ατόμου σε υψηλά επίπεδα φωτισμού έχει αποδειχθεί ότι διαταράσσει τη φυσιολογική λειτουργία του Κιρκάδιου συστήματος. Ο Pauley (2004) αναφέρει χαρακτηριστικά ότι το τεχνητό φως δρα σαν «ναρκωτικό» και προκαλεί διαταραχές στο βιολογικό ρολόι του ανθρώπινου οργανισμού.

Δύο κύρια χαρακτηριστικά του φωτός είναι αυτά που ευθύνονται για την πρόκληση διαταραχών στην ανθρώπινη υγεία, η ένταση (Irradiance, I) και το μήκος κύματος (λ) του εκπεμπόμενου φωτός. Στη μελέτη τους οι Cajochen et al. (2005) αξιολόγησαν την επίδραση της ακτινοβολίας του φωτός σε διάφορα μήκη κύματος σε σχέση με την παραγωγή μελατονίνης, την εγρήγορση, την θερμορύθμιση και τον καρδιακό ρυθμό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η έκθεση δύο ωρών σε ακτινοβολία φωτός της τάξης των 460nm τις νυχτερινές ώρες, κατέστειλε σημαντικά την έκκριση μελατονίνης ενώ δεν παρατηρήθηκαν παρόμοιες αντιδράσεις υπό έκθεση σε μήκος κύματος 550nm. Αντίστοιχα, άλλες μελέτες έδειξαν ότι η εκπομπή φωτός στο μπλε τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που παράγεται από λαμπτήρες τύπου HID (Λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής έντασης, γνωστοί ως xenon) και LED είναι πολύ δραστικοί στη μείωση της μελατονίνης (Brainard, 2002, Wood et al., 2013) ενώ η έκθεση ενός ατόμου τις νυχτερινές ώρες σε λάμπα πυρακτώσεως για μόλις 39 λεπτά επιφέρει μείωση στα επίπεδα της μελατονίνης έως και 50% (Schulmeister et al., 2002).



Σχήμα 1.2. Καμπύλες της ανθρώπινης φωτοπικής και κίρκαδικής ευαισθησίας στο μπλε φως από λαμπτήρες τύπου LED.
Πηγή: IDA, 2010

Οι εργαζόμενοι σε βάρδιες (shift workers) είναι ίσως από τις πιο επιβαρυνμένες πληθυσμιακές ομάδες όσον αφορά την έκθεση σε τεχνητό φωτισμό τις βραδινές ώρες. Μελέτες έχουν δείξει ότι μεγάλο μέρος αυτών των ατόμων πάσχουν από χρόνια διαταραχή του κίρκαδιανού συστήματος με κοινά συμπτώματα τον αποσυντονισμό του ημερήσιου κύκλου ύπνου – εγρήγορσης (shift work sleep disorder), αίσθημα συνεχής κόπωσης, κακή απόδοση και μνήμη, ακόμα και την εμφάνιση καρκίνου του μαστού (Pauley, 2004, Stevens, 2009). Επιπρόσθετα, άλλες επιπτώσεις που έχουν συσχετισθεί με την παρατεταμένη έκθεση το νυχτερινό τεχνητό φωτισμό αφορούν διαταραχές στη μεταβολική δραστηριότητα, έμμεσες παρενέργειες λόγω αϋπνίας, και εμφάνιση οξειδωτικού στρες (Brugger et al., 1995; Haus και Smolensky, 2006).

1.4.3 Φυσικό περιβάλλον

Όπως ακριβώς και ο άνθρωπος, έτσι και όλοι οι έμβιοι ζωικοί και φυτικοί οργανισμοί, διαθέτουν το δικό τους ενδογενές κίρκαδικό σύστημα το οποίο ρυθμίζει σημαντικές πτυχές της δραστηριότητας και φυσιολογία τους. Οι φυσικές διακυμάνσεις του φωτός εξαιτίας του ημερήσιου, μηνιαίου και ετήσιου κύκλου παρέχει εξωτερικά ερεθίσματα

που ονομάζονται χρονοδότες (zeitgebers) με βάση τα οποία συγχρονίζονται οι βιολογικοί ρυθμοί των οργανισμών (Gaston et al., 2013, Nelson και Navara, 2007).

Καθώς ο άμεσος και ευρύτερος περιαστικός χώρος των μεγάλων πόλεων κατοικείται και οικοδομείται διάσπαρτα όλο και περισσότερο πλησίον φυσικών ενδιαιτημάτων, τα φυσικά οικοσυστήματα γίνονται ιδιαίτερα εκτεθειμένα στον τεχνητό νυχτερινό φωτισμό. Η εισαγωγή του τεχνητού φωτισμού στο φυσικό περιβάλλον αλλοιώνει τα χωροχρονικά μοτίβα του φυσικού φωτός διαταράσσοντας στοιχειώδεις αλληλένδετες λειτουργίες των οικοσυστημάτων υπομονεύοντας την ποιότητα ζωής των έμβιων οργανισμών.

Η φωτορύπανση επιφέρει μια πληθώρα άμεσων και έμμεσων αρνητικών επιπτώσεων στο φυσικό περιβάλλον, όπως τη διαταραχή της αναπαραγωγικής συμπεριφοράς, την διαφοροποίηση στους ρόλους θηρευτή-θύματος, τον αποπροσανατολισμό, την επικοινωνία κ.α. (Longcore και Rich, 2004, 2007). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι μεταναστευτικές ροές των αποδημητικών πουλιών τα οποία έλκονται και αποπροσανατολίζονται από τα τεχνητά φώτα των πόλεων. Υδροβία είδη όπως οι θαλάσσιες χελώνες, μετά την εκκόλαψή τους χρησιμοποιούν μια οπτική ένδειξη για τον προσανατολισμό και κατεύθυνσή τους προς τη θάλασσα. Η εκπομπή διάχυτου φωτός από εγκαταστάσεις τεχνητού φωτισμού στις παράκτιες περιοχές τα ελκύει και αποπροσανατολίζει με αποτέλεσμα τον θάνατό τους λόγω εξάντλησης, αφυδάτωσης ή θήρευσής τους (Witherington και Martin, 2000). Αντίστοιχες μελέτες έχουν ερευνήσει τις πιθανές επιπτώσεις της φωτορύπανσης στα αμφίβια ζώα (Wise, 2007) καθώς και στα θαλάσσια πτηνά (Longcore και Rich, 2006).

Εκτός από τους ζωικούς οργανισμούς, μελέτες έχουν εξετάσει την συμβολή της έκθεσης των φυτών στον νυχτερινό τεχνητό φωτισμό. Έχει αποδειχθεί ότι η παρουσία του τεχνητού φωτισμού τις βραδινές ώρες διεγείρει την διαδικασία της φωτοσύνθεσης σε περιόδους που υπό φυσικές συνθήκες φωτισμού δεν θα ήταν δυνατή (Aube et al., 2013). Ο τεχνητός φωτισμός ανάλογα με τα φασματικά του χαρακτηριστικά επηρεάζει θεμελιώδεις διεργασίες των φυτών όπως η βλάστηση των σπόρων, η ανάπτυξη των άνθων κ.α., ενώ αποτρέπει πολλά είδη δέντρων στην προσαρμογή τους στις εποχιακές διακυμάνσεις (Briggs, 2006).

Μία επιπλέον σημαντική πτυχή του φαινομένου της φωτορύπανσης στο φυσικό περιβάλλον που σχετίζεται άμεσα με την παρουσία ανθρώπινων δραστηριοτήτων, είναι

η διατάραξη της «φυσικής ηρεμίας» μιας περιοχής, εξαιτίας της εισαγωγής του τεχνητού φωτισμού, προκαλώντας οπτική ενόχληση και θόρυβο (Chalkias, 2006).

Όλες οι παραπάνω ενδεχόμενες επιπτώσεις της φωτορύπανσης στην βιόσφαιρα, οι οποίες συνοδεύονται από βαρυσήμαντες μεταβολές των φυσικών δραστηριοτήτων, μπορεί να οδηγήσουν σε οικολογικές αλλαγές μεγάλης κλίμακας, το οποίο πρόσφατα έχει οδηγήσει στην θεώρηση της φωτορύπανσης ως μια σημαντική απειλή για την βιοποικιλότητα (Hölker et al., 2010).

1.4.4 Οικονομία και Κοινωνία

1.4.4.1 Οικονομικές – Ενεργειακές απώλειες

Κάθε ποσότητα φωτός που εκπέμπεται από φωτιστικά σώματα και δεν εξυπηρετεί κάποια ανθρώπινη λειτουργική ανάγκη (όπως το διάχυτο φως από ένα χαμηλής ποιότητας φανοστάτη) αποτελεί αυτομάτως απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας, και συνεπώς οικονομική απώλεια. Δεν είναι εύκολη μια πραγματική αποτίμηση της ακριβής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας και χρημάτων που ξοδεύονται για τον εξωτερικό φωτισμό που συντελεί στο φαινόμενο της φωτορύπανσης. Το πρώτο βήμα είναι η εκτίμηση της ποσότητας της ενέργειας που καταναλώνεται για τον εξωτερικό φωτισμό (Narisada και Schreuder, 2004:15). Σύμφωνα με την IEA (International Energy Agency, 2006) ο τεχνητός φωτισμός καταναλώνει το 19% της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και ευθύνεται για την έκλυση 1900 μεγατόνων (Mt) θερμοκηπιακών αερίων ετησίως. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας της οποίας μεγάλο μέρος δαπανάται για ακατάλληλη και υπερβολική χρήση τεχνητού φωτός από διάφορες εγκαταστάσεις φωτισμού, συμβάλλει στην επιτάχυνση της εξόρυξης και καύσης ορυκτών καυσίμων με αποτέλεσμα την περεταίρω απελευθέρωση θερμοκηπιακών αερίων. Στις ΗΠΑ (όπως αναφέρεται στο Gallaway, Olsen και Mitchel, 2010) περίπου το 6% των 4.054 εκατομμυρίων μεγαβατώραν (MWh) της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για τον εξωτερικό φωτισμό και εκτιμάται ότι το 30% αυτής της ποσότητας «χάνεται» με μια από τις μορφές φωτορύπανσης που περιγράφηκαν στη προηγούμενη ενότητα.

Μέχρι πρόσφατα, στην πλειονότητά τους οι επιστημονικές μελέτες εστίαζαν στη συσχέτιση των τεχνητών εκπομπών φωτός κατά κύριο λόγο με πληθυσμιακά δεδομένα, αγνοώντας οικονομικούς παράγοντες. Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι υπάρχει επίσης μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ των εκπομπών νυχτερινού φωτισμού με οικονομικές μεταβλητές όπως το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (Gallaway, Olsen και Mitchel, 2010, Mellander et al., 2013). Η μελλοντική έρευνα στο κομμάτι αυτό μπορεί να αναδειξεί σημαντικές πτυχές του φαινομένου της φωτορύπανσης σε ένα ευρύτερο πλαίσιο και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

1.4.4.2 Τεχνητός φωτισμός και εγκληματικότητα

Το έγκλημα, και ο φόβος για το έγκλημα (fear of crime) αποτελούν από τις σημαντικότερες ατομικές και κοινωνικές ανησυχίες των πολιτών στις βιομηχανικές χώρες. Κατά γενική ομολογία, η ύπαρξη φωτισμού στο δημόσιο χώρο έχει συνδεθεί με το αίσθημα ασφάλειας και της μειωμένης έκθεσης ενός ατόμου σε εγκληματικές ενέργειες. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα, η εγκατάσταση βελτιωμένου τεχνητού φωτισμού έχει χρησιμοποιηθεί ως αυτοσκοπός για την πρόληψη εναντίον του εγκλήματος αλλά και για την ενδυνάμωση του αισθήματος ασφάλειας. Σύμφωνα με τους Fatherington και Welsh (2003:10) υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι με τους οποίους η βελτίωση του δημόσιου φωτισμού μπορεί να αποτρέψει εγκληματικές πράξεις. Ο πρώτος, υποστηρίζει ότι η μεταβολή των φυσικών συνθηκών μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της οπτικής αντίληψης και ορατότητας με αποτέλεσμα τη μείωση ευνοϊκών συνθηκών για τη διενέργεια εγκληματικών πράξεων καθώς και την αύξηση της πιθανότητας ενός δράστη να γίνει αντιληπτός. Ο δεύτερος υποστηρίζει ότι ο φωτισμός μπορεί να ενισχύσει τον ανεπίσημο κοινωνικό έλεγχο και την κοινωνική συνοχή με την αποτελεσματικότερη χρήση του δρόμου και τις επενδύσεις σε επίπεδο γειτονιάς.

Ωστόσο, τα αποτελέσματα πολλών επιστημονικών μελετών για την αποτελεσματικότητα της χρήσης του εξωτερικού φωτισμού στην πρόληψη του εγκλήματος είναι διφορούμενα και συγκεχυμένα. Οι Fatherington και Welsh (2003, 2007, 2008) επιχείρησαν να αξιολογήσουν την επίδραση του εξωτερικού φωτισμού στην εμφάνιση καταγεγραμμένων εγκληματικών ενεργειών σε οκτώ περιοχές των ΗΠΑ και πέντε στην Μεγάλη Βρετανία. Σε τέσσερις από τις οκτώ περιοχές των ΗΠΑ και σε τέσσερις από τις πέντε στη Μεγάλη Βρετανία, ο φωτισμός αποδείχθηκε ως ένα

αποτελεσματικό μέτρο στη μείωση της εγκληματικότητας κάτι το οποίο δεν διαπιστώθηκε και στις υπόλοιπες περιοχές. Ανάλογα ήταν τα ευρήματα της μελέτης των Atkins, Husain και Storey (1991) οι οποίοι διαπίστωσαν ότι το μεγάλο πρόγραμμα βελτίωσης του εξωτερικού φωτισμού τη δεκαετία του 1980 στο Λονδίνο δεν συνέβαλε στην μείωση εμφάνισης εγκληματικών ενεργειών. Παρόλα αυτά, υποστηρίζουν ότι η βελτίωση του φωτισμού αποτέλεσε ένα δημοφιλές μετρώ και ενίσχυσε το αίσθημα δημόσιας ασφάλειας των πολιτών.

1.5 Εργαλεία αντιμετώπισης της φωτορύπανσης

Η αστρονομική επιστημονική κοινότητα, επιστήμονες του φυσικού περιβάλλοντος, καθώς και διάφοροι εθνικοί και διεθνείς οργανισμοί όπως η IDA, CIE, IES, ILE (Institution of Lighting Engineers), CfDS (Campaign for Dark Skies) και άλλες κοινότητες, έχουν κατορθώσει να γνωστοποιήσουν και να αναδείξουν την σημαντικότητα του φαινομένου της φωτορύπανσης και των ενδεχόμενων επιπτώσεων αυτού, σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά και να προτείνουν διορθωτικά μέτρα και στοχευμένες παρεμβάσεις για την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση του. Δεδομένης της πολυδιάστατης φύσης του φαινομένου της φωτορύπανσης, οποιαδήποτε προσπάθεια περιορισμού του θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν όλες τις εκφάνσεις του καθώς και την χωροχρονική του διαφοροποίηση.

Πράγματι, σύμφωνα με τους Gallaway, Olsen και Mitchell (2010) η φωτορύπανση λόγω της ιδιαιτερότητάς της μπορεί να διακριθεί και να εξεταστεί σε τοπικό, περιφερειακό και παγκόσμιο επίπεδο. Η εισβολή του διάχυτου φωτός από ένα φωτιστικό σώμα στον εσωτερικό χώρο αποτελεί ένα αμιγώς τοπικό φαινόμενο, ενώ αντίθετα το φαινόμενο της τεχνητής ουράνιας λάμψης πάνω από αστικά και περιαστικά περιβάλλοντα μπορεί να εξεταστεί σε περιφερειακό επίπεδο καθώς μπορεί να γίνει αντιληπτή από εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά. Αυτή η ποιοτική διάκριση της φαινομενικής διάστασης του φαινομένου της φωτορύπανσης έχει αποτελέσει τη βάση για την εγκαθίδρυση ορισμένων στοχευμένων μέτρων περιορισμού.

1.5.1 Προτεινόμενα μέτρα

1.5.1.2 Έλεγχος τεχνητού φωτισμού

Σκοπός κάθε εγκατάστασης φωτισμού είναι η βελτίωση της οπτικής ικανότητας του ανθρώπου κατά τις νυχτερινές ώρες προσφέροντας την δυνατότητα για την ανάπτυξη διαφόρων δραστηριοτήτων. Κακού σχεδιασμού και χαμηλής ποιότητας κατασκευής φωτιστικά σώματα με βασικά χαρακτηριστικά την παντελή έλλειψη καλυματικής προστασίας (shielding), τη χρήση ακατάλληλων τύπων λαμπτήρα, τη λανθασμένη γεωμετρία τοποθέτησης στους στυλοβάτες, την χρήση υπερβολικής ποσότητας φωτισμού από ότι απαιτείται κ.α., προκαλούν διάχυση του φωτός σε μη επιθυμητές περιοχές συμβάλλοντας στο φαινόμενο της φωτορύπανσης.

Τεχνικές επιτροπές όπως η CIE, ILE και η IES έχουν εκδώσει συνιστώμενες πρακτικές και σχεδιαστικούς οδηγούς προτείνοντας ορισμένες ρεαλιστικές προτάσεις για τον περιορισμό του οχληρού φωτός από τις τεχνητές πηγές. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι:

- ❖ Χρήση της απαραίτητης ποσότητας φωτισμού που απαιτείται για μια δραστηριότητα
- ❖ Χρήση φωτιστικών σωμάτων με ελεγχόμενη φωτεινή ροή για την αποφυγή υπερφωτισμού
- ❖ Χρήση ειδικά σχεδιασμένου φωτιστικού εξοπλισμού, όπως φωτιστικά πλήρους θωράκισης (full cut off's) για την αποφυγή άμεσης εκπομπής φωτός άνωθεν του οριζόντιου επιπέδου
- ❖ Χρήση σύγχρονων συστημάτων ελέγχου φωτισμού για μείωση της σπατάλης και εξοικονόμησης ενέργειας
- ❖ Χρήση μονοχρωματικών πηγών φωτός
- ❖ Αποδοτικότερη διανομή του φωτός και περιορισμός της φωτιζόμενης περιοχής

Η αντικατάσταση των υπαρχόντων φωτιστικών σωμάτων με φωτιστικά πλήρους θωράκισης μπορεί να μειώσει τα επίπεδα της τεχνητής ουράνιας φωτεινότητας έως και στο ένα τέταρτο των τωρινών επιπέδων (Falchi, 2011). Ωστόσο, ακόμα και ύστερα από τη λήψη περιοριστικών μέτρων για την μείωση του διάχυτου φωτός από ένα φωτιστικό σώμα, κάποια υπολειμματική ποσότητα ανεπιθύμητου φωτισμού παραμένει, εξαιτίας της ανάκλασης του φωτός, η οποία δεν πρέπει να αμελείται. Ως εκ τούτου, καθίσταται επιτακτική η σχολαστική μελέτη και επιλογή των τεχνικών και φασματικών

χαρακτηριστικών των επιλεγθέντων εγκαταστάσεων φωτισμού, διασφαλίζοντας τόσο την απαραίτητη φωτιστική απόδοση για την κάλυψη των επιθυμητών αναγκών όσο και την περιορισμένη επενέργεια στο φυσικό περιβάλλον.

1.5.1.3 Νομοθετικές διατάξεις

Η κατάθεση διορθωτικών προτάσεων για τον περιορισμό της φωτορύπανσης είναι σχετικά μια εύκολη υπόθεση, η εφαρμογή τους ωστόσο αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία (Narisada και Schreuder, 2004:21). Για την διασφάλιση της ορθής εφαρμογής οποιωνδήποτε προτεινόμενων μέτρων περιορισμού θα πρέπει να διέπονται από το κατάλληλο θεσμικό πλαίσιο. Είναι γεγονός ότι μέχρι και σήμερα πολλές διοικητικές αρχές παγκοσμίως δεν εκλαμβάνουν την παρουσία του οχληρού φωτός ως ένα δυνητικό περιβαλλοντικό ρυπαντή (Mizon, 2002:47) στις εκάστοτε περιβαλλοντικές νομοθετικές διατάξεις που αφορούν την διασφάλιση της ποιότητας ζωής των πολιτών, και την διασφάλιση της περιβαλλοντικής ποιότητας γενικότερα. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη περιβαλλοντικής ανησυχίας και ευαισθησίας για τους ελλοχεύοντες κινδύνους που επιφέρει η φωτορύπανση, η οποία πηγάζει από την έλλειψη ενημέρωσης και γνώσης των καθ αυτών αρμόδιων αρχών.

Την τελευταία δεκαετία οι δράσεις και το επιστημονικό έργο τόσο της αστρονομικής κοινότητας όσο και άλλων φορέων, έχουν μεταβάλλει άρδην την προ υπάρχουσα κατάσταση. Η μείωση του κόστους του ενεργοβόρου εξωτερικού φωτισμού και η εξοικονόμηση ενέργειας έχει αποτελέσει την βάση για την κινητοποίηση των αρμόδιων φορέων οι οποίοι πλέον συνειδητοποιούν τα οικονομικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν. Παρ'όλα αυτά νομοθετικές διατάξεις που στοχεύουν αποκλειστικά στον περιορισμό του φαινομένου της φωτορύπανσης είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο και αποτελούν μεμονωμένες προσπάθειες ορισμένων κρατών στην Ευρώπη, όπως η Ιταλία, Σλοβενία, Τσεχία, Αυστρία, Ηνωμένο Βασίλειο, Γαλλία και Ισπανία. Αντιθέτως, στις ΗΠΑ πολλές κοινότητες έχουν αναπτύξει συλλογικά προγράμματα φωτισμού, με το πιο δημοφιλές, την θέσπιση περιβαλλοντικών ζωνών φωτισμού.

1.5.1.4 Περιβαλλοντικές ζώνες φωτισμού

Οι περιβαλλοντικές ζώνες φωτισμού είναι μια καθιερωμένη πρακτική σε επίπεδο κοινοτικού σχεδιασμού. Αναπτύχθηκαν από την CIE (1997) και υλοποιήθηκαν αρχικά σε ορισμένες κοινότητες των ΗΠΑ. Ο πρωτότυπος σχεδιασμός αφορούσε την εγκαθίδρυση τεσσάρων περιβαλλοντικών ζωνών φωτισμού (E1-E4), ωστόσο πρόσφατα η IDA σε συνεργασία με την IES ανέπτυξαν ένα θεσμικό μοντέλο φωτισμού (Model lighting Ordinance, MLO) το οποίο αποτελεί μια εκσυγχρονισμένη εκδοχή του αρχικού προγράμματος ώστε να ανταποκρίνεται στις τωρινές και μελλοντικές ανάγκες, το οποίο αποτελείται συνολικά από πέντε ζώνες φωτισμού (LZ0-LZ4).

Βασικός στόχος είναι ο περιορισμός της φωτορύπανσης και των δυσμενών επιπτώσεων που επιφέρει. Η βασική ιδέα αυτού του θεσμικού μοντέλου, είναι ότι επιτρέπει στην εκάστοτε κοινότητα να προσδιορίσει και να επιλέξει τις κατάλληλες προσδοκώμενες και επιθυμητές ποσότητες φωτισμού για την κάλυψη των αναγκών των υφιστάμενων χρήσεων γης που εντοπίζονται εντός των διοικητικών της ορίων. Σε ιδιάζουσες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση μικτών χρήσεων γης, ένα πιο λεπτομερές σύστημα ζωνοποίησης μπορεί να εφαρμοστεί διασπώντας μια ή περισσότερες ζώνες σε υποκατηγορίες. Η βασική εκδοχή ζωνοποίησης του θεσμικού μοντέλου φωτισμού παρουσιάζεται στον πίνακα 2.

Ζώνη	Περιβαλλοντικός φωτισμός	Επιτρεπτά όρια φωτεινής ροής (lumen)	Προτεινόμενες περιοχές
LZ0	Αμελητέος	0	Περιοχές ύψιστης σημασίας όπως εθνικά πάρκα, αστρονομικά παρατηρητήρια
LZ1	Χαμηλός	3.500	Αγροτικές και χαμηλής πυκνότητας κατοικημένες περιοχές
LZ2	Μέτριος	7.000	Αστικές πυκνοκατοικημένες περιοχές χαμηλής εμπορικής δραστηριότητας
LZ3	Μέτριος προς υψηλός	14.000	Εμπορικές και βιομηχανικές περιοχές
LZ4	Υψηλός	21.000	Υψηλής έντασης εμπορικές και βιομηχανικές περιοχές

Πίνακας 2. Περιγραφή του θεσμικού μοντέλου φωτισμού. **Πηγή:** IES και IDA, 2011.

1.5.2 Χαρτογράφηση και μοντελοποίηση της φωτορύπανσης

Η συνεχής ανάπτυξη των παραπάνω ιδεών και τάσεων καθώς και η πορεία προς μια νέα εποχή στην οικονομία της πληροφορίας θα αποσυνδέσει μια πληθώρα βιομηχανικών και άλλων δραστηριοτήτων από την χρήση ορυκτών φυσικών πόρων και κατά συνέπεια στην μείωση της ανάγκης για τεχνητό φωτισμό. Καθώς αναπτύσσονται αυτές οι τάσεις γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική η ανεύρεση εργαλείων για την ανίχνευση και αξιολόγηση των μεταβολών της φωτορύπανσης σε παγκόσμιο επίπεδο, η αναγνώριση των ευάλωτων και επιβαρυνμένων περιοχών για την λήψη στοχευμένων μέτρων (Cinzano et al., 2001). Η χαρτογραφική μοντελοποίηση και η διαχρονική παρακολούθηση των επιπέδων του νυχτερινού φωτισμού πάνω από μεγάλα αστικά κέντρα με τη βοήθεια σύγχρονων τεχνικών και μεθόδων Τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ, GIS) αποτελεί ένα ιδανικό εργαλείο για την μελέτη των ανωτέρω, συμβάλλοντας στην καλύτερη λήψη αποφάσεων και στοχευμένων δράσεων. Στο 2^ο Κεφάλαιο οι μέθοδοι χαρτογράφησης και μοντελοποίησης του φαινομένου της φωτορύπανσης περιγράφονται αναλυτικά.

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΝΥΧΤΕΡΙΝΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

1.6 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα επιχειρείται μια συγκεντρωτική περιγραφή και παρουσίαση των τηλεσκοπικών συστημάτων καταγραφής των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού, την ανάδειξη της σπουδαιότητας και της ιδιοτυπίας αυτής της κατηγορίας δεδομένων, των δυνατοτήτων και των περιορισμών τους, και τέλος γίνεται αναφορά για τις τάσεις στον τομέα της δορυφορικής τεχνολογίας του νυχτερινού φωτισμού.

1.6.1 Δορυφορικά συστήματα καταγραφής του νυχτερινού φωτισμού

1.6.1.1 Δορυφορικό πρόγραμμα DMSP

1.6.1.1.1 Γενικά

Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 ο Εθνικός Οργανισμός Αναγνώρισης (National Reconnaissance Office, NRO), μια από τις πλέον μυστικές Αμερικανικές υπηρεσίες, ξεκίνησε ένα πρόγραμμα δορυφορικής αποστολής με βασικό σκοπό την καταγραφή και παροχή μετεωρολογικών δεδομένων σε καθημερινή βάση, που αφορούσαν κυρίως την νεφοκάλυψη σε παγκόσμιο επίπεδο, και αξιοποίησή τους στην στρατηγική και τακτική πρόγνωση του καιρού για την έγκαιρη ενημέρωση των στρατιωτικών υπηρεσιών ενισχύοντας τις στρατιωτικές θαλάσσιες, εναέριες και επί ξηράς επιχειρήσεις του Αμερικανικού στρατού (Spangler, 2008).

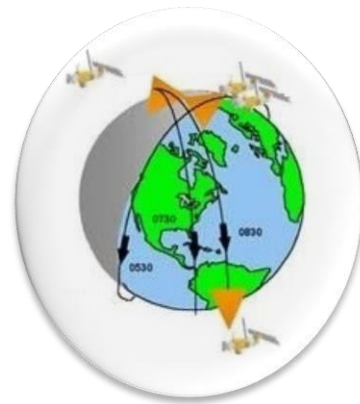
Το πρόγραμμα αυτό εξαιτίας της απόρρητης φύσης του (Hall, 2001) έλαβε διάφορες κωδικές ονομασίες όπως DSAP (Defense System Applications Program), DAPP (Defense Acquisition and Processing Program), και αρχικά περιελάμβανε την ανάπτυξη πειραματικών, μετεωρολογικών δορυφορικών συστημάτων χαμηλής πολιτικής τροχιάς. Η πρώτη σειρά (Block 1) δορυφόρων τέθηκε σε τροχιά με τους δορυφόρους DSAP-1 F2 έως 11, με πρώτη εκτόξευση το 1962 (Εικόνα 6), και ουσιαστικά αποτέλεσαν τους πρώτους επιχειρησιακούς μετεωρολογικούς δορυφόρους πολιτικής τροχιάς.

Το 1972, έγινε άρση της μυστικότητας, το πρόγραμμα αναγνωρίστηκε επίσημα και τέθηκε υπό την αιγίδα της Αμερικανικής Πολεμικής Αεροπορίας (USAF) και έλαβε τη σημερινή του κωδική ονομασία, Αμυντικό Μετεωρολογικό Δορυφορικό Πρόγραμμα (Defense Meteorological Satellite Program, DMSP) ενώ τα συλλεχθέντα δεδομένα έγιναν διαθέσιμα για την επιστημονική κοινότητα. Σήμερα, το πρόγραμμα λειτουργεί υπό την κοινή επίβλεψη της USAF και της NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) και αποτελεί το πλέον μακροχρόνιο πρόγραμμα δορυφορικών αποστολών με περισσότερα από πενήντα έτη επιχειρησιακής λειτουργίας.



Εικόνα 6. Εκτόξευση του πρώτου δορυφόρου DMSP το 1962. **Πηγή:** Hall, 2001

Βασικός σκοπός του προγράμματος παραμένει η παρακολούθηση και καταγραφή εξειδικευμένων μετεωρολογικών, ωκεανογραφικών και γεωφυσικών παραμέτρων με έμφαση στη μελέτη της παγκόσμιας νεφοκάλυψης. Ο στόλος των δορυφορικών συστημάτων του DMSP έχει επανειλημμένως αναβαθμιστεί και σήμερα βρίσκονται σε επιχειρησιακή λειτουργία οι πλέον σύγχρονοι δορυφόροι της τελευταίας σειράς Block 5D-3 (Εικόνα 7). Επί του παρόντος, ο επιχειρησιακός αστερισμός (Σχήμα 1.3) του DMSP αποτελείται από δύο κύριους δορυφόρους (Block 5D-3/F17 και F18) ενώ δευτερευόντως λειτουργούν υποστηρικτικά τέσσερις επιπλέον δορυφόροι (Block 5D-3/F16 και Block 5D-2/F13 έως 15) (Elvidge et al., 1999).



Σχήμα 1.3 Αστερισμός των δορυφόρων DMSP. **Πηγή:** Aerospaceweather.com



Εικόνα 7. Ο δορυφόρος DMSP της σειράς Block 5D.

Οι δορυφόροι DMSP εκτελούν ηλιοσύγχρονη, σχεδόν πολική τροχιά με απόκλιση 98.7° σε ύψος περίπου 830 χιλιομέτρων, με χρόνο πλήρης περιστροφής της γης 101 λεπτά, δηλαδή εκτελούν 14 περιστροφές στο χρονικό διάστημα ενός 24ώρου. Ο αστερισμός των δορυφόρων παρέχει παγκόσμια κάλυψη σε τέσσερις περιόδους της ημέρας, την αυγή, την μεσημβρία, το λυκόφως, και το βράδυ, με νυχτερινή τροχιά ανόδου στις 20:30 έως 21:30 μ.μ. τοπική ώρα με κύκλο επαναληψιμότητας 23.5 ημέρες (Elvidge et al., 1999).

Ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε την παύση της επιχειρησιακής λειτουργίας των δορυφορικών συστημάτων το 2015, ωστόσο πρόσφατα ανακοινώθηκε η διατήρηση και επέκταση της λειτουργίας του προγράμματος. Στις 3/04/2014 μάλιστα, εκτοξεύθηκε ο δορυφόρος DMSP Block 5D-3/F19 ο οποίος θα αντικαταστήσει τον δορυφόρο DMSP F17, ενώ ο τελευταίος δορυφόρος DMSP (BLOCK BD-3/F20) αναμένεται να τεθεί σε τροχιά το 2020.

1.6.1.1.2 Όργανα καταγραφής

Οι σύγχρονοι δορυφόροι DMSP μεταφέρουν μια σειρά από 7 διαφορετικά καταγραφικά συστήματα για τη συλλογή εξειδικευμένων μετεωρολογικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Operational Linescan System - OLS

Ο αισθητήρας OLS ενσωματώθηκε και τέθηκε σε λειτουργία στην πρώτη σειρά (Block 5d-1) της νέας γενεάς δορυφόρων το 1976, και έκτοτε αποτελεί το κύριο όργανο καταγραφής των σύγχρονων δορυφόρων DMSP. Αποτελεί έναν περιοδικό ραδιομετρικό σαρωτή με εγκάρσια στην τροχιά του δορυφόρου διεύθυνση (cross-track scanner) με μεγάλο εύρος σάρωσης (3000 km) προσφέροντας πλήρη παγκόσμια ημερήσια και νυχτερινή κάλυψη σε περίοδο 24ωρών. Διαθέτει δύο ευρεία φασματικά κανάλια (δίαυλοι) για την καταγραφή της νεφοκάλυψης και της θερμοκρασίας των νεφών σε τρεις φασματικές ζώνες:

- Το πρώτο φασματικό κανάλι είναι φωτοευαίσθητο στο τμήμα του ορατού και εγγύς υπέρυθρου φάσματος (Visible and Near-Infrared, VNIR) στα μήκη κύματος 0.4 - 1.1μm της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Διαθέτει δυναμικό εύρος 6bit (σύστημα κβαντισμού κωδικοποίησης των δεδομένων) το οποίο προσδίδει ραδιομετρική ανάλυση με τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων 0 – 63.
- Το δεύτερο φασματικό κανάλι (Thermal Infrared, TIR) καταγράφει ακτινοβολία στην φασματική περιοχή του θερμικού υπέρυθρου (10.2 – 12.6μm). Διαθέτει 8bit σύστημα κβαντισμού, το οποίο αποδίδει 256 διαφορετικές ψηφιακές τιμές για κάθε ψηφίδα, οι οποίες μέσω κατάλληλης ραδιομετρικής βαθμονόμησης μετατρέπονται σε τιμές θερμοκρασίας εύρους -83°C – 36.8°C.

Ο OLS παρέχει επιχειρησιακά δεδομένα χωρικής διακριτικής ικανότητας 2.7km, και ονομαστικής διάστασης στιγμιαίου οπτικού πεδίου εδάφους (GIFOV) στο ναδίρ 5km x 5km.

Η καταγραφή της νεφοκάλυψης και της θερμοβαθμίδας των νεφών κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός φωτοπολλαπλασιαστή (Photo multiplier tube, PMT) στο φασματικό κανάλι VNIR, ο οποίος επιτρέπει την ανίχνευση

αμυδρών εκπομπών φωτός στην ατμόσφαιρα (ακτινοβολία της τάξης των 10^{-9} watts/cm²/sr), όπως νέφη φωτιζόμενα υπό το σεληνόφως (Elvidge et al., 1997). Ο OLS μέσω του PMT, καταγράφει φασματικές πληροφορίες στη περιοχή του ορατού και εγγύς υπέρυθρου (0.47 – 0.95μm) με χωρική διακριτική ικανότητα στο ναδίρ 2.7km. Αυτή η φασματική ζώνη καλύπτει τις φασματικές αποκρίσεις των πλέον διαδεδομένων λαμπτήρων εξωτερικού φωτισμού, όπως λαμπτήρες ατμών υδραργύρου (0.54 – 0.57μm), νατρίου υψηλής και χαμηλής πίεσης (0.54 – 0.63μm και 0.58μm αντίστοιχα).

Η ακραία αυτή ευαισθησία του OLS σε αμυδρές πηγές φωτισμού αποτέλεσε την αιτία για την ανακάλυψη ενός απρόβλεπτου γεγονότος: επίγειες φυσικές (ηφαιστειακή λάβα, πυρκαγιές, ηλεκτρικές εκκενώσεις κ.α.) και τεχνητές (δομημένο αστικό και βιομηχανικό περιβάλλον, αυτοκινητόδρομοι, αναφλέξεις φυσικού αερίου, αλιευτικά σκάφη κ.α.) πηγές φωτός μπορούν επίσης να ανιχνευθούν σε περιόδους απουσίας νεφοκάλυψης (Croft, 1978; Elvidge et al., 1997, Doll, 2008) προσφέροντας μια νέα διάσταση στην παρατήρηση της γης από το διάστημα με την χρήση δορυφορικών συστημάτων και στην μελέτη της ανθρώπινης παρουσίας και των πιέσεων που ασκεί στο φυσικό περιβάλλον. Στην εικόνα 3.2 απεικονίζεται μια σκηνή λήψης του νυχτερινού φωτισμού με το όργανο καταγραφής OLS.



Εικόνα 8 . Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στην ευρύτερη περιοχή μελέτης το έτος 2009. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

Παρότι η παρούσα εργασία εστιάζει στην αξιοποίηση δεδομένων που συλλέχθηκαν από το όργανο καταγραφής OLS, κρίθηκε σκόπιμη η συνοπτική περιγραφή και των υπόλοιπων έξι οργάνων που φέρουν οι δορυφορικές πλατφόρμες του DMSP.

Special Sensor Microwave Imager/Sounder - SSMIS

Ο αισθητήρας SSMIS, ένα παθητικό ραδιόμετρο μικροκυμάτων, είναι το δεύτερο σημαντικότερο όργανο πέραν του OLS που φέρουν οι δορυφόροι DMSP της σειράς Block 5D-3. Αποτελεί την εκσυγχρονισμένη εκδοχή και συνδυάζει τις δυνατότητες των SSM/I, SSM/T-1 και SSM/T-2 εκτελώντας μετρήσεις της μικροκυματικής ενέργειας σε 24 διαφορετικές συχνότητες καναλιών (19 – 183 GHz) με εύρος σάρωσης 1700km. Τα συλλεχθέντα δεδομένα αξιοποιούνται για την εκτίμηση ατμοσφαιρικών, χερσαίων και ωκεάνιων παραμέτρων όπως ατμοσφαιρική θερμοκρασία και υγρασία, την ταχύτητα των ανέμων στην επιφάνεια των ωκεανών κ.λπ.

Special Sensor Ultraviolet Limb Imager – SSULI

Αποτελεί έναν οπτικό φασματογράφο και καταγράφει την κατακόρυφη κατανομή της ακραίας υπεριώδους ακτινοβολίας που διέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης. Οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται για την κατασκευή υψηλής χωρικής και φασματικής ανάλυσης κάθετων προφίλ καθ' ύψος της ατμόσφαιρας.

Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager - SSUSI

Ο αισθητήρας SSUSI σχεδιάστηκε για την παρατήρηση ουράνιων φαινομένων όπως η ατμοσφαιρική φωταύγεια και το σέλας (aurora) στο ύψος της ατμόσφαιρας και ιονόσφαιρας της γης, στην ορατή και υπέρυθρη φασματική ζώνη παρέχοντας χρήσιμες μετρήσεις για την παρακολούθηση και πρόγνωση του διαστημικού καιρού. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο σαρωτών:

- SIS (Scanning Imaging Spectrometer) ο οποίος αποτελεί έναν οπτικό-μηχανικό σαρωτή με εγκάρσια στην τροχιά διεύθυνση και καταγράφει πληροφορίες σε πέντε φασματικές περιοχές (115 – 180 nm)
- NPS (Nadir-looking Photometer System) ο οποίος αποτελείται από τρία φωτόμετρα κατακόρυφης κατόπτρευσης (στο ναδίρ) τα οποία λειτουργούν κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών καταγράφοντας πληροφορίες στη φασματική ζώνη του ορατού.

Precipitating Electron and Ion Spectrometer - SSJ/5

Αποτελεί την εξελιγμένη έκδοχή των SSJ/3, 4 και τέθηκε σε λειτουργία το 2003 με την πτήση του DMSP Block 5D-3/F16. Σχεδιάστηκε για να εκτελεί μετρήσεις της μεταφοράς ενέργειας, μάζας και ορμής φορτισμένων σωματιδίων στην μαγνητόσφαιρα και ιονόσφαιρα στο μαγνητικό πεδίο της γης.

Special Sensor Ionospheric Plasma Drift/Scintillation Monitor - SSI/ES

Ο αισθητήρας SSI/ES αποτελείται από τέσσερις ηλεκτροστατικούς αναλυτές και σχεδιάστηκε για να εκτελεί μετρήσεις στο ύψος τροχιάς των δορυφόρων DMSP, της πυκνότητας των ηλεκτρονίων και θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, την πυκνότητα ιόντων του περιβάλλοντος, τη θερμοκρασία ιόντων και το μοριακό βάρος.

Special Sensor Magnetometer – SSM

Ο αισθητήρας SSM τέθηκε σε λειτουργία το 1994 με την πτήση του δορυφόρου DMSP Block 5D-2/F12. Αποτελεί ένα τριαξονικό, πύλης ροής (flux gate) μαγνητόμετρο καταγραφής των γεωμαγνητικών διακυμάνσεων που οφείλονται στην επίδραση ηλιακών γεωφυσικών φαινομένων όπως τα ιονοσφαιρικά ρεύματα που ρέουν σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Σε συνδυασμό με τις μετρήσεις των αισθητήρων SSI/ES και SSJ/5 παρέχουν προφίλ της θερμότητας και πυκνότητας των ηλεκτρονίων της ιονόσφαιρας σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Στη τελευταία σειρά Block 5D-3 οι δορυφόροι φέρουν το όργανο SSM-Boom το οποίο αποτελεί την εξελιγμένη έκδοση του SSM.

1.6.1.1.3 Δεδομένα DMSP

Η άρση απορρήτου της μυστικότητας του δορυφορικού προγράμματος DMSP το 1972, σήμανε την απαρχή για την δημοσιοποίηση και διάθεση των συλλεχθέντων δεδομένων στην επιστημονική κοινότητα και στο ευρύ κοινό. Έως το 1992, για την αποθήκευση και κωδικοποίηση των δεδομένων χρησιμοποιούνταν τα τότε μαγνητικά μέσα αποθήκευσης, όπως μαγνητικές ταινίες και φιλμ, των οποίων η δομή δεν ήταν φιλική ως προς την ανάπτυξη τεχνικών επεξεργασίας και ανάλυσης τους. Παρά τον περιορισμό αυτό, η δυνητική χρήση των δεδομένων νυχτερινού φωτισμού ως ένας δείκτης της ανθρώπινης παρουσίας και δραστηριότητας στη γη, σηματοδοτήθηκε ήδη

το 1978 από τον Croft και Welch (1981) οι οποίοι αξιοποίησαν δεδομένα νυχτερινού φωτισμού του οργάνου καταγραφής OLS για την ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ των εκπομπών φωτισμού και της ενεργειακής κατανάλωσης σε επιλεγμένες περιοχές των ΗΠΑ. Ακολούθησε, ο Sullivan (1989, 1991) ο οποίος δημιούργησε την πρώτη παγκόσμια σύνθετη εικόνα νυχτερινού φωτισμού με χωρική ανάλυση 10 λεπτά του τόξου αξιοποιώντας δεδομένα της χρονικής περιόδου 1974 – 84.

Το 1992, η NGDC (National Geophysical Data Center) της NOAA, δημιούργησε μια παγκόσμια ψηφιακή βάση δεδομένων (Ψ.Β.Δ.) νυχτερινού φωτισμού τα οποία έχουν υποστεί την απαραίτητη προεπεξεργασία (ραδιομετρική, γεωμετρική κ.α.) με σκοπό την άμεση πρόσβαση και αξιοποίηση τους από το ευρύ κοινό (Elvidge & Erwin, 2009). Έκτοτε, μια σειρά διαφορετικού τύπου προϊόντων έχει γίνει διαθέσιμη από την NGDC. Τα δεδομένα που λαμβάνει ο OLS αναλόγως τη λειτουργία κέρδους (gain) του σήματος καταγράφονται σε δύο τύπους (format) ψηφιακών εικόνων:

- Δεδομένα πλήρης ανάλυσης (fine data) με ονομαστική χωρική ανάλυση 0.56 km τα οποία αφορούν επιλεγμένες γεωγραφικές περιοχές
- Δεδομένα χαμηλής ανάλυσης (smooth data) τα οποία προκύπτουν από την βαθμονόμηση επί του σκάφους (on board) των fine data εφαρμόζοντας ένα κεντρικό φίλτρο μέσης τιμής σε κάθε γειτονιά 5 x 5 κελιών, αποδίδοντας ψηφιακές εικόνες χωρικής ανάλυσης 2.7km παγκόσμιας κάλυψης. Η πλειονότητα των δεδομένων της ψηφιακής βάσης της NGDC αποτελούνται από αυτού του είδους τη κατηγορία δεδομένων

Επί του παρόντος, στη Ψ.Β.Δ παρέχονται τέσσερις διαφορετικοί τύποι ψηφιακών δορυφορικών εικόνων χωρίς παρουσία νεφοκάλυψης που προέρχονται από τα δεδομένα χαμηλής ανάλυσης του DMSP-OLS:

- ❖ Σταθερά φώτα (Stable lights)
- ❖ Ραδιομετρικά βαθμονομημένα (Radiance Calibrated)
- ❖ Μέσης ψηφιακής τιμής (Average Lights).
- ❖ Μέσης ψηφιακής τιμής X Percentage (Average Lights X Pct)

Στη παρούσα εργασία γίνεται χρήση των δεδομένων της πρώτης κατηγορίας συνεπώς μια συνοπτική αναφορά αυτού του τύπου δεδομένων κρίνεται σκόπιμη.

Σταθερά φώτα (Stable lights)

Κατά τη διάρκεια συγγραφής της εργασίας, η πλέον πρόσφατη διαθέσιμη έκδοχή των δεδομένων *Stable lights* αποτελεί η τέταρτη κατά σειρά έκδοση (Version 4) που διατίθεται από την NGDC. Τα δεδομένα αυτά ουσιαστικά αποτελούν σύνθετες παράγωγες εικόνες με απουσία νεφοκάλυψης οι οποίες αντιπροσωπεύουν τα μέσα ετήσια επίπεδα φωτεινότητας των επίγειων εκπομπών φωτισμού. Παρέχουν σχεδόν παγκόσμια κάλυψη (πλήρες γεωγραφικό μήκος -180° έως 180° , και γεωγραφικό πλάτος -65° έως 75°), χωρικής ανάλυσης 30 arc second ($\sim 1 \times 1$ km στον ισημερινό) η οποία προκύπτει από την αναδόμηση των πρωτογενών δορυφορικών εικόνων χωρικής διακριτικής ικανότητας 0.56km, με ραδιομετρική διακριτική ικανότητα 6bit αποδίδοντας εύρος ψηφιακών τιμών 0-63 και επιπλέον έχουν υποστεί την απαραίτητη προεπεξεργασία με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων για την εξάλειψη πηγών θορύβου όπως το σεληνόφως, αντανάκλαση από το φως του ήλιου, ηλεκτρικές εκκενώσεις κ.α., οι οποίες μειώνουν την αντίθεση φωτεινότητας των επίγειων τεχνητών πηγών φωτισμού (Elvidge et al., 1997a, 1999, 2001, 2005, Baugh et al., 2010).

Η σπουδαιότητα αυτού του τύπου δεδομένων έγκειται επιπλέον στη δυνατότητα που προσφέρουν για αναγνώριση, παρακολούθηση και ανάλυση της διαχρονικής εξέλιξης του φωτισμού που εκπέμπεται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες συμβάλλοντας στην εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων σχετικά με την αστική ανάπτυξη και τις πιέσεις που ασκούνται στο φυσικό περιβάλλον. Η χρονική σύνθεση (temporal compositing), η διαχρονική παρακολούθηση (change detection) των δορυφορικών δεδομένων με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων αποτελούν δόκιμες μεθοδολογίες ανάλυσης οι οποίες παρουσιάζονται και αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

1.6.1.1.4 Εφαρμογές δεδομένων DMSP – OLS

Τα δεδομένα νυχτερινού φωτισμού των δορυφόρων DMSP-OLS αποτελούν από τα πιο ευρέως αναγνωρισμένα δορυφορικά προϊόντα και έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε μια πληθώρα εφαρμογών που εμπίπτουν σε ποικίλα επιστημονικά και ερευνητικά πεδία όπως της αστρονομίας, οικονομικής και κοινωνικής επιστήμης, του φυσικού περιβάλλοντος κ.α. Στη συνέχεια παρουσιάζονται επιγραμματικά μια σειρά από τις κυριότερες επιστημονικές εφαρμοσμένες μελέτες ενώ μια λεπτομερέστερη ανασκόπηση ορισμένων από αυτών παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

Μέχρι σήμερα, οι κυριότερες εφαρμογές του συνόλου των δεδομένων DMSP-OLS αφορούν:

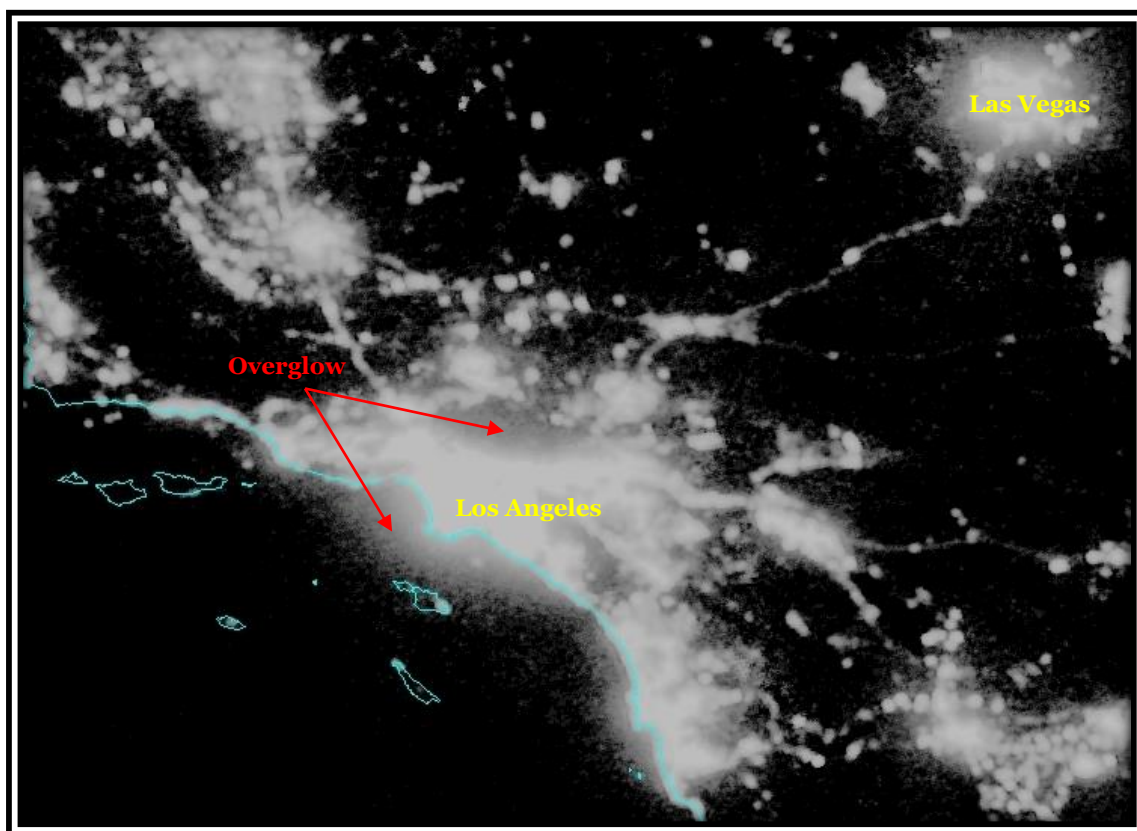
- ❖ Ποσοτικοποίηση, μοντελοποίηση και χαρτογράφηση του φαινομένου της φωτορύπανσης (Cinzano et al. 2000, 2001a, 2001b, Cinzano & Elvidge, 2004, Cinzano & Falchi, 2012, 2013, Tang et al., 2003, Chalkias et al., 2006, Tavoosi et al., 2009, Butt, 2012)
- ❖ Μοντελοποίηση και χαρτογράφηση του φαινομένου της αστικοποίησης και της αστικής διάχυσης (Small, Elvidge και Baugh, 2013, Roychowdhury, Taubenböck & Jones, 2011, Townsend & Bruce, 2010)
- ❖ Χωρική μοντελοποίηση της πληθυσμιακής κατανομής (Welch 1980, Sullivan, 1989, Sutton et al., 1997, 2001, 2003, Elvidge et al., 1997a, 1997b, Amaral et al., 2006) της οικονομικής δραστηριότητας (Ebener et al., 2005, Sutton et al., 2007, Gallaway, Olsen & Mitchel, 2010, Mellander et al., 2013) και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (Isobe & Hamamura, 2000, Letu et al., 2010, 2012, Forbes, 2013, Wu et al., 2013)
- ❖ Χωρική μοντελοποίηση των ανθρωπογενών εκπομπών αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα (Elvidge et al., 1997, 2007, Doll, Muller & Elvidge, 2000, Toenges-Schuller et al., 2006, Meng & Huang, 2012)
- ❖ Διαχείριση φυσικών καταστροφών (Kohiyama et al., 2004, Koma, Akatsuka & Sawada, 2009, Laneve & Santilli, 2009)

1.6.1.1.5 Δυνατότητες και περιορισμοί των δεδομένων

Τα δεδομένα των δορυφόρων DMSP (όπως και κάθε τύπος δεδομένων ανεξαρτήτως δορυφορικού συστήματος) υπεισέρχονται σε μια σειρά από δυνατότητες και περιορισμούς που σχετίζονται κυρίως με τα χαρακτηριστικά της χωρικής, φασματικής και ραδιομετρικής διακριτικής ικανότητας του δορυφορικού αισθητήρα OLS. Ύστερα από μια πολυετή περίοδο αξιοποίησης των δεδομένων σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, η επιστημονική κοινότητα έχει εντοπίσει και καταγράψει ορισμένα από

αυτά τα χαρακτηριστικά τα οποία αναστέλλουν την εξαγωγή υψηλής επιστημονικής αξίας των παραγόμενων προϊόντων. Ο βασικότερος περιοριστικός παράγοντας των δεδομένων DMSP-OLS που συναντάται στο σύνολο σχεδόν των βιβλιογραφικών αναφορών, αποτελεί η χαμηλή χωρική διακριτική ικανότητα (2.7 km) με αποτέλεσμα η ποιότητα, και κατά συνέπεια η δυναμική διαχωριστική ικανότητα της φασματικής πληροφορίας των επιχειρησιακών δορυφορικών εικόνων να είναι περιορισμένη.

Η χαμηλή χωρική ανάλυση, και η μεγάλη επικάλυψη των εικονοστοιχείων σε συνδυασμό με την συσσώρευση γεωμετρικών σφαλμάτων κατά την σύνθεση (composite) των πολυχρονικών δορυφορικών εικόνων συμβάλλει στη παραμόρφωση και υπερμεγέθυνση της πραγματικής χωρικής έκτασης των επίγειων πηγών φωτισμού. Το φαινόμενο αυτό, αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως *overflow* (υπερβολική λάμψη σε ελεύθερη μετάφραση) ή *Blooming* και εντοπίζεται κυρίως σε περιοχές έντονων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που παράγουν εκπομπές φωτισμού υψηλής λαμπρότητας όπως είναι εγκαταστάσεις ανάφλεξης φυσικού αερίου (gas flares) ή



Εικόνα 9. Δορυφορική εικόνα του DMSP-OLS των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού στην ευρύτερη περιοχή του Los Angeles, California, 2003. Η εικόνα έχει υποστεί ενίσχυση της αντίθεσης για την ανάδειξη της υπερβολικής λάμψης (overflow) που εντοπίζεται περιμετρικά των μεγάλων αστικών κέντρων. **Πηγή:** Επεξεργασία από Elvidge et al., 2011.

μεγάλα αστικά και βιομηχανικά κέντρα (Imhoff et al., 1997, Small et al., 2005, Elvidge et al., 2007, Doll, et al., 2008) (Εικόνα 9).

Επιπλέον, το μεγάλο εύρος των περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που καταγράφει ο αισθητήρας OLS, το περιορισμένο σύστημα κβαντισμού καθώς και η έλλειψη συστηματικής ραδιομετρικής βαθμονόμησης των δεδομένων που συλλέγονται από διαφορετικά δορυφορικά συστήματα DMSP καθιστά αδύνατη την αξιοποίηση τους σε λεπτομερείς αναλύσεις όπως για παράδειγμα την ποσοτική ανάλυση των διαχρονικών μεταβολών της φωτεινότητας των επίγειων εκπομπών φωτισμού, την διάκριση των διαφόρων τύπων φωτισμού εντός του αστικού περιβάλλοντος.

Με βάση τα παραπάνω, τα δεδομένα των δορυφόρων DMSP-OLS παρουσιάζουν έντεκα σημαντικές ελλείψεις (Elvidge et al., 2007):

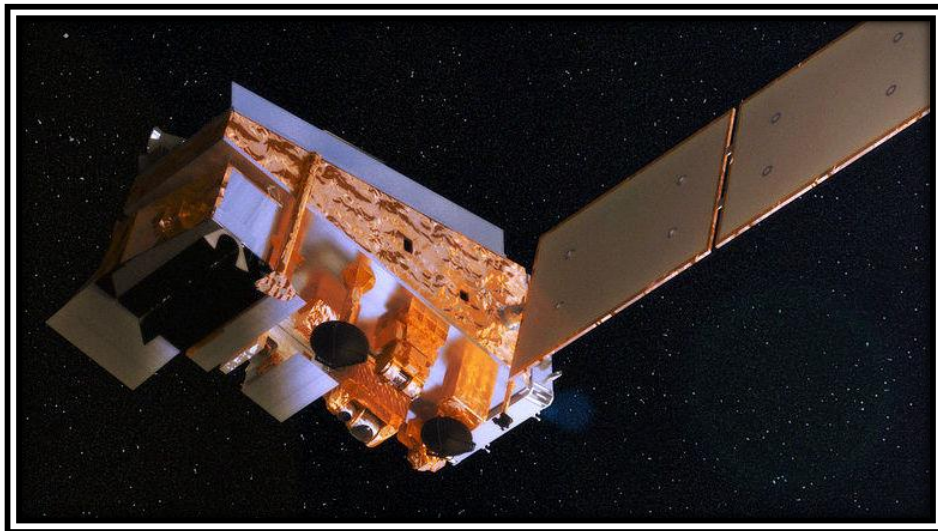
- ❖ Χαμηλή χωρική διακριτική ικανότητα
- ❖ Έλλειψη βαθμονόμησης επί του σκάφους (on-board)
- ❖ Έλλειψη συστηματικής καταγραφής των αλλαγών στα επίπεδα κέρδους (gain) του σήματος
- ❖ Περιορισμένο δυναμικό εύρος
- ❖ Κβαντικό σύστημα των 6bit
- ❖ Η υψηλή λειτουργία κέρδους συμβάλλει στον κορεσμό (saturation) του σήματος σε περιοχές έντονης λαμπρότητας (αστικά κέντρα κ.α.)
- ❖ Έλλειψη δίαυλου στην φασματική ζώνη του θερμικού υπέρυθρου για την ανίχνευση περιστατικών πυρκαγιάς
- ❖ Περιορισμένη καταγραφή και αποθήκευση δεδομένων
- ❖ Περιορισμένη λειτουργία απόκρισης σε σημειακές πηγές αντικειμένων (Point Spread Function, SPF)
- ❖ Έλλειψη ενός καλά ορισμένου στιγμιαίου οπτικού πεδίου (IFOV)
- ❖ Αδυναμία διάκρισης διαφόρων τύπων φωτισμού λόγω περιορισμένης φασματικής διακριτικής ικανότητας

Παρόλα αυτά, στην βιβλιογραφία αναφέρονται μια σειρά μεθοδολογικών τεχνικών για την αντιμετώπιση και εξάλειψη ορισμένων από τους προαναφερθέντες περιοριστικούς παράγοντες με χρήση κατάλληλων αλγορίθμων, οι οποίες αναλύονται στη ενότητα του μεθοδολογικού πλαισίου.

1.6.1.2 Δορυφορικό πρόγραμμα Suomi - NPP

1.6.1.2.1 Γενικά

Έως το 2011, τα δορυφορικά συστήματα DMSP αποτελούσαν την μοναδική δορυφορική αποστολή που παρείχε επιχειρησιακά δεδομένα των επίγειων εκπομπών του νυχτερινού φωτισμού. Μια νέα σειρά εξελιγμένων περιβαλλοντικών - μετεωρολογικών δορυφόρων στα πλαίσια του προγράμματος JPSS (Joint Polar Satellite System), πρώην NPOESS (National Polar Orbiting Environmental Satellite System), το οποίο σχεδιάστηκε το 2010 υπό την εποπτεία της NASA και της NOAA, αναμένεται να αντικαταστήσουν την παρούσα λειτουργία των δορυφορικών προγραμμάτων DMSP και POES (Polar-Orbiting Operational Environmental Satellites) τα επόμενα χρόνια. Η επιτυχημένη εκτόξευση του δορυφορικού συστήματος Suomi NPP (National Polar-Orbiting Partnership) στις 28/10/2011 αποτελεί το πρώτο βήμα για την λειτουργία μιας νέας γενιάς δορυφόρων με σκοπό την βελτιωμένη παρατήρηση και καταγραφή εξειδικευμένων περιβαλλοντικών και μετεωρολογικών παραμέτρων και την παροχή δεδομένων για την ανάλυση και μελέτη βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων φαινομένων.



Εικόνα 10. Ο δορυφόρος Suomi NPP. **Πηγή:** NASA

Ο δορυφόρος Suomi NPP (Εικόνα 10) τέθηκε σε επιχειρησιακή λειτουργία στις 28/11/2011. Όπως και οι δορυφόροι DMSP, εκτελεί ηλιοσύγχρονη, σχεδόν πολική τροχιά (κεκλιμένη κατά 8.7° σε σχέση με τον ισημερινό) σε ύψος 824km, με χρόνο πλήρης περιστροφής γύρω από τη γη 102 λεπτά, πραγματοποιώντας 14 περιστροφές και παρέχοντας παγκόσμια κάλυψη σε δύο χρονικές περιόδους (ημέρα και νύχτα) κατά

τη διάρκεια ενός 24ώρου, με κύκλο επαναληψιμότητας 16 ημερών ((Miller et al., 2013). Η ηλιοσύγχρονη τροχιά φέρει τον δορυφόρο σε κόμβο ανόδου και καθόδου στις 13:30 μ.μ. και 01:30 π.μ. τοπική ηλιακή ώρα αντίστοιχα.

1.6.1.2.2 Όργανα καταγραφής

Ο δορυφόρος Suomi NPP φέρει στην πλατφόρμα του πέντε διαφορετικά ανιχνευτικά όργανα (Εικόνα 11) για την καταγραφή μετεωρολογικών και περιβαλλοντικών μετρήσεων συνεισφέροντας στην ανάπτυξη βελτιωμένων προγνωστικών μοντέλων καιρού καθώς και στη μελέτη και κατανόηση φαινομένων όπως η κλιματική αλλαγή, το ενεργειακό ισοζύγιο κ.α.

Visible Infrared Imaging Radiometer Suite – VIIRS

Ο αισθητήρας VIIRS αποτελεί το κυριότερο όργανο καταγραφής του δορυφόρου Suomi NPP με βασικό σκοπό την καταγραφή ατμοσφαιρικών, ωκεανογραφικών και γεωφυσικών παραμέτρων με ιδιαίτερη έμφαση στην ανίχνευση των νεφικών συστημάτων. Θεωρείται ως η νέα γενεά αισθητήρων ο οποίος συνδυάζει και βελτιώνει τις δυνατότητες αισθητήρων προηγούμενης γενεάς όπως ο AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) των δορυφόρων NOAA, ο MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) των δορυφόρων της NASA, και του OLS των δορυφόρων DMSP.

Αποτελεί έναν πολυφασματικό οπτικό-μηχανικό ραδιομετρικό σαρωτή με εγκάρσια στην τροχιά του δορυφόρου διεύθυνση (cross-track scanner) και διαθέτει

ένα περιστρεφόμενο τηλεσκόπιο προσφέροντας μεγάλο εύρος σάρωσης καλύπτοντας μια ζώνη πλάτους 3000 km. Διαθέτει υψηλή φασματική διακριτική ικανότητα με 22 φασματικά κανάλια ανίχνευσης της ανακλώμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, εκ των οποίων εννέα καλύπτουν την φασματική ζώνη του ορατού και εγγύς υπέρυθρου (VNIR), οκτώ την περιοχή του βραχέως και μέσου υπέρυθρου (SWIR/MWIR) και τέσσερα την περιοχή του θερμικού υπέρυθρου (TIR) καλύπτοντας συνολικά φασματικό εύρος από 0.4μm – 12μm. Η χωρική διακριτική ικανότητα του αισθητήρα στο ίχνος του δορυφόρου (ναδίρ) αναλογικά με το φασματικό κανάλι κυμαίνεται από



Εικόνα 11. Οι αισθητήρες του δορυφόρου Suomi-NPP. Πηγή: NASA

0.4km – 1.6km. Η σάρωση κατά την διάρκεια των νυχτερινών ωρών επιτυγχάνεται με τη λειτουργία του αυτόνομου διαύλου DNB (Day/Night Band) ο οποίος καταγράφει πληροφορίες στην φασματική ζώνη VNIR (0.5 – 0.9μm) προσδίδοντας παγχρωματική λειτουργία καταγραφής, με διαχωριστική διακριτική ικανότητα 740 m.

Η υψηλή φωτοευαισθησία του διαύλου επιτρέπει την ανίχνευση εξαιρετικά χαμηλών επιπέδων φυσικών (πυρκαγιές, ηλεκτρικές εκκενώσεις κ.α.) και τεχνητών (αστικές και βιομηχανικές περιοχές, αναφλέξεις φυσικού αερίου, θαλάσσια μέσα μεταφοράς κ.α.) πηγών εκπομπών φωτισμού με δυναμικό εύρος περί των επτά τάξεων μεγέθους, από $3 \times 10^{-9} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ έως $0.02 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$. Η δυνατότητα αυτή επιτυγχάνεται με την λειτουργία τεσσάρων δισδιάστατων οπτικών ανιχνευτών (CCD) με δυνατότητα χρονικής ολοκλήρωσης (Time Delay Integration, TDI) σε συστοιχία με τρεις βαθμίδες κέρδους: χαμηλή, μέση και υψηλή (Liao et al., 2013, Miller et al., 2013). Στην εικόνα 12 απεικονίζεται μια σκηνή λήψης του νυχτερινού φωτισμού με το όργανο καταγραφής VIIRS-DNB.



Εικόνα 12. Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στην Ευρώπη. Είναι εμφανής η χωρική συγκέντρωση έντονων πηγών τεχνητού φωτισμού από τα πολυπληθή αστικά κέντρα στη Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη. Η εικόνα προέκυψε από τη σύνθεση πολυχρονικών δορυφορικών εικόνων του οργάνου καταγραφής VIIRS-DNB τους μήνες Απρίλιο και Οκτώβριο, 2012, με υπόβαθρο δορυφορικές εικόνες του προγράμματος Blue Marble. **Πηγή:** Earth Observatory, NASA.

Clouds and the Earth's Radiant Energy System - CERES

Ο αισθητήρας CERES που φέρει στην πλατφόρμα του ο δορυφόρος Suomi NPP αποτελεί ένα φασματικό ραδιόμετρο το οποίο καταγράφει μετρήσεις των ροών ακτινοβολίας και των νεφικών συστημάτων. Οι μετρήσεις αυτές είναι θεμελιώδους σημασία για την παρακολούθηση και μελέτη του ενεργειακού ισοζυγίου του συστήματος γης – ατμόσφαιρας, της κλιματικής αλλαγής καθώς και στην ανάπτυξη και βελτίωση παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων.

Cross-Track Infrared Sounder - CrIS

Το υπερφασματικό (hyperspectral) φασματόμετρο μετασχηματισμού Fourier, CrIS, διαθέτει 1305 φασματικά κανάλια με εύρος σάρωσης 2200km το οποίο σε συνέργεια με το πολυφασματικό ραδιόμετρο μικροκυμάτων ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder), αποτελούν ένα ενιαίο σύστημα (CrIMSS) προηγμένων ατμοσφαιρικών αισθητήρων και παρέχουν παγκόσμιας κάλυψης μετρήσεις για την εκτίμηση της κατακόρυφης κατανομής της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Οι μετρήσεις αυτές αποτελούν δεδομένα εισαγωγής τόσο σε βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα αριθμητικά και ατμοσφαιρικά μοντέλα πρόγνωσης του καιρού.

Ozone Mapping and Profiler Suite – OMPS

Το όργανο καταγραφής OMPS διαθέτει δύο αισθητήρες που αποτελούνται από τρία υπερφασματικά απεικονιστικά φασματόμετρα. Σχεδιάστηκε για την καταγραφή της παγκόσμιας κατανομής του στρατοσφαιρικού όζοντος, τόσο στην ανώτερη ατμόσφαιρα όσο και στην τροπόσφαιρα, παρέχοντας μετρήσεις για την παρακολούθηση και μελέτη του φαινομένου της *τρύπας του όζοντος*.

1.6.1.2.3 Συγκριτική αξιολόγηση DMSP-OLS & VIIRS-DNB

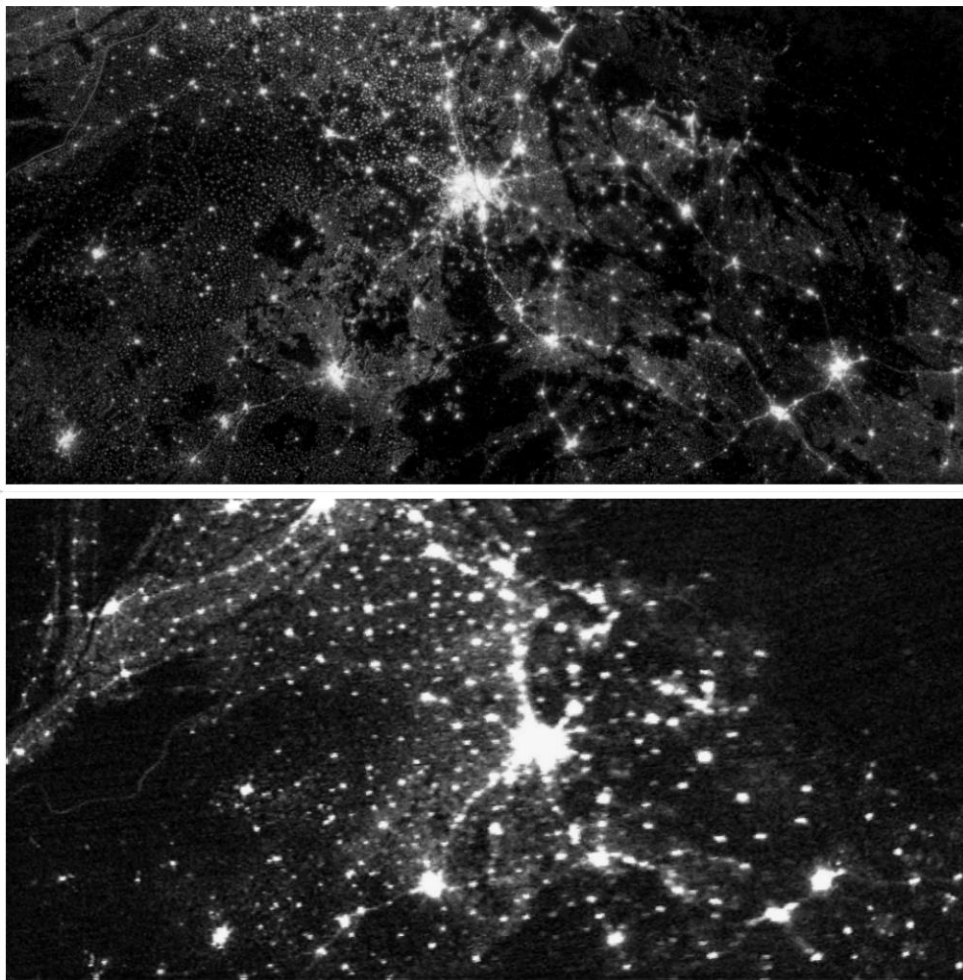
Στον Πίνακα 3 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων DMSP-OLS και Suomi NPP-VIIRS. Η νέας γενεάς αισθητήρας VIIRS φέρει μια σειρά προηγμένων χαρακτηριστικών χωρικής, φασματικής και ραδιομετρικής ανάλυσης. Σε αντίθεση με τους κοινούς συμβατικούς δορυφορικούς αισθητήρες, ο VIIRS-DNB καταγράφει φασματικές πληροφορίες διατηρώντας σταθερή τη χωρική διακριτική ικανότητα των ψηφίδων κατά μήκος του συνόλου της λωρίδας σάρωσης.

Η ιδιότητα αυτή προσδίδει συνολική ονομαστική διάσταση των εικονοστοιχείων (ονομαστική τιμή στιγμιαίου οπτικού πεδίου εδάφους, GIFOV) 0.56 km^2 , σε αντίθεση με την αντίστοιχη τιμή του DMSP-OLS η οποία αναλογεί σε 25 km^2 στο ναδίρ και 49 km^2 στο περιθώριο της σάρωσης (Σχήμα 3.1). Κατά συνέπεια, η χωρική ανάλυση των παραγόμενων προϊόντων του VIIRS-DNB είναι από 45 έως 88 φορές υψηλότερη από εκείνη του DMSP-OLS (Elvidge et al., 2013, Miller et al., 2013). Επιπλέον, η βελτιωμένη ραδιομετρική ανάλυση των δεδομένων του VIIRS-DNB με δυναμικό εύρος 14bit, αποδίδει 16.384 διαφορετικούς τόνους του γκρι για κάθε εικονοστοιχείο, 250 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του OLS.

Χαρακτηριστικά	DMSP-OLS	SNPP-VIIRS
Τροχιά	Ηλιοσύγχρονη, ύψος 830km, 98.8ο απόκλιση	Ηλιοσύγχρονη, ύψος 824km, 98.7ο απόκλιση
Νυχτερινή ώρα διέλευσης	~19:30 UTC	~01:30 UTC
Εύρος σάρωσης	3000 km	3000 km
Εύρος φασματικής ζώνης	Παγχρωματικό 500 – 900nm	Παγχρωματικό 500 – 900 nm
Χωρική ανάλυση	2.7km (smooth data)	0.74 km
Κορεσμός Εικονοστοιχείων	Εμφανής σε αστικά κέντρα	κανένας
Γεωμετρικό σφάλμα	~450m – 5.4 km	266m (Ναδίρ) – 1151m (περιθώριο)
Ελάχιστο ανιχνεύσιμο σήμα	$4 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	$3 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
Ραδιομετρική ανάλυση	6 bit	14 bit
Ραδιομετρική βαθμονόμηση	Καμία	Επί του σκάφους (On-Board Solar Diffuser)

Πίνακας 3. Βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων DMSP-OLS και Suomi NPP-VIIRS.

Η υψηλή ευαισθησία του οργάνου VIIRS-DNB συμβάλλει στην ανίχνευση εξαιρετικά χαμηλών επιπέδων ακτινοβολίας τόσο υπό συνθήκες ημερήσιου ηλιακού φωτισμού όσο και υπό το σκότος. Η ονομαστική ελάχιστη ανιχνεύσιμη ένταση ακτινοβολίας αντιστοιχεί σε $3 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ (~10 φορές υψηλότερη από αυτή του OLS) με τιμή λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal-to Noise Ratio, SNR) > 9, παρέχοντας την δυνατότητα ανίχνευσης μεμονωμένων σημειακών πηγών φωτισμού στο έδαφος, όπως για παράδειγμα ένα φωτιστικό σώμα οδικού δικτύου (Miller et al., 2013). Τέλος, η on-board συστηματική βαθμονόμηση των συλλεχθέντων δεδομένων του VIIRS-DNB παρέχει υψηλής ποιότητας παραγόμενα προϊόντα, απαλλαγμένα από κορεσμένα (saturated) εικονοστοιχεία, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν σε ποσοτικές εφαρμογές για την παρακολούθηση και ανάλυση των διαχρονικών μεταβολών του εκπεμπόμενου τεχνητού φωτισμού.



Σχήμα 1.4 Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στην ευρύτερη περιοχή του Δελχί, Ινδία.
Πηγή: NGDC, NOAA.

Ωστόσο, παρόλα τα προηγμένα τεχνικά χαρακτηριστικά που επιφέρει ο αισθητήρας VIIRS-DNB τα επιχειρησιακά δεδομένα που συλλέγει και διατίθενται προς χρήση υπολείπονται σε μεγάλο βαθμό των απαιτήσεων που επιβάλλουν οι σύγχρονες επιστημονικές και ερευνητικές ανάγκες της Γεωγραφίας, και των γεωεπιστημών γενικότερα. Το γεγονός αυτό οφείλεται, στις αρχικές προδιαγραφές και τους σκοπούς που εξυπηρετούν τόσο ο αισθητήρας VIIRS όσο και ο OLS δεδομένου ότι και οι δύο αναπτύχθηκαν για την συλλογή μετεωρολογικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων (Elvidge et al., 2007).

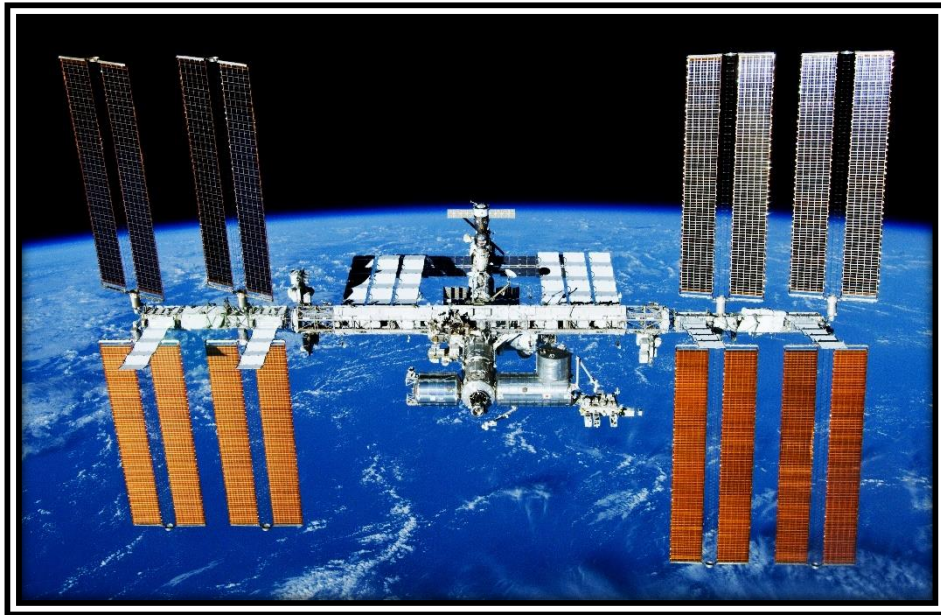
Παρ'όλα αυτά, σε κάθε περίπτωση, η σπουδαιότητα των υφιστάμενων δεδομένων νυχτερινού φωτισμού δεν θα πρέπει να παραγνωρίζεται και να υποβαθμίζεται καθώς η αξιοποίησή τους σε μια πληθώρα εφαρμογών έχει προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες και έχει συνεισφέρει στην κατανόηση και μελέτη σύγχρονων ζητημάτων. Επιπρόσθετα, το συνεχές διεπιστημονικό ενδιαφέρον που συγκεντρώνει αυτή η ιδιαίτερη κατηγορία δεδομένων αναμένεται να ενισχύσει και να εμπλουτίσει την επιστημονική αξία των παραγόμενων προϊόντων και να οδηγήσει στην ανάπτυξη εργαλείων για την παρακολούθηση και μελέτη του διαρκώς μεταβαλλόμενου ανθρωπογενούς και φυσικού περιβάλλοντος.

1.6.2 Εναλλακτικά μέσα απόκτησης δεδομένων νυχτερινού φωτισμού

Οι συνεχείς προσπάθειες που καταβάλλει η επιστημονική κοινότητα για την ανεύρεση σύγχρονων μεθόδων παρακολούθησης της κατάστασης του νυχτερινού περιβάλλοντος του πλανήτη επιβεβαιώνει την σημαντικότητα αυτής της κατηγορίας δεδομένων. Σήμερα, η απόκτηση δεδομένων των νυχτερινών επίγειων εκπομπών φωτισμού εκτός από την λειτουργία των προαναφερθέντων δορυφορικών συστημάτων DMSP και Suomi NPP, επιτυγχάνεται και με την αξιοποίηση δύο επιπλέον μέσων: Τη λειτουργία του *Διεθνή Διαστημικού Σταθμού* ο οποίος παρουσιάζεται ευθύς αμέσως και *συστήματα αεροσκαφών* τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1.6.2.1 Διεθνής διαστημικός σταθμός

Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (International Space Station, ISS) (Εικόνα 13) αποτελεί μια επιπλέον διαστημική πηγή δεδομένων νυχτερινού φωτισμού. Ωστόσο, δεν συγκαταλέγεται στα δορυφορικά καταγραφικά συστήματα καθώς ο σχεδιασμός και η λειτουργία του δεν αποσκοπεί στην ανίχνευση και απόκτηση μετρήσεων της φασματικής απόκρισης των υλικών στην επιφάνεια της γης.



Εικόνα 13. Αποψη του Διεθνής Διαστημικού Σταθμού. **Πηγή:** NASA

Τα δεδομένα του ISS αποτελούν ουσιαστικά διαστημικές φωτογραφίες νυχτερινής λήψης (night-time light photography) οι οποίες λαμβάνονται με την χρήση φορητών φωτογραφικών μηχανών υψηλής ανάλυσης. Σε ύψος 350 – 400 km άνωθεν της επιφάνειας της γης το πλήρωμα του ISS έχει καταφέρει να συλλέξει μια σειρά φωτογραφιών μέσης ανάλυσης (60 – 100m) προσφέροντας μια μοναδική απεικόνιση του νυχτερινού ανθρωπογενούς περιβάλλοντος (Εικόνα 3.8). Παρ' όλα αυτά, ορισμένοι παράμετροι όπως η υψηλή ταχύτητα κίνησης (7km/sec) της πλατφόρμας του σταθμού, και ο μικρός χρόνος έκθεσης (1/500 του δευτερολέπτου) παρεμβάλλουν την διαδικασία λήψης των διαστημικών φωτογραφιών επιφέροντας στα τελικά προϊόντα γεωμετρικές ή πλανιμετρικές παραμορφώσεις και έντονο θόρυβο (Evans & Stefanon, 2008). Η κατασκευή μιας ειδικά σχεδιασμένης συσκευής εντοπισμού αρχικά από τον αστροναύτη Don Pettit (2003) και από την ESA (European Space Agency) το 2012 που ονομάστηκε NightPod, συνετέλεσε στον περιορισμό των παραπάνω σφαλμάτων.



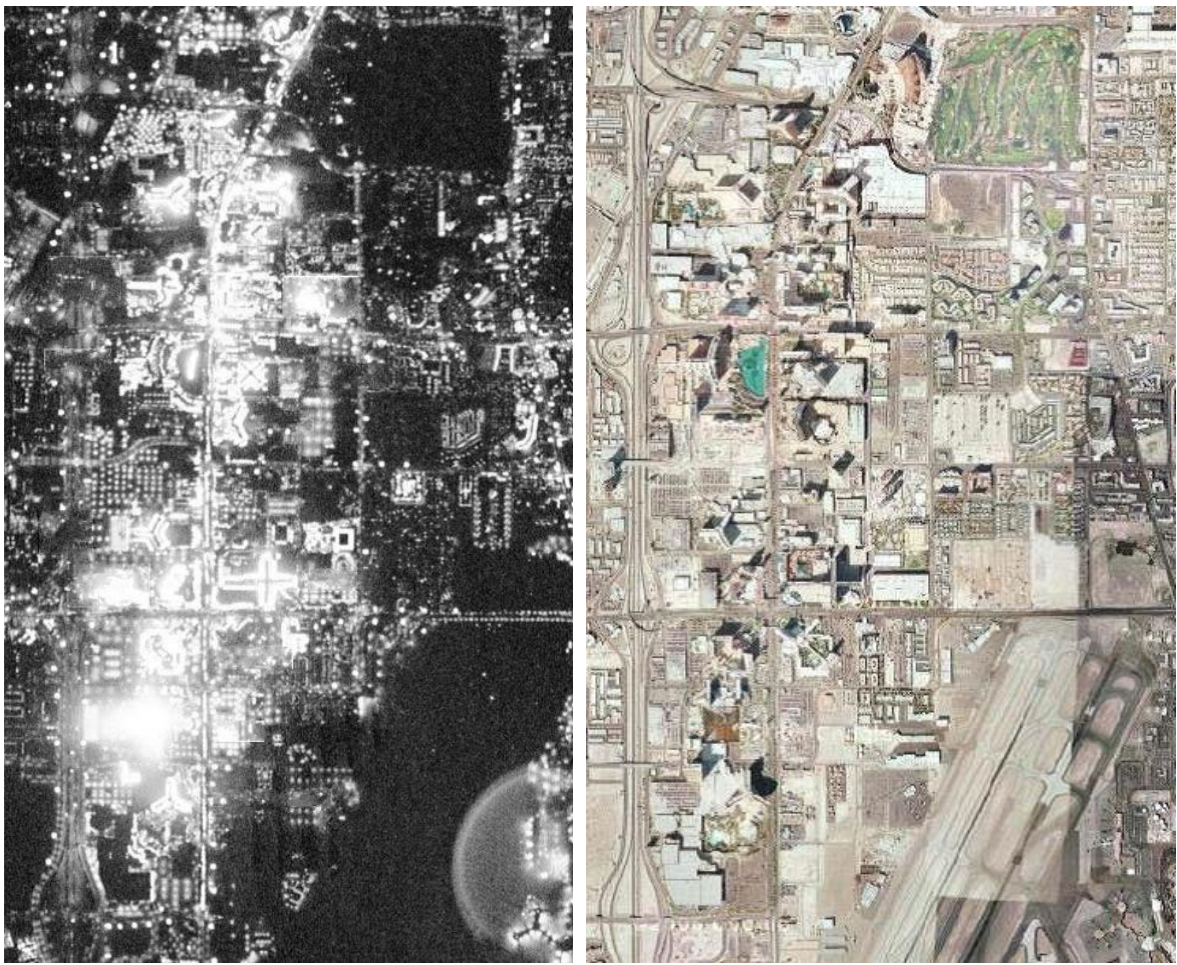
Εικόνα 14. Η ευρύτερη περιοχή του Λεκανοπεδίου Αττικής όπως λήφθηκε από τον ISS στις 22/02/2011. Η υψηλή ανάλυση της εικόνας προσφέρει την διάκριση των κύριων λεωφόρων του οδικού δικτύου καθώς και των τύπων φωτισμού με λευκό και πορτοκαλί χρώμα. Η φωτογραφία της σειράς ISS026-E-28873 λήφθηκε με την φωτογραφική μηχανή Nikon D3S με συνολικές διαστάσεις 4256 x 2832. **Πηγή:** NASA

Μέχρι σήμερα οι διαστημικές φωτογραφίες νυχτερινής λήψης του ISS έχουν περιορισμένη πρακτική εφαρμογή τόσο σε επιχειρησιακές όσο και σε ερευνητικές μελέτες (Anderson et al., 2010, Levin & Duke, 2013) και διαχειρίζονται κυρίως από εξειδικευμένους αναλυτές γεγονός που σύμφωνα με τον Doll (2008) οφείλεται:

- Στην έλλειψη σταθερής τιμής στιγμιαίου οπτικού πεδίου εδάφους
- Στην έλλειψη κωδικοποίησης των ψηφιακών τιμών των εικονοστοιχείων της εικόνας
- Στην αδυναμία ακριβούς γεωμετρικής διόρθωσης των εικόνων
- Στη χειροκίνητη λήψη των φωτογραφιών

1.6.2.2 Εναέρια συστήματα τηλεπισκόπησης

Κατά τη διάρκεια ειδικών αεροαποστολών τα έτη 1998 και 2004, αερομεταφερόμενοι (airborne) πολυφασματικοί και υπερφασματικοί απεικονιστές κατέγραψαν μια σειρά αεροφωτογραφιών νυχτερινής λήψεως στην ευρύτερη περιοχή του Las Vegas. Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται μια σκηνή αεροφωτογραφίας πολύ υψηλής χωρικής (1.5m) και ραδιομετρικής (16bit) ανάλυσης, η οποία λήφθηκε με την αερομεταφερόμενη κάμερα Citrus DCS σε ύψος 13.7km και για λόγους σύγκρισης παρατίθεται δορυφορική εικόνα της ίδιας περιοχής του εμπορικού δορυφόρου Ikonos. Η υψηλή χωρική διαχωριστική ικανότητα της αεροφωτογραφίας προσφέρει τη δυνατότητα διάκρισης λεπτομερών χαρακτηριστικών του αστικού πλέγματος όπως τα οικοδομικά τετράγωνα και οι βασικοί οδικοί άξονες αλλά και ακόμα λεπτομερέστερα που φτάνουν σε επίπεδο μεμονωμένων φωτιστικών σωμάτων (κίτρινο πλαίσιο).



Σχήμα 1.5. Αεροφωτογραφία νυχτερινής λήψης της πόλης του Las Vegas, Nevada κατά τη διάρκεια όπως αποκτήθηκε από το αεροσκάφος ER-2 της NASA στις 27/09/2004. **Πηγή:** Επεξεργασία από Doll, 2008.

Τα αερομεταφερόμενα συστήματα τηλεπισκόπησης αποτελούν ένα ιδανικό μέσο και προσφέρουν συγκριτικά πλεονεκτήματα στην απόκτηση υψηλής ποιότητας δεδομένων νυχτερινού φωτισμού και μπορούν να αξιοποιηθούν για λεπτομερή χαρτογράφηση και ποσοτική χωρική ανάλυση των επίγειων τεχνητών πηγών φωτισμού (Kuechly et al., 2012). Ωστόσο, στη βιβλιογραφία απαντάται ένας περιορισμένος αριθμός επιστημονικών μελετών αξιοποίησης αυτής της κατηγορίας δεδομένων (Elvidge & Green, 2005, Barducci et al., 2003, Luginbuhl et al., 2009, Kuechly et al., 2012, Hale et al. 2013, Kim & Hong, 2013,) γεγονός που οφείλεται στο ιδιαίτερα αυξημένο κόστος των εναέριων αποστολών, καθιστώντας την πρόσβαση σε αυτή την κατηγορία δεδομένων μόνον από μεμονωμένους οργανισμούς.

1.6.2.3 Μελλοντικά συστήματα

Παρά την ομολογουμένως αλματώδη ανάπτυξη της δορυφορικής τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια, τα υφιστάμενα τηλεπισκοπικά συστήματα καταγραφής των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού όπως διαπιστώθηκε από τα παραπάνω, παρουσιάζουν σημαντικές ελλείψεις που διακρίνονται τόσο στη χωρική και διακριτική τους ικανότητα όσο και στα φασματικά χαρακτηριστικά των οργάνων που μεταφέρουν. Σήμερα, η ιδέα που προωθείται αφορά τον σχεδιασμό και τη κατασκευή μικρών δορυφόρων οι οποίοι θα παρέχουν πληροφορίες για εξειδικευμένες εφαρμογές εξασφαλίζοντας υψηλής επιστημονικής αξίας δεδομένα για την άμεσα ενδιαφερόμενη επιστημονική κοινότητα.

Στα πλαίσια αυτά, και δεδομένης της προϋπάρχουσας μακροχρόνιας ερευνητικής εμπειρίας με την χρήση πληροφοριών του δορυφορικού προγράμματος DMSP, ερευνητές αξιοποιώντας δεδομένα των υφιστάμενων δορυφορικών αποστολών (DMSP & Suomi NPP) καθώς και δεδομένα μέσης και υψηλής ανάλυσης όπως διαστημικές φωτογραφίες του ISS και αεροφωτογραφίες από εναέριες αποστολές, μελέτησαν τις ακριβείς προδιαγραφές που θα πρέπει να διαθέτουν μελλοντικά δορυφορικά συστήματα.

Η κατασκευή ενός εξειδικευμένου δορυφορικού αισθητήρα για την ανίχνευση και καταγραφή των επίγειων εκπομπών φωτισμού θα προσφέρει νέες δυνατότητες, όπως λεπτομερή ανίχνευση και χαρτογράφηση της δομής και των προτύπων του δομημένου περιβάλλοντος, την λεπτομερή ανάλυση των διαφόρων τύπων φωτισμού (λαμπτήρες ατμών, υδραργύρου κ.α.) την χαρτογράφηση σε ετήσια βάση της έντασης και της χωρικής κατανομής των εκπομπών νυχτερινού φωτισμού κ.α. (Elvidge et al., 2007).

Επιπλέον, η συλλογή δεδομένων υψηλής ανάλυσης θα προσφέρει τη δυνατότητα εκτίμησης κοινωνικοοικονομικών μεταβλητών σε μεγαλύτερες χωρικές κλίμακες ενώ μπορεί να συνδράμει στην γεφύρωση του χάσματος μεταξύ των κοινωνικών επιστημών και της τηλεπισκόπησης (Levin & Duke, 2012).

Ο σχεδιασμός του μελλοντικού δορυφορικού αισθητήρα που προτάθηκε από την ερευνητική ομάδα, με κωδική ονομασία *Nightsat*, θα πρέπει να τηρεί τις κάτωθι προδιαγραφές (Elvidge et al., 2007):

- ❖ Πολική τροχιά σε χαμηλό ύψος πτήσης, με χρόνο διέλευσης του ισημερινού στις 08:30 – 10:00 μ.μ. και κύκλο επαναληψιμότητας 20 ημερών
- ❖ Κατακόρυφη κατόπτρευση (ναδίρ) με τιμή GIFOV εύρους 50 – 100m και εύρος σάρωσης ~100 km
- ❖ Χωρική διακριτική ικανότητα 50 – 100 m
- ❖ Μέση ελάχιστη ανιχνεύσιμη ακτινοβολία στη φωτοπική ζώνη $2.5E^{-8} \text{ Watts cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ με τιμή SNR 10 και ακτινοβολία κορεσμού (ένταση ακτινοβολίας πάνω από την οποία επέρχεται κορεσμός της απολαβής) σε $2.5E^{-2} \text{ Watts cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$
- ❖ Πολυφασματική απεικόνιση με λειτουργία τριών έως πέντε διαύλων στη φασματική ζώνη (0.45 μm – 0.9 μm)
- ❖ Λειτουργία ενός ή περισσότερων διαύλων στη φασματική ζώνη του θερμικού υπέρυθρου για την ανίχνευση νεφικών συστημάτων και περιστατικών πυρκαγιών
- ❖ Συστηματική on-board ραδιομετρική βαθμονόμηση των συλλεχθέντων μετρήσεων
- ❖ Ακρίβεια γεωτοποθεσίας ~50 m

Η παροχή δεδομένων από ένα τέτοιου είδους δορυφορικό σύστημα θα διευρύνει περαιτέρω τις υπάρχουσες εφαρμογές των δεδομένων νυχτερινού φωτισμού (βλέπε Levin & Duke, 2012) προσφέροντας ισχυρά εργαλεία στην επιστημονική κοινότητα για την πληρέστερη μελέτη και κατανόηση των πιέσεων που ασκούν οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες στο φυσικό περιβάλλον.

1.7 Βιβλιογραφική ανασκόπηση συναφών μελετών

1.7.1 Χαρτογράφηση και μοντελοποίηση της φωτορύπανσης

Η απόκτηση ποσοτικών μετρήσεων της τεχνητής φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού χρονολογείται τη δεκαετία του 1970, με την σταδιακή εμφάνιση μεμονωμένων μελετών από ορισμένους ερευνητές. Την τελευταία δεκαετία η το ολοένα και αυξανόμενο ενδιαφέρον για την μελέτη και κατανόηση των επιπτώσεων της φωτορύπανσης, έχει κινητοποιήσει πλήθος ερευνητών, γεγονός που συνδέθηκε με την εμφάνιση νέων μεθοδολογικών πρακτικών αλλά και βελτίωση των προγενέστερων.

Η αρχική προσέγγιση για την μοντελοποίηση της φωτορύπανσης ήταν ο προσδιορισμός κατάλληλων μελλοντικών απομονωμένων παρατηρητηρίων με μηδαμινά επίπεδα φωτορύπανσης, η οποία στηρίχθηκε στην ικανότητα πρόβλεψης της της τεχνητής ουράνιας φωτεινότητας ως συνάρτηση της πληθυσμιακής αύξησης.

Ο Walker (1973) ήταν ο πρώτος που παρατήρησε τη συσχέτιση μεταξύ του πληθυσμού μιας πόλης και την χωρική διαφοροποίηση του ύψους του τεχνητού ουράνιου θόλου που εμφανίζεται πάνω από αυτή. Ο Walker πραγματοποίησε λήψη μετρήσεων χρησιμοποιώντας τυπικό φωτοηλεκτρικό φωτόμετρο, της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού σε συνάρτηση με την απόσταση από το κέντρο ορισμένων παρατηρητηρίων στη Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Από τις παρατηρήσεις αυτές, κατέστη δυνατός ο υπολογισμός εμπειρικών σχέσεων μεταξύ του μεγέθους μιας πόλης και της απόστασης ενός παρατηρητηρίου από αυτή. Βρέθηκε ότι σε απόσταση (D) από μια πόλη της οποίας ο πληθυσμός (P) παράγει φωτεινότητα έντασης 0.2 mag σε γωνία ζενίθ ίση με 45 μοίρες, κυμαίνεται ως $PxD^{-2.5}$. Επίσης βρέθηκε ότι η συνολική εκπομπή φωτός (lumens/κάτοικο), ήταν ανάλογη του μεγέθους του πληθυσμού P της πόλης. Συνδυάζοντας τις δύο αυτές σχέσεις προέκυψε η παρακάτω μαθηματική εξίσωση, γνωστή και ως νόμος του Walker (1977), η οποία συσχετίζει εμπειρικά την τεχνητή φωτεινότητα του νυχτερινού ουρανού που εκπέμπεται από τις τεχνητές πηγές μιας πόλης, τον πληθυσμό της πόλης και την απόσταση.

$$I = C \times P \times D^{-2.5} \quad (1)$$

Όπου C , ένας συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος της πόλης και την απόσταση από το παρατηρητήριο. Από την εξίσωση παρατηρείται ότι η ένταση της

τεχνητής φωτεινότητας είναι αντιστρόφως ανάλογη της 2.5 δύναμης της απόστασης. Η εξίσωση αυτή αποτελεί μια από τις πιο απλουστευμένες μορφές ενός μοντέλου φωτορύπανσης.

Ένα πιο σύνθετο μοντέλο λαμβάνοντας υπόψιν τις ατμοσφαιρικές συνθήκες καθώς και την πορεία διάδοσης της ακτινοβολίας φωτός, και τα φαινόμενα σκέδασης και ανάκλασης που υφίσταται από αερολύματα και διάφορους σκεδαστές, αναπτύχθηκε αρχικά από τους Bertiau & Treanor (1973) και εν συνεχεία από τον Roy Garstang (1986, 1989, 1991). Ο Garstang διενεργώντας λεπτομερείς μετρήσεις των ΝΕΦ σε διάφορα παρατηρητήρια στην USA, ανέπτυξε ένα πρότυπο μοντέλο της τεχνητής φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού το οποίο αποτελεί ακόμα και σήμερα τον βασικό πυρήνα συγκρότησης μοντέλων για την μελέτη της φωτορύπανσης (Prugna 1999; Kollath, 2001; Luginbuhl & Moore, 2007; Biggs et al., 2012)

Η διάθεση των δορυφορικών εικόνων DMSP OLS συνέβαλε στην εμφάνιση νέων μεθοδολογιών μοντελοποίησης της φωτορύπανσης. Οι Cinzano et al. (2000) αξιοποίησαν ραδιομετρικά βαθμονομημένα δεδομένα των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού του DMSP-OLS για την μοντελοποίηση και χαρτογράφησης τεχνητής φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού στην Ευρώπη. Για την μοντελοποίηση της τεχνητής ουράνιας λάμψης, οι ερευνητές αξιοποιώντας μαθηματικά ατμοσφαιρικά μοντέλα διάδοσης της ακτινοβολίας προηγούμενων μελετών (Garstang 1989), πρότεινα την εφαρμογή ενός βελτιωμένου μαθηματικού μοντέλου (Extended Garstang Model) για τη μοντελοποίηση των εκπομπών φωτισμού στην ατμόσφαιρα με βάση βαθμονομημένα προϊόντα του DMSP-OLS. Οι Cinzano et al., (2001) αξιοποίησαν ραδιομετρικά βαθμονομημένα δεδομένα τύπου Stable Lights του DMSP για τα έτη 1996-1997 δημιουργώντας τον πρώτο παγκόσμιο Άτλαντα της τεχνητής φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού.

Αξιοποίηση ΣΓΠ στη μοντελοποίηση της φωτορύπανσης

Στη μελέτη τους με αντικείμενο την μοντελοποίηση και χαρτογράφηση των τεχνητών εκπομπών φωτισμού στην ευρύτερη αστική και περιαστική έκταση του Λεκανοπεδίου Αττικής οι Chalkias et al. (2006) ανέπτυξαν ένα πρότυπο μεθοδολογικό πλαίσιο σε περιβάλλον GIS αξιοποιώντας δορυφορικά δεδομένα νυχτερινού φωτισμού. Η χωροχρονική ανάλυση των χαρτογραφικών προϊόντων ανέδειξε την γενική αυξητική τάση των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού στο σύνολο των προαστιακών περιοχών της Αττικής η οποία αντιστοιχεί σε συνολική έκταση 500km².

Κατ' αναλογία με την μελέτη των Chalkias et al. (2006), πρόσφατα ο Butt (2012) πρότεινε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την μοντελοποίηση, χαρτογράφηση της άμεσης και έμμεσης φωτορύπανσης καθώς και τη διαχρονική παρακολούθηση των αλλαγών στις εκπομπές του άμεσου τεχνητού εξωτερικού φωτισμού αξιοποιώντας εργαλεία και τεχνικές χωρικής ανάλυσης που προσφέρουν τα σύγχρονα λογισμικά πακέτα GIS και RS.

1.7.2 Συσχέτιση των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού με στατιστικά δεδομένα

Η ικανότητα μοντελοποίησης κοινωνικοοικονομικών μεταβλητών από τα δορυφορικά δεδομένα αποτελεί ένα σημαντικό κρίκο στην έλλειψη δεδομένων που υπάρχουν σήμερα για την σύνδεση και συσχέτιση της ανθρώπινης παρουσίας και των φυσικών συστημάτων στο ενιαίο πολύπλοκο σύστημα της γης. Μεταβλητές όπως ο πληθυσμός, η οικονομική δραστηριότητα (ΑΕΠ), η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ακόμα και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εμφανίζουν ισχυρή συσχέτιση με τα δορυφορικά δεδομένα νυχτερινού φωτισμού (Elvidge et al., 1997a, 1997b, 1999, 2001; Sutton et al., 1997; Doll et al., 2000; Silvana et al., 2005; Hara et al., 2004; Letu et al., 2010, 2012; Chunyang et al., 2012, Cao et al., 2014). Οι συσχετίσεις αυτές έχει αποδειχθεί ότι διαφέρουν εξαρτώμενες από τη χωρική κλίμακα ανάλυσης των δεδομένων, με τις ισχυρότερες να σημειώνονται σε επίπεδο χώρας (Doll et al., 2000) ενώ ασθενέστερες σε περιφερειακό επίπεδο ανάλυσης.

Ο Lo (2001) αξιοποίησε ραδιομετρικά βαθμονομημένα δεδομένα DMSP των ετών 1996 – 1997 για την αξιολόγηση της δυνατότητάς τους για την εκτίμηση του

πληθυσμού της Κίνας σε τρία χωρικά επίπεδα. Για την επίτευξη του σκοπού αναπτύχθηκαν αλλομετρικά μοντέλα και μοντέλα παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας στατιστικούς δείκτες των ΝΕΦ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα δεδομένα νυχτερινού φωτισμού παράγουν αρκετά ακριβείς εκτιμήσεις του αστικού πληθυσμού τόσο επίπεδο νομών όσο και σε επίπεδο πόλης.

Στη μελέτη τους οι Amaral et al. (2006) χρησιμοποίησαν δορυφορικά δεδομένα νυχτερινού φωτισμού DMSP για τη διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ των εκπομπών φωτισμού και της ανθρώπινης παρουσίας και δραστηριότητας στην περιφέρεια του Αμαζονίου στη Βραζιλία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των εκπομπών φωτισμού και του αστικού πληθυσμού ($r^2=0.79$) και της ηλεκτρικής κατανάλωσης ($r^2=0.80$).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Υλικά και μέθοδοι

Για την διεκπεραίωση του σκοπού και των στόχων που τέθηκαν στην παρούσα εργασία, σχεδιάστηκε και οργανώθηκε κατάλληλη Ψηφιακή Χωρική Βάση Δεδομένων (Γεωβάση) σε περιβάλλον GIS για την αποδοτικότερη οργάνωση, διαχείριση, επεξεργασία και αξιοποίηση των εισαχθέντων δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά αφορούν όλες τις απαραίτητες χωρικές, και μη, πληροφορίες, και μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες κατηγορίες.

2.1.1 Χωρικά δεδομένα

Το κυριότερο χωρικό στοιχείο, το οποίο αποτελεί και τον πυρήνα της γεωβάσης, αποτελούν οι διαχρονικές δορυφορικές εικόνες DMSP της 4^{ης} κατά σειρά έκδοσης που διατίθενται από την NGDC. Συνολικά αντλήθηκαν 34 (Σχήμα 2.1) δορυφορικές εικόνες που αφορούν τις νυχτερινές εκπομπές σταθερού φωτισμού (Stable Lights) του οργάνου καταγραφής DMSP-OLS και ελήφθησαν από έξι διαφορετικούς δορυφόρους (F10, F12, F14, F15, F16, F18) συμπεριλαμβανομένων των διπλών ετήσιων εγγραφών από δύο διαφορετικούς δορυφόρους, οι οποίες καλύπτουν χρονικό διάστημα 21 ετών. Επιπλέον, λήφθηκε ραδιομετρικά βαθμονομημένη (RDC) δορυφορική εικόνα της περιόδου 2002 – 2003 η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη σχετική ραδιομετρική διόρθωση των παραπάνω εικόνων, μεθοδολογία η οποία αναπτύσσεται σε επόμενη ενότητα. Συγκριτικά με τις εικόνες Stable Lights, η RDC εικόνα περιλαμβάνει μεγαλύτερο εύρος τιμών και επιπλέον δεν περιέχονται κορεσμένα εικονοστοιχεία με αποτέλεσμα να καθίσταται δυνατή η διάκριση των πυρήνων των αστικών κέντρων.

Ένα εξίσου σημαντικό χωρικό στοιχείο της γεωβάσης αποτελεί το Ψηφιακό Μοντέλο Ανάγλυφου (DEM) το οποίο προέρχεται από στερεοζεύγη εικόνων του δορυφορικού συστήματος ASTER (ASTER GDEM V2). Το DEM αποκόπηκε στα γεωγραφικά όρια της περιοχής μελέτης (Ελλαδικός χώρος), γεωαναφέρθηκε στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87) ενώ η επαναδόμηση των εικονοστοιχείων προέκυψε με τη μέθοδο της διγραμμικής παρεμβολής, η οποία συνίσταται για συνεχή ψηφιδωτά δεδομένα, με μέγεθος ψηφίδας 25m.

Έτος / Δορυφόρος	F10	F12	F14	F15	F16	F18
1992	F101992					
1993	F101993					
1994	F101994	F121994				
1995		F121995				
1996		F121996				
1997		F121997	F141997			
1998		F121998	F141998			
1999		F121999	F141999			
2000			F142000	F152000		
2001			F142001	F152001		
2002			F142002	F152002		
2003			F142003	F152003		
2004				F152004	F162004	
2005				F152005	F162005	
2006				F152006	F162006	
2007				F152007	F162007	
2008					F162008	
2009					F162009	
2010						F182010
2011						F182011
2012						F182012
2013						F182013

Σχήμα 2.1. Χρονοσειρά ετήσιων δορυφορικών εικόνων της περιόδου 1992 - 2013.



Σχήμα 2.2. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

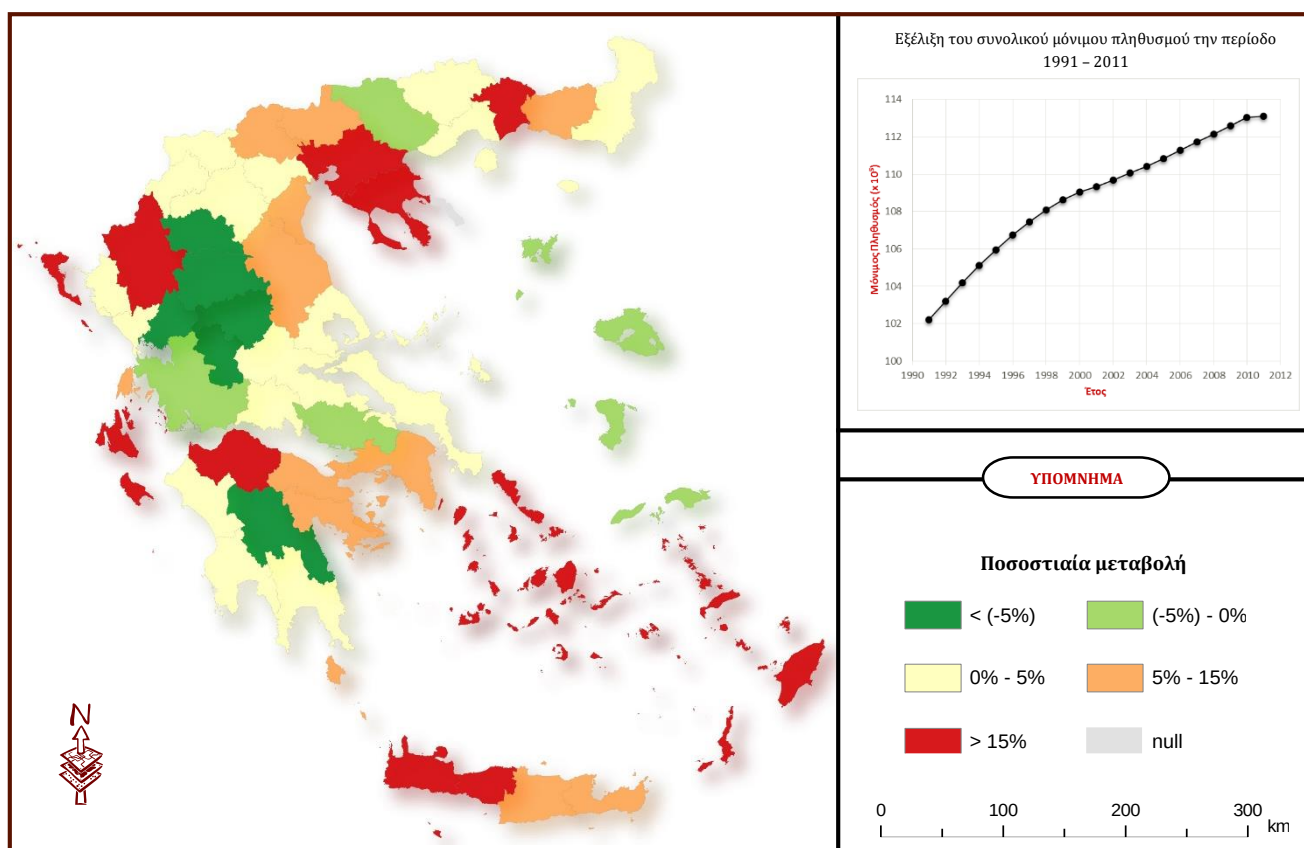
Πηγή: Προσωπική επεξεργασία

2.1.2 Κοινωνικο-οικονομικά δεδομένα

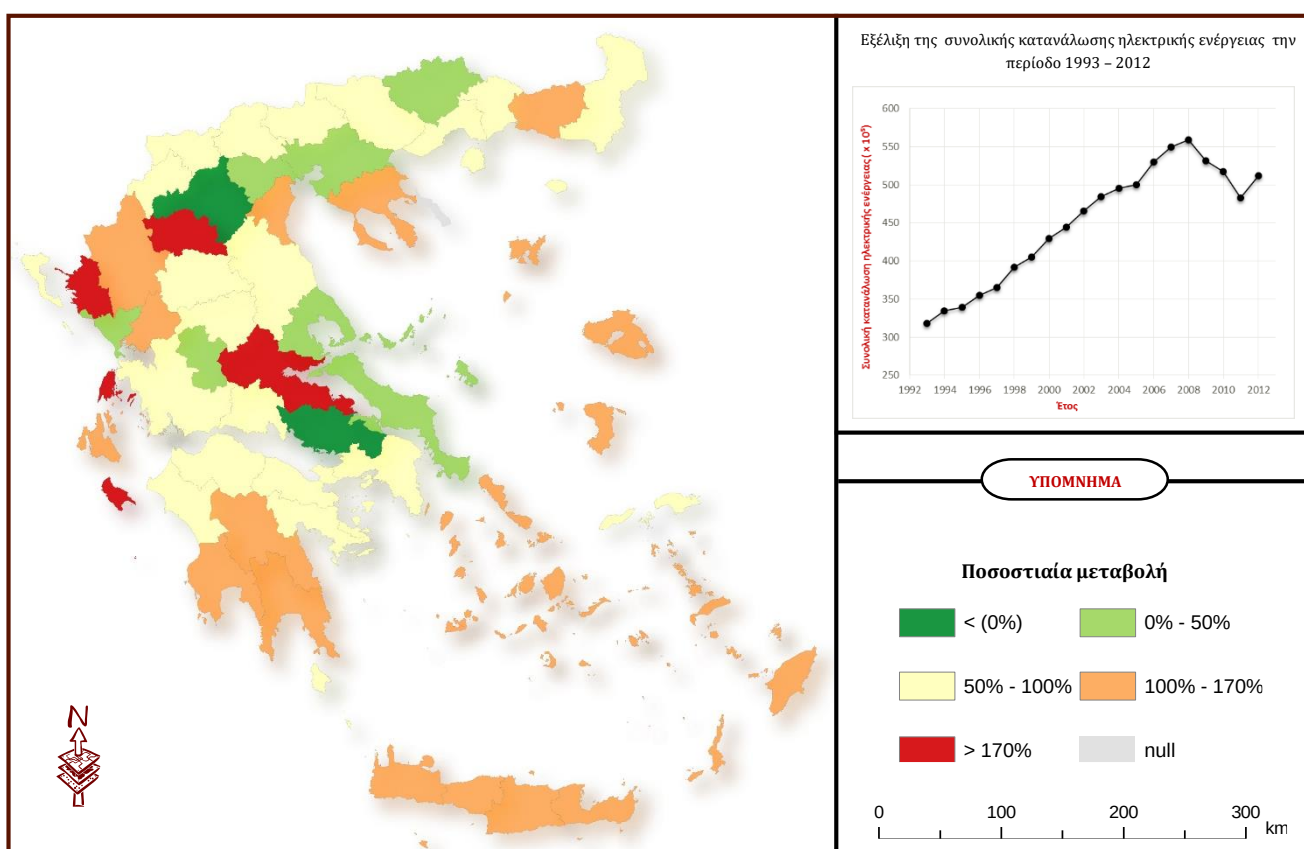
Όπως έγινε κατανοητό από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας ορισμένες κοινωνικό-οικονομικές μεταβλητές οι οποίες σχετίζονται άμεσα και έμμεσα με τις τεχνητές νυχτερινές πηγές φωτισμού είναι ο πληθυσμός, το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν προς ανάλυση και οι τρεις παραπάνω μεταβλητές. Ως μεταβλητή ανάλυσης του πληθυσμού επιλέχθηκε ο μόνιμος πληθυσμός καθώς σε αντίθεση με τον πραγματικό αντανακλά την μόνιμη πληθυσμιακή συγκέντρωση κατοίκων στα αστικά κέντρα, δεδομένης της μη επιθυμητής εποχικότητας που εμπεριέχεται στον πραγματικό πληθυσμό (Ντυκέν & Κρομυδάκης, 2009).

Τα πληθυσμιακά δεδομένα αφορούν τρεις χρονικές περιόδους που αντιστοιχούν στις απογραφές πληθυσμού της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛ.ΣΤΑΤ) των ετών 1991, 2001 και 2011. Οικονομικά στοιχεία σχετικά με το ΑΕΠ σε εκατομμύρια ευρώ, για τα έτη 1995 – 2011 καθώς και τα δεδομένα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε χιλιάδες ΩΧΒ (thousands kWh), για τη χρονική περίοδο 1993 – 2012, ελήφθησαν επίσης από την βάση δεδομένων της ΕΛ.ΣΤΑΤ. Ως χωρικό επίπεδο αναφοράς επιλέχθηκε η τρέχουσα διοικητική διαίρεση σε επίπεδο νομών όπως διαμορφώθηκε από το πρόγραμμα *Καλλικράτης*, με συνολικό αριθμό 51 νομοί εξαιρουμένου του αυτοδιοίκητου τμήματος του Αγίου Όρους το οποίο αποκλείστηκε από την ανάλυση.

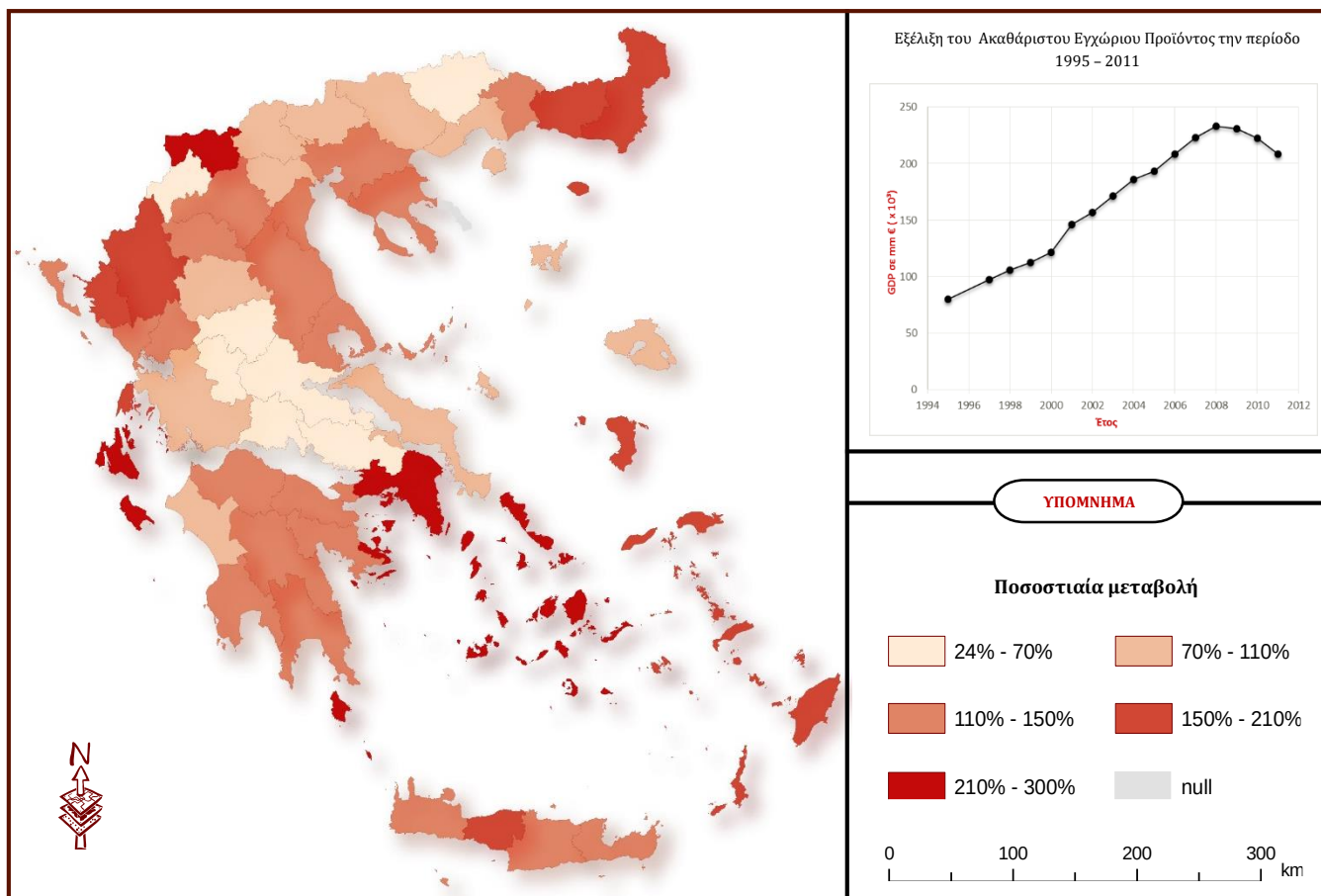
Τα στατιστικά δεδομένα εισήχθησαν και οργανώθηκαν στην γεωβάση και με κατάλληλες ενέργειες δημιουργήθηκαν οι δείκτες της ποσοστιαίας μεταβολής κάθε μεταβλητής για τη χρονική περίοδο 1991 – 2011. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν κατάλληλοι θεματικοί χάρτες για την περαιτέρω ανάλυση και αποσαφήνιση της χωρικής κατανομής των τιμών των μεταβλητών (Σχήμα 2.3 – 5).



Σχήμα 2.3. Ποσοστιαία μεταβολή μόνιμου πληθυσμού σε επίπεδο νομών, 1991 - 2011. **Πηγή:** Απογραφές πληθυσμού 1991, 2011 (ΕΛ.ΣΤΑΤ).



Σχήμα 2.4 Ποσοστιαία μεταβολή συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε χιλιάδες kWh, σε επίπεδο νομών, 1993 - 2012. **Πηγή:** ΕΛ.ΣΤΑΤ



Σχήμα 2.5 Ποσοστιαία μεταβολή του ΑΕΠ (mm €) σε επίπεδο νομών, 1995 - 2012. Πηγή: ΕΛ.ΣΤΑΤ.

2.2 Ψηφιακή επεξεργασία & ανάλυση δορυφορικών εικόνων

Στην ενότητα αυτή εφαρμόζονται τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνων που αφορούν τη γεωμετρική και ραδιομετρική διόρθωση σε προκαταρκτικό στάδιο αλλά και την εξαγωγή επιθυμητών χαρακτηριστικών μέσω τεχνικών τμηματοποίησης.

2.2.1 Προεπεξεργασία δορυφορικών δεδομένων νυχτερινού φωτισμού

2.2.1.1 Αποκοπή & γεωαναφορά δορυφορικών εικόνων

Συνολικά 35 δορυφορικές εικόνες του δορυφόρου DMSP σε μορφή geoTiff λήφθηκαν από την ψηφιακή βάση δεδομένων της NGDC, με συνολικό μέγεθος ασυμπίεστου αρχείου ~25GB. Η προεπεξεργασία με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων για την εξάλειψη του θορύβου καθώς και των γεωμετρικών παραμορφώσεων που οφείλονται στην κίνηση των δορυφόρων από την NGDC μείωσε δραστικά τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο προεπεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων. Αρχικά οι δορυφορικές εικόνες αποκόπηκαν στα όρια της περιοχής μελέτης (Ελλαδικός χώρος) και εν συνεχεία εφαρμόστηκαν κατάλληλοι μετασχηματισμοί για την μετατροπή του αρχικού γεωγραφικού συστήματος συντεταγμένων των εικόνων στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87.

Ως μέθοδος επαναδόμησης και ανακατασκευής επιλέχθηκε η μέθοδος παρεμβολής του πλησιέστερου γείτονα (nearest – neighbor) σύμφωνα με την οποία στα νέα εικονοστοιχεία (x, y) των γεωαναφερμένων εικόνων αποδίδονται οι ψηφιακές τιμές των πλησιέστερων εικονοστοιχείων των αρχικών εικόνων. Το αρχικό μέγεθος κελιών των εικόνων το οποίο απέδιδε χωρική διακριτική ικανότητα 2.7km στο ναδίρ, μειώθηκε στα 1x1 km αυξάνοντας την χωρική ανάλυση των εικόνων και διευκολύνοντας παράλληλα την μετέπειτα ποσοτική ανάλυση. Σημειώνεται ότι λόγω του μεγάλου όγκου του αρχείου όλες οι παραπάνω ενέργειες απαιτούν σημαντικό υπολογιστικό χρόνο και ισχύ.

2.2.1.2 Σχετική ραδιομετρική βαθμονόμηση των δορυφορικών δεδομένων

Όπως έχει προαναφερθεί, τα πρωτογενή δορυφορικά δεδομένα νυχτερινού φωτισμού που παρέχονται από την NGDC δεν είναι δόκιμο να αξιοποιηθούν για άμεση διαχρονική σύγκριση και ανάλυση εξαιτίας της έλλειψης συστηματικής on board ραδιομετρικής βαθμονόμησης των τιμών ακτινοβολίας στο φασματικό κανάλι του ορατού του οργάνου καταγραφής OLS (Elvidge et al., 2009, Baugh et al., 2010), με αποτέλεσμα η ραδιομετρική απόδοση των αισθητήριων οργάνων των διαφόρων τύπων δορυφορικών συστημάτων DMSP να διαφέρει σημαντικά (Elvidge et al., 2013).

Για την επιτυχή αξιοποίηση και ανάλυση των δεδομένων καθώς και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων απαιτείται η ύπαρξη κοινής ραδιομετρικής απόκρισης των ψηφιακών τιμών για κάθε ζεύγος εικόνων, ούτως ώστε οι ασυμβατότητες μεταξύ των ανιχνευτών να απαλείφονται ή να περιορίζονται. Καθώς η απόλυτη ραδιομετρική βαθμονόμηση δεν είναι απαραίτητη για μια πληθώρα εφαρμογών στην διαχρονική ανάλυση και ανίχνευση μεταβολών, αλλά και δεδομένης της ακρίβειας των λεπτομερών χαρακτηριστικών των αισθητήριων οργάνων που απαιτούνται, η σχετική βαθμονόμηση των τιμών φωτεινότητας των ψηφίδων των εικόνων αποτελεί μια ιδανική εναλλακτική μέθοδος (Corpin et al., 2004). Στην βιβλιογραφία αναφέρονται μια πληθώρα μελετών στις οποίες προτείνονται μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση των ραδιομετρικών σφαλμάτων των δορυφορικών δεδομένων DMSP. Στην πλειονότητά

τους οι μεθοδολογίες αυτές στηρίζονται στην ανάλυση παλινδρόμησης (Elvidge et al., 2009, 2013; Letu et al., 2010, 2011, 2012; Liu et al., 2012; Cao et al., 2013; Wu et al., 2013) μεταξύ των ψηφιακών τιμών μιας επιλεγμένης εικόνας αναφοράς (reference image) με τις τιμές των εναπομεινάντων εικόνων. Με τον τρόπο αυτό οι ψηφιακές τιμές κάθε εικόνας προσαρμόζονται στο εύρος των τιμών της εικόνας αναφοράς. Πρόσφατες μελέτες έχουν αξιοποιήσει επίσης εναλλακτικές μεθόδους όπως η χρήση ισχυρών τεχνικών παλινδρόμησης (Li et al., 2013; Bennie et al., 2014) καθώς και την ανάλυση κύριων συνιστωσών (Small & Elvidge, 2013).

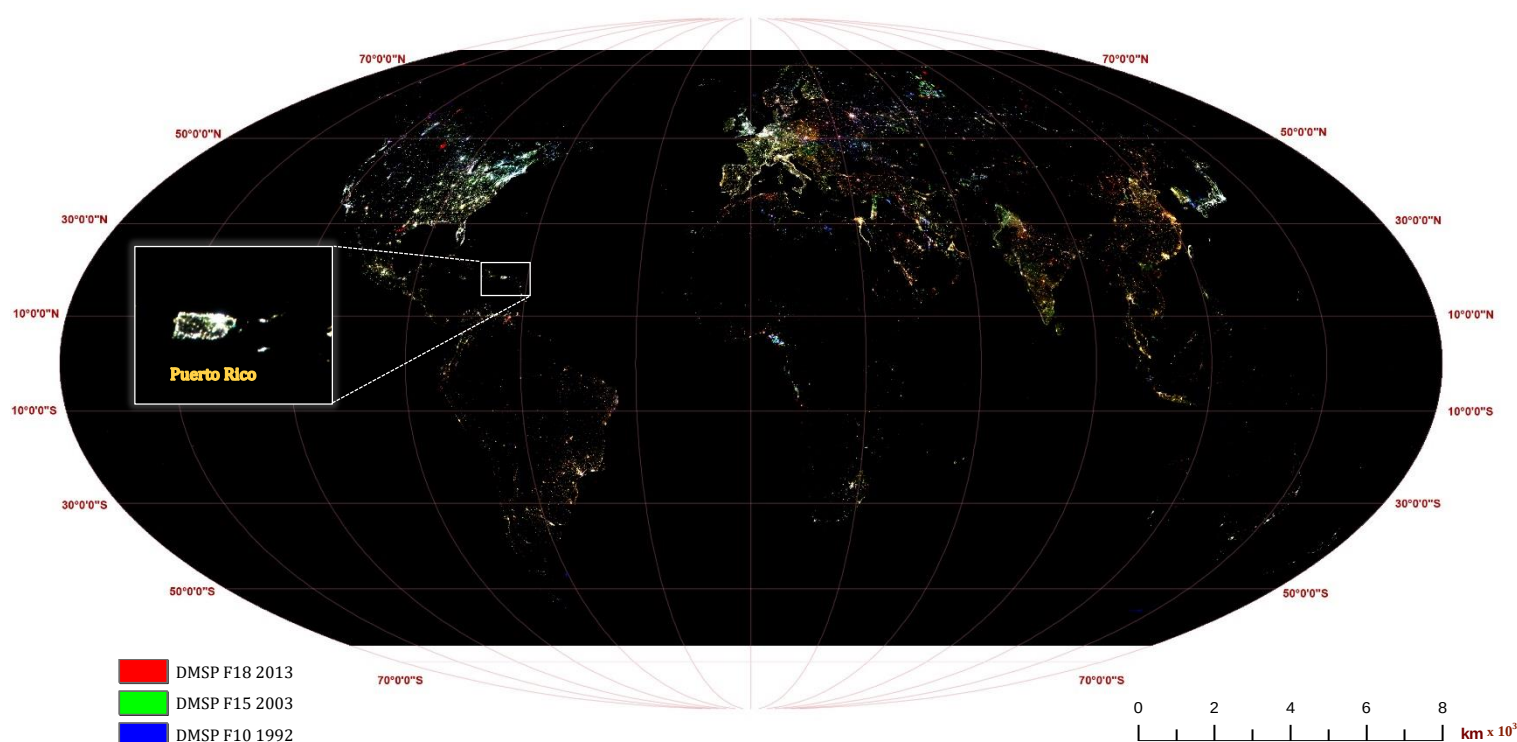
Υπάρχουν τρεις σημαντικές παράμετροι που προσπαθεί να αντιμετωπίσει η βαθμονόμηση των δορυφορικών δεδομένων νυχτερινού φωτισμού (Wu et al., 2013):

-  Την υψηλή ανομοιογένεια που παρατηρείται στα δεδομένα ακόμα και σε αυτά που συλλέγονται κατά την ίδια χρονική περίοδο
-  Οι διαφορές στην χρονική περίοδο λήψης μπορεί να οδηγήσει σε τυχαίες ή συστηματικές διακυμάνσεις στις ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων των εικόνων που συλλέγονται από δορυφόρους σε διαφορετικά ύψη τροχιάς
-  Την διόρθωση των κορεσμένων εικονοστοιχείων (overglow) που εντοπίζονται στους πυρήνες των αστικών κέντρων

Για την αντιμετώπιση όλων των παραπάνω, πραγματοποιήθηκε σχετική ραδιομετρική βαθμονόμηση προκειμένου να βελτιωθεί η συνοχή και η συγκρισιμότητα της χρονοσειράς δεδομένων. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται στηρίζεται στην ύπαρξη περιοχών οι οποίες κατά το χρονικό διάστημα αναφοράς δεν παρουσιάζουν σημαντικές τάσεις αυξομείωσης στις εκπομπές νυχτερινού φωτισμού. Η εύρεση των επιθυμητών αυτών περιοχών μπορεί να στηριχθεί αφενός στην διερεύνηση και ανάλυση στατιστικών στοιχείων που συνδέονται άμεσα με τις νυχτερινές εκπομπές φωτισμού, όπως ο πληθυσμός ή η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, τον βαθμό συσχέτισης μεταξύ των ψηφιακών τιμών φωτεινότητας για διαφορετικά έτη, αλλά και στην αξιολόγηση της χωρικής κατανομής των εκπομπών φωτισμού στις δορυφορικές εικόνες DMSP. Η αναζήτηση μιας τέτοιας ιδανικής περιοχής εντός των γεωγραφικών

ορίων της περιοχής μελέτης δεν ήταν επιτυχής καθώς από την ανάλυση των παραπάνω μεταβλητών βρέθηκε ότι παρότι το προφίλ ορισμένων νομών (π.χ. Φλώρινα) παραμένει σχεδόν αμετάβλητο, ωστόσο το εύρος ψηφιακών τιμών φωτεινότητας που τους αναλογεί είναι ολιγαρκές.

Για την εύρεση της πειραματικής περιοχής σε παγκόσμιο επίπεδο, δημιουργήθηκε μια σύνθετη ψευδέχρωμη εικόνα σε συνδυασμό RGB χρησιμοποιώντας τρία έτη με μεγάλο χρονικό εύρος (Σχήμα 2.6).



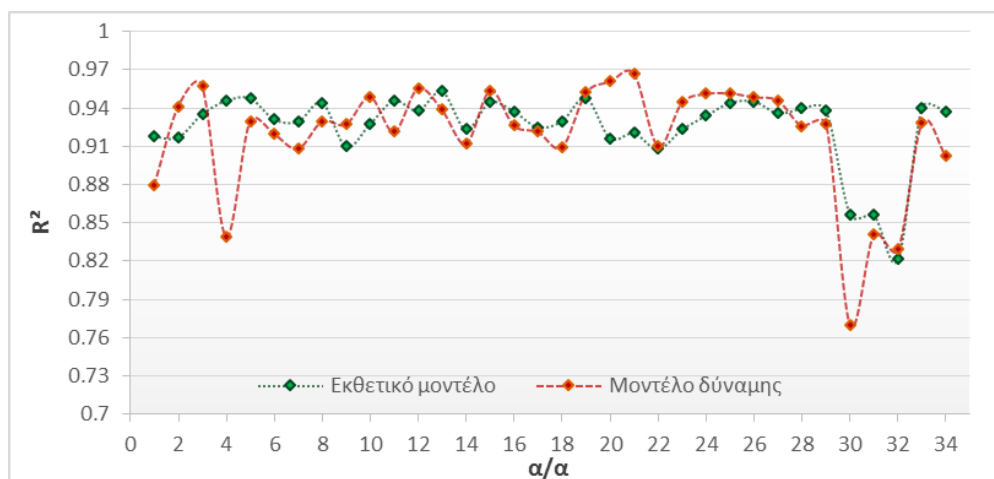
Σχήμα 2.6. Σύνθετη ψευδέχρωμη εικόνα των δεδομένων νυχτερινού φωτισμού σε συνδυασμό RGB. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

Στην χρωματική αυτή σύνθεση της ψευδέχρωμης εικόνας, αποχρώσεις του κόκκινου αντιστοιχούν σε περιοχές στις οποίες η αναλογία των ψηφιακών τιμών φωτεινότητας της δορυφορικής εικόνας DMSP F18 2013 είναι μεγαλύτερη από αυτή των δύο υπόλοιπων εικόνων κ.ο.κ. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην εύρεση γεωγραφικών περιοχών στις οποίες η αναλογία των τιμών λαμπρότητας στο χρονικό διάστημα αναφοράς να είναι εν δυνάμει ισοδύναμη, αποδίδοντας έτσι χρωματικές αποχρώσεις του άσπρου. Εξετάζοντας σχολαστικά την παραπάνω ψευδέχρωμη εικόνα, βρέθηκε ότι ορισμένες περιοχές πληρούν σε μεγάλο βαθμό αυτό το κριτήριο. Οι περιοχές αυτές αντιστοιχούν στις χώρες του Μαυρίκιου, του Puerto Rico καθώς και της περιφέρειας

Okinawa στην Ιαπωνία (Wu et al., 2013). Ως πειραματική περιοχή επιλέχθηκε το Puerto Rico καθώς τόσο το αμετάβλητο προφίλ που παρουσιάζει ως προς την χωρική κατανομή των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού, όσο και το μεγάλο εύρος τιμών λαμπρότητας (0 – 63) το οποίο θα βελτίωνε την ακρίβεια της βαθμονόμησης. Επιπλέον το γεγονός ότι γεωγραφικά εντοπίζεται μακριά από την ηπειρωτική χώρα, σπάνια επηρεάζεται από νυχτερινές πηγές φωτισμού από γειτονικές περιοχές (Wu et al., 2013).

Το επόμενο βήμα αφορά την επιλογή της εικόνας αναφοράς βάση της οποίας θα στηριχθεί η σχετική (δια)βαθμονόμηση της χρονοσειράς δεδομένων. Πρόσφατα, η NGDC παρέχει στην ΨΒΔ ένα νέο σύνολο ραδιομετρικά βαθμονομημένων εικόνων για ορισμένες χρονικές περιόδους. Ως εικόνα αναφοράς επιλέχθηκε η δορυφορική εικόνα της περιόδου 2002 – 2003 καθώς έναντι των υπόλοιπων εικόνων εμφανίζει τις υψηλότερες αθροιστικές τιμές στη πειραματική περιοχή. Στη συνέχεια οι ραδιομετρικές τιμές της εικόνας αναφοράς και των υπόλοιπων δορυφορικών εικόνων στην πειραματική περιοχή, εξήχθησαν και αποθηκεύτηκαν σε πίνακες.

Στο τελευταίο στάδιο, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση παλινδρόμησης για την εύρεση της μαθηματικής σχέσης η οποία θα εκφράζει την αλληλοεξάρτηση μεταξύ των τιμών των δεδομένων. Από την ανάλυση των διαγραμμάτων σκεδασμού κάθε εικόνας βρέθηκε ότι δεν είναι δυνατή η προσαρμογή ενός γραμμικού μαθηματικού μοντέλου επομένως κρίθηκε αναγκαίος ο μετασχηματισμός της ανεξάρτητης μεταβλητής (stable lights).



Σχήμα 2.7. Συντελεστής προσδιορισμού των δύο μοντέλων παλινδρόμησης.

Πηγή: Προσωπική επεξεργασία

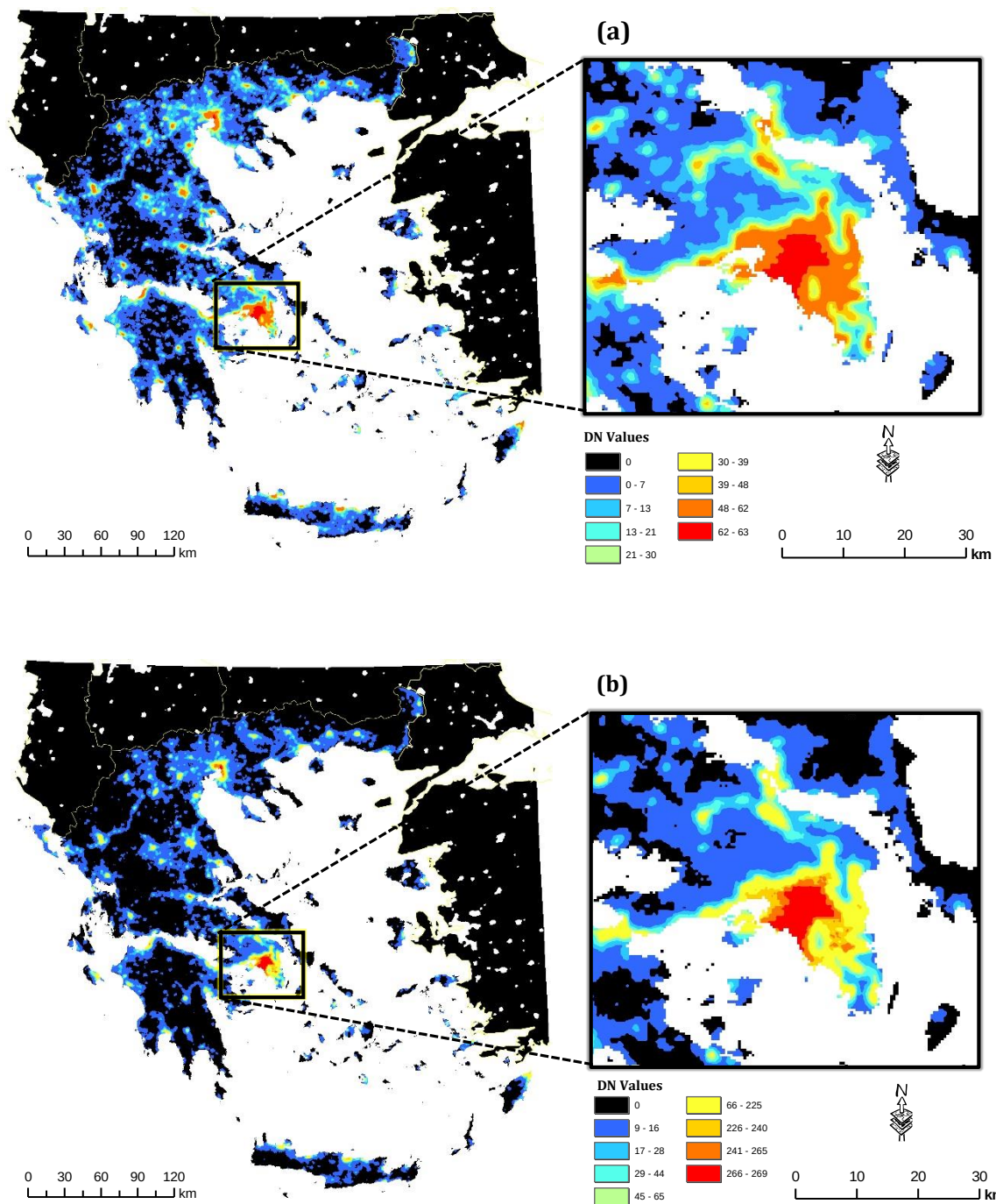
Ύστερα από διερεύνηση βρέθηκε ότι η εκθετική συνάρτηση της μορφής $y = e^x$, καθώς και η συνάρτηση δύναμης της μορφής $y = x^a$, προσαρμόζονται ικανοποιητικά

στα δεδομένα. Εξετάζοντας τις τιμές του συντελεστή προσδιορισμού των δύο μοντέλων για κάθε εικόνα, κρίθηκε ως καταλληλότερο το εκθετικό καθώς η συνέχεια που εμφανίζει είναι πιο ομαλή σε σχέση με το μοντέλο δύναμης (σχήμα 2.7). Επομένως το μαθηματικό μοντέλο για τη βαθμονόμηση των δορυφορικών εικόνων έχει την παρακάτω μορφή:

$$y + 1 = \beta \times e^{a \times (x+1)} \Leftrightarrow DN_{cb} + 1 = \beta \times e^{a \times (DN+1)}, \quad (2)$$

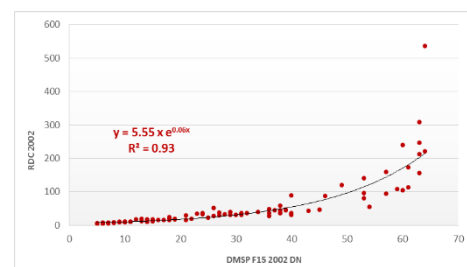
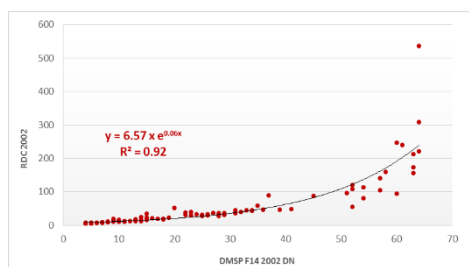
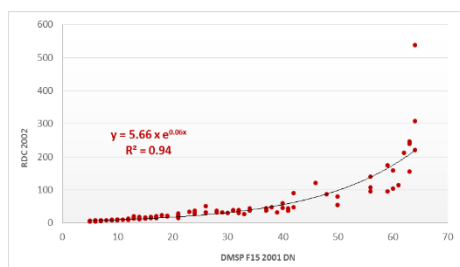
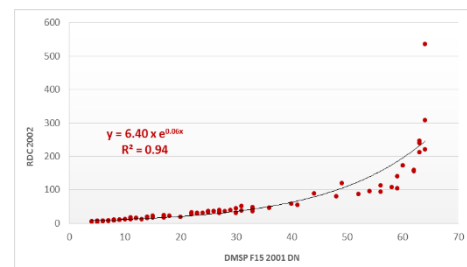
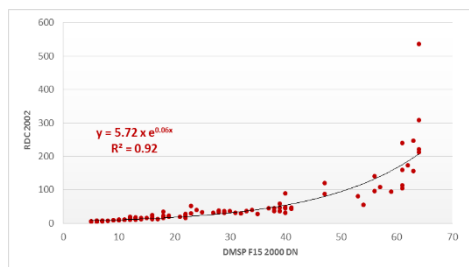
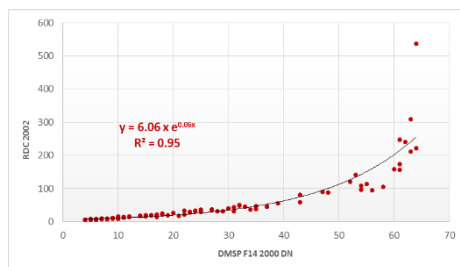
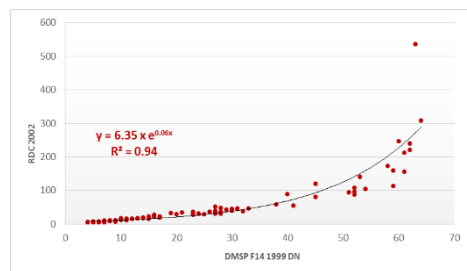
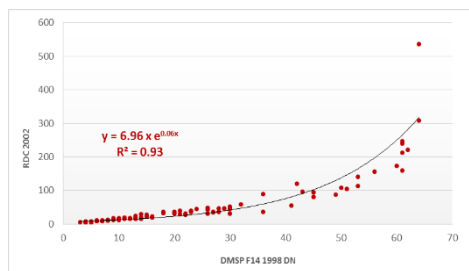
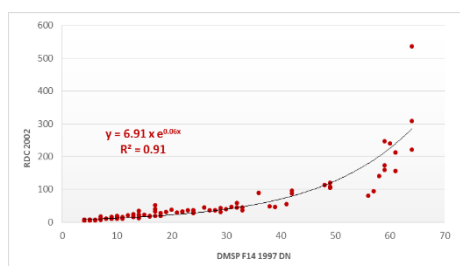
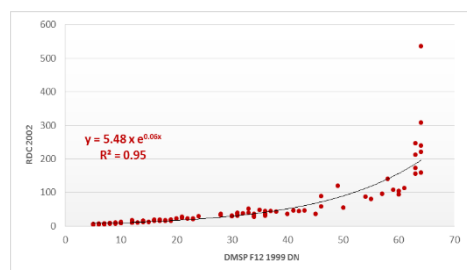
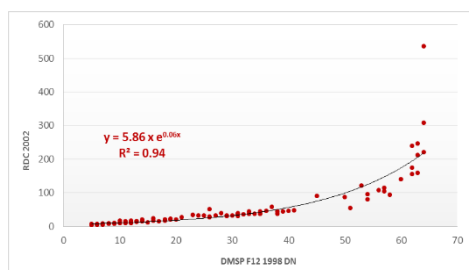
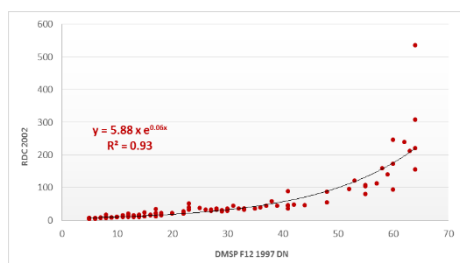
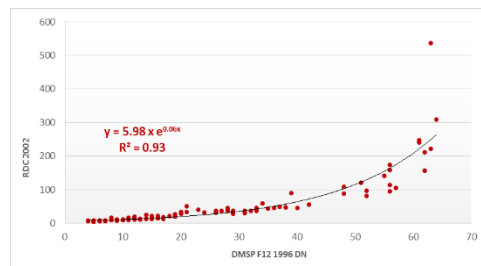
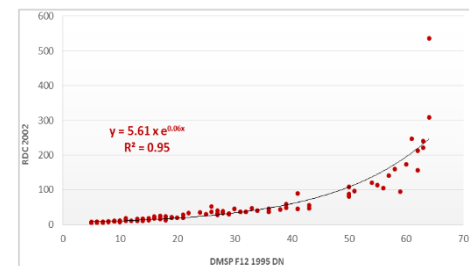
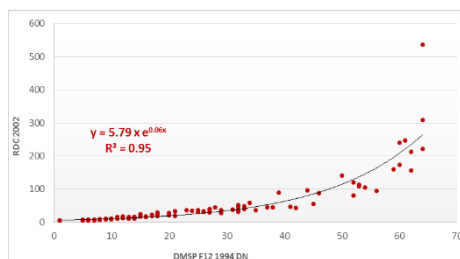
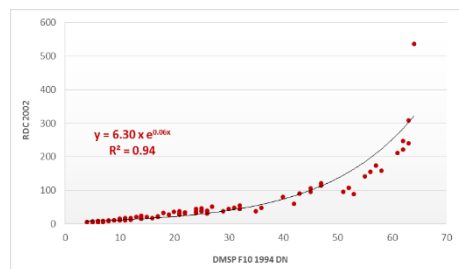
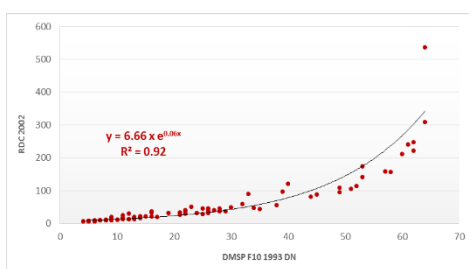
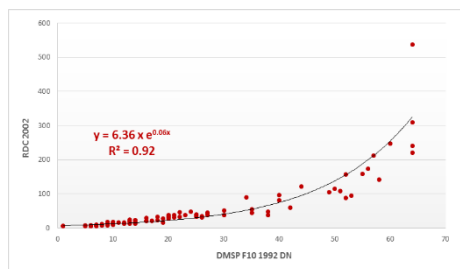
όπου DN_{cb} είναι οι νέες ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων των εικόνων, DN είναι οι αρχικές ψηφιακές τιμές και β η παράμετρος του μοντέλου η οποία εκτιμήθηκε με την Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων (MET). Οι εξισώσεις των μοντέλων παλινδρόμησης των δορυφορικών εικόνων απεικονίζονται στο σχήμα 2.9. Οι σχέσεις αυτές εφαρμόστηκαν για την προσαρμογή των ψηφιακών τιμών φωτεινότητας των Stable lights σε εκείνο των RDC εικόνων. Καθώς η εικόνα αναφοράς έχει υποστεί ραδιομετρική διόρθωση, τόσο η βαθμονόμηση όσο και η διόρθωση του φαινομένου *overglow* που παρατηρείται στα δεδομένα σταθερού φωτισμού στους πυρήνες των αστικών κέντρων, μπορεί να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα (Wu et al., 2013).

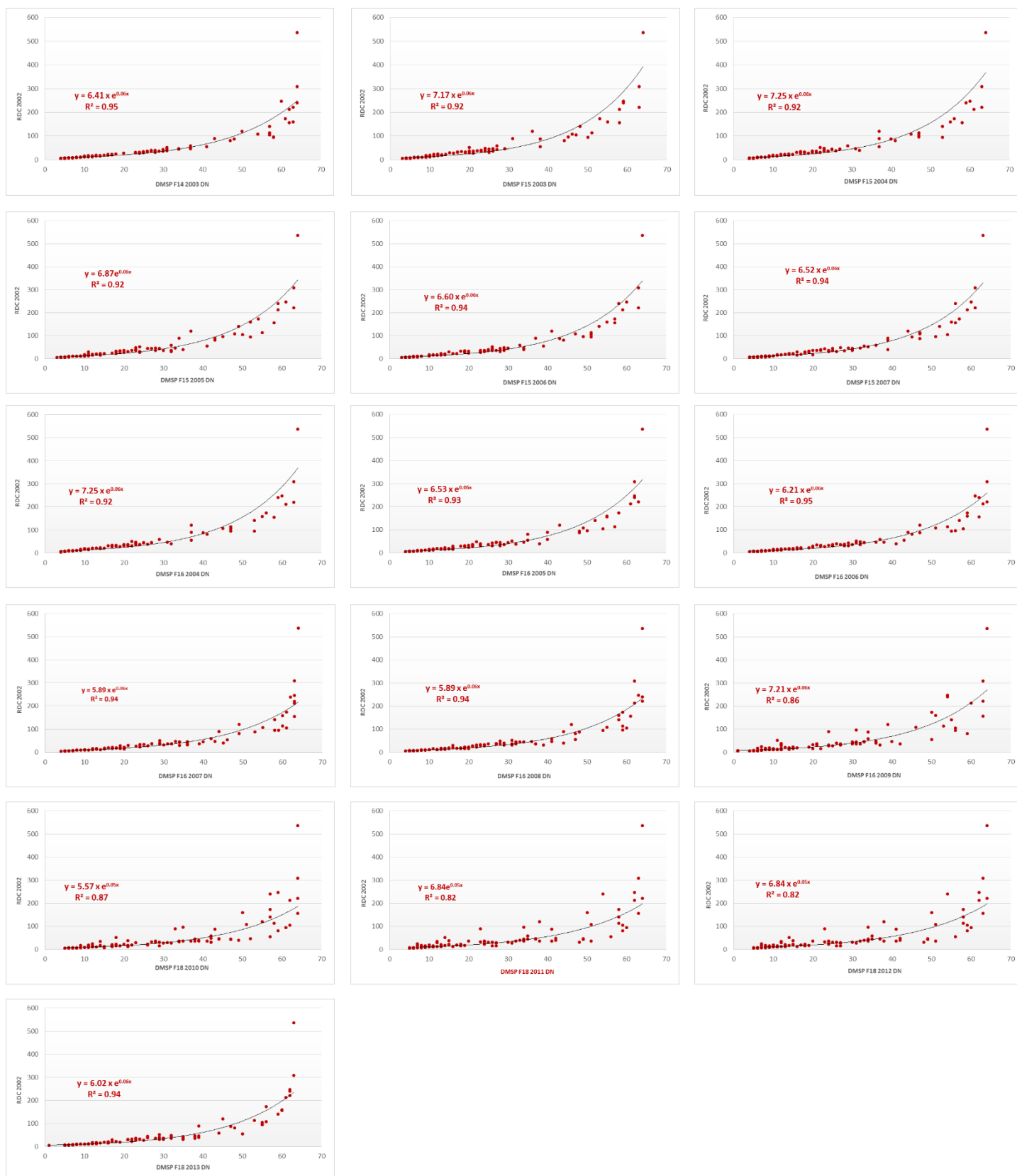
Για λόγους συγκρισιμότητας στο σχήμα 2.8 απεικονίζονται οι ΝΕΦ όπως καταγράφηκαν από τον δορυφόρο DMSP-OLS F16 το έτος 2009 με βάση τις πρωτογενείς ψηφιακές τιμές (Εικόνα α) και με βάση τις νέες διορθωμένες τιμές όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας (Εικόνα β). Η χωρική έκταση που καταλαμβάνουν οι πηγές νυχτερινού φωτισμού στην Εικόνα α χαρακτηρίζονται από έντονη διάχυση κυρίως περιμετρικά των αστικών κέντρων (*overglow*), ενώ διάσπαρτα συσσωματώματα ψηφιακών τιμών χαμηλής φωτεινότητας εντοπίζονται σε επαρχιακές απομονωμένες περιοχές. Αντίθετα, η χωρική κατανομή που παρουσιάζουν οι ΝΕΦ στην Εικόνα β αντανακλά σε μεγαλύτερο βαθμό την πραγματική χωρική έκταση των πηγών τεχνητών φωτισμού, ενώ είναι ακόμα δυνατή η διαφοροποίηση των τιμών εντός των πυρήνων των αστικών κέντρων. Παρόλα αυτά και στην δεύτερη περίπτωση παρατηρείται υπερεκτίμηση της πραγματικής έκτασης των πηγών φωτισμού, γεγονός που περιορίζεται σημαντικά με την εφαρμογή τεχνικών τμηματοποίησης η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 2.8 Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στον Ελλαδικό χώρο το έτος 2009. Στην εικόνα α, απεικονίζεται η χωρική κατανομή των πρωτογενών ψηφιακών τιμών φωτεινότητας ενώ στην εικόνα β οι βαθμονομημένες τιμές. Η ταξινόμηση των τιμών πραγματοποιήθηκε για την ανάδειξη των διαφορών των δύο εικόνων.

Πηγή: Προσωπική επεξεργασία





Σχήμα 2.9. Εξισώσεις παλινδρόμησης για την σχετική ραδιομετρική βαθμονόμηση της χρονοσειράς δορυφορικών εικόνων DMSP Stable Lights. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

2.2.1.2.1 Αξιολόγηση της μεθόδου βαθμονόμησης

Για την αξιολόγηση του βαθμού επιτυχίας της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τη βαθμονόμηση των δορυφορικών δεδομένων του τύπου Stable lights αναπτύχθηκαν και κατασκευάστηκαν ορισμένοι στατιστικοί δείκτες και γραφήματα παρέχοντας έτσι ένα ποσοτικό μέσο σύγκρισης της «ποιότητας» των δεδομένων, πριν και μετά την σχετική ραδιομετρική βαθμονόμηση. Αρχικά οι νέες βαθμονομημένες εικόνες εισήχθησαν στη γεωβάση, αποκόπηκαν στα όρια της περιοχής μελέτης και αξιοποιώντας λειτουργίες υπέρθεσης υπολογίστηκαν οι μέσες και συνολικές αθροιστικές τιμές φωτεινότητας τόσο στο σύνολο της χώρας όσο και σε επίπεδο νομών για όλη την χρονοσειρά δεδομένων. Οι αθροιστικές τιμές φωτεινότητας, SOL (Sum of Lights), και οι μέσες τιμές φωτεινότητας (AOL, Average of Lights) αποτελούν τους δείκτες αξιολόγησης της επιτυχίας της βαθμονόμησης και μαθηματικά μπορούν να εκφραστούν με τις παρακάτω σχέσεις:

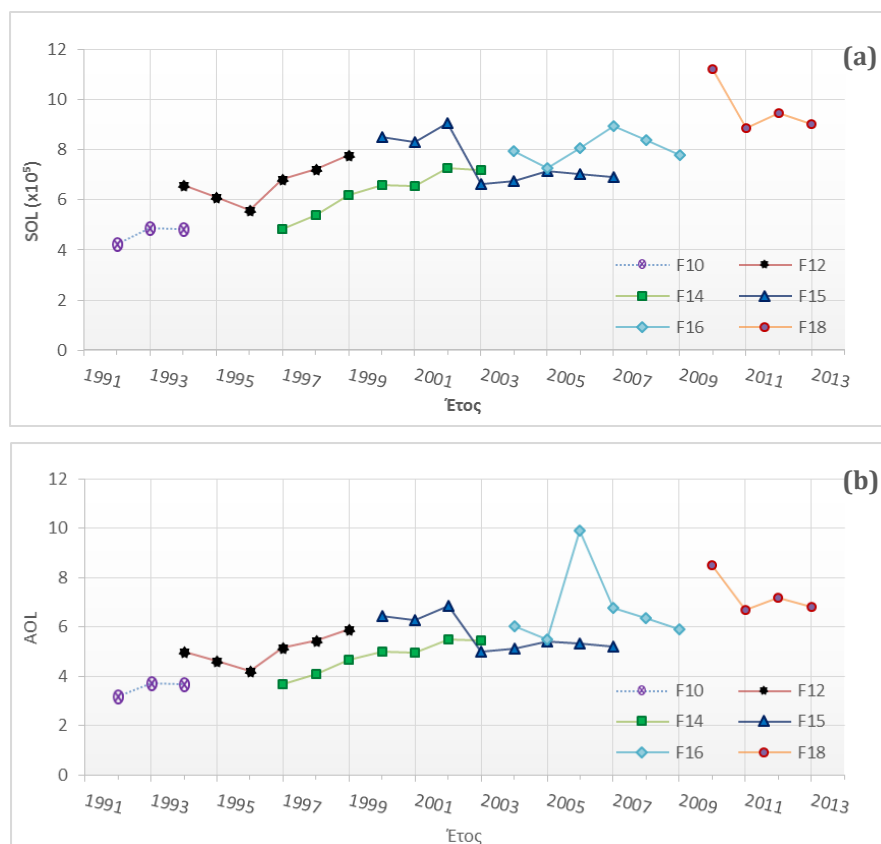
$$SOL = \sum_i DN_i \times f_i, \quad (3)$$

$$AOL = \frac{\sum_i DN_i \times f_i}{\sum f_i}, \quad (4)$$

Όπου DN_i είναι η τιμή απόχρωσης του γκρι των στην τιμή των i εικονοστοιχείων, και f_i ο αριθμός των i εικονοστοιχείων στην αντίστοιχη τιμή φωτεινότητας.

Μια σαφής ένδειξη επιτυχημένης βαθμονόμησης αποτελεί η βελτίωση της συνοχής της χρονοσειράς δεδομένων σε χρονικές περιόδους συλλογής από δύο διαφορετικούς δορυφόρους, αλλά και την σταθεροποίηση της ετήσιας διακύμανσης του ίδιου του δορυφόρου (Elvidge et al., 2009, 2013; Wu et al., 2013). Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζονται οι αθροιστικές και μέσες τιμές φωτεινότητας (SOL) των ετήσιων πρωτογενών δορυφορικών προϊόντων. Και στα δύο γραφήματα παρατηρείται ότι δεν υπάρχει μια σαφής τάση και σύγκλιση τιμών τόσο μεταξύ των τιμών στο σύνολο της χρονοσειράς όσον αφορά τις τιμές μεταξύ ενός δορυφόρου όσο και στις περιπτώσεις συλλογής ετήσιων δεδομένων από δύο δορυφόρους. Για παράδειγμα το έτος 1997 ο δορυφόρος F14 κατέγραψε SOL της τάξης των 4.83×10^5 ενώ αντίστοιχα για το ίδιο έτος η τιμή SOL που αντιστοιχεί στον δορυφόρο F12 είναι 6.83×10^5 . Παρομοίως το έτος 2007 η τιμή SOL για τον δορυφόρο F15 είναι 6.89×10^5 ενώ αντίστοιχα η τιμή που κατέγραψε ο δορυφόρος F16 ανέρχεται στα 8.92×10^5 πλήθος εικονοστοιχείων

που αντιστοιχούν σε φωτοβολούμενες περιοχές. Ανάλογες διαφοροποιήσεις παρατηρούνται και στις τιμές του δείκτη AOL(Σχήμα 2.10.b).

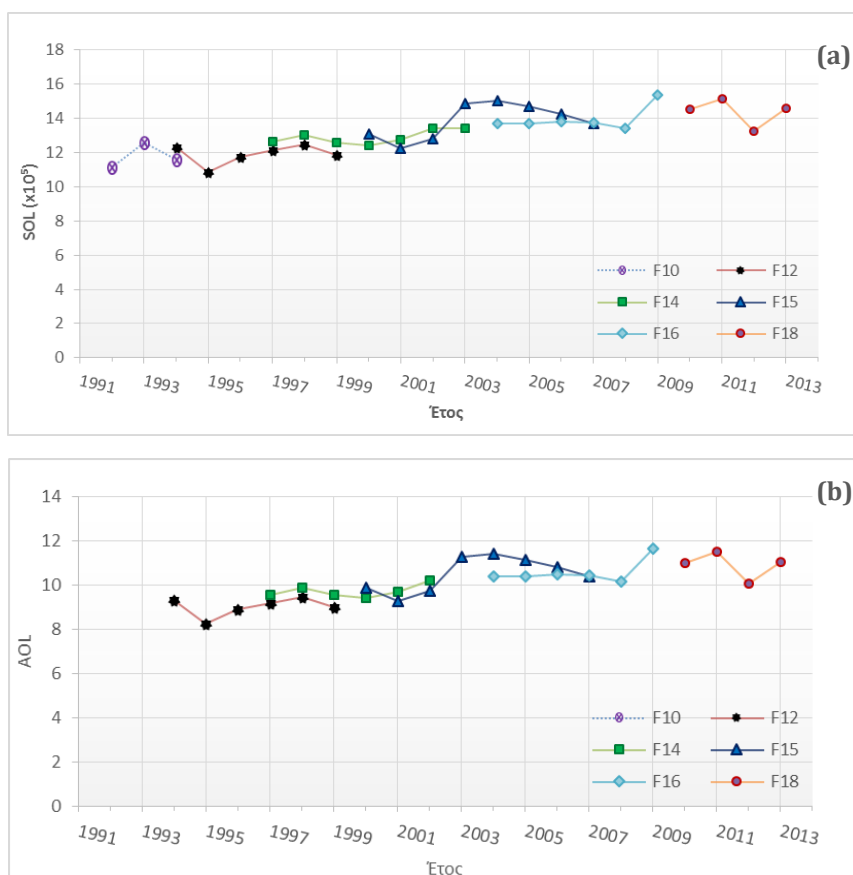


Σχήμα 2.10. Αθροιστικές και μέσες τιμές φωτεινότητας (SOL) στο σύνολο του Ελλαδικού χώρου της χρονοσειράς των πρωτογενών δορυφορικών δεδομένων DMSP - OLS Stable lights.
Πηγή: Προσωπική επεξεργασία

Επιπλέον, αφύσικες διακυμάνσεις παρατηρούνται στις τιμές SOL και AOL που καταγράφονται από έναν δορυφόρο για διαφορετικά έτη. Για παράδειγμα το έτος 2002 ο δορυφόρος F16 κατέγραψε τιμή SOL της τάξης των 9.07×10^5 ενώ το αμέσως επόμενο έτος η τιμή αυτό μειώθηκε κατά 27% με τιμή SOL 6.62×10^5 . Αντίστοιχα, η τιμή AOL 5.5 του δορυφόρου F16 για το έτος 2005 αυξήθηκε αφύσικα ραγδαία το επόμενο έτος κατά 80%, με τιμή 9.9. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, η άμεση σύγκριση και διαχρονική ανάλυση των πρωτογενών δορυφορικών προϊόντων θα οδηγούσε σε παραπλανητικά αποτελέσματα και εν τέλει σε λανθασμένα συμπεράσματα, καθώς οι παρατηρηθείσες μεταβολές στις τιμές φωτεινότητας δεν μπορεί να εξακριβωθεί αν όντως οφείλονται σε πραγματικές μεταβολές των επίγειων πηγών νυχτερινού φωτισμού (αύξηση ή μείωση) ή οφείλονται σε διαφοροποιήσεις των

επιπέδων κέρδους (gain) του σήματος του αισθητήρα OLS των δορυφόρων DMSP (Doll., 2008).

Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζονται οι στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης SOL, και AOL για τις νέες βαθμονομημένες εικόνες όπως προέκυψαν ύστερα από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας.



Σχήμα 2.11. Αθροιστικές και μέσες τιμές φωτεινότητας (SOL) στο σύνολο του Ελλαδικού χώρου της χρονοσειράς των βαθμονομημένων δορυφορικών δεδομένων DMSP - OLS Stable lights.

Πηγή: Προσωπική επεξεργασία

Συγκρίνοντας τα γραφήματα του Σχήματος 2.10, 2.11 γίνεται αντιληπτή η αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας στη βαθμονόμηση των δορυφορικών δεδομένων. Πράγματι, τόσο οι τιμές του δείκτη SOL όσο και του AOL παρουσιάζουν πλέον μια σαφή σταθερή ανοδική τάση στο σύνολο της χρονοσειράς δεδομένων. Οι έντονες διακυμάνσεις των τιμών μεταξύ δύο διαφορετικών δορυφόρων έχουν εξαλειφθεί σημαντικά και διαφαίνεται μια ικανοποιητική σύγκλιση. Για παράδειγμα, το έτος 1997 η τιμή SOL του δορυφόρου F14 είναι ίση με 12.6×10^5 ενώ αντίστοιχα

για το ίδιο έτος η τιμή SOL που αντιστοιχεί στον δορυφόρο F12 είναι 12.1×10^5 . Επιπλέον, οι αφύσικες διακυμάνσεις που παρατηρούνται στις τιμές SOL και AOL των πρωτογενών δεδομένων που συλλέγονται διαχρονικά από έναν δορυφόρο έχουν επίσης περιοριστεί σημαντικά. Για παράδειγμα η αφύσικη αύξηση 80% της τιμής AOL του δορυφόρου DMSP F16 κατά την περίοδο 2005 – 2006 πλέον αναλογεί σε 1% η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι οφείλεται σε φυσική αύξηση αιτιωδών παραγόντων όπως ο πληθυσμός, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κ.α. Συνοψίζοντας, από την ανάλυση των παραπάνω αποτελεσμάτων η επιτυχία της βαθμονόμησης επετεύχθη σε ικανοποιητικό βαθμό στην περιοχή μελέτης.

2.2.2 Βελτιώσεις και μετασχηματισμοί των εικόνων

2.2.2.1 Τμηματοποίηση δορυφορικών εικόνων

Η *τμηματοποίηση εικόνας* (Image segmentation) είναι η διαδικασία με την οποία διαχωρίζεται μια εικόνα σε κατάλληλες περιοχές ή “αντικείμενα” που εμπεριέχονται σε αυτή (Παπαμάρκος, 2010). Καθώς στην παρούσα εργασία επιχειρείται η διαχρονική ανάλυση των μεταβολών στα χωρικά πρότυπα των τεχνητών πηγών φωτισμού, ως περιοχές ενδιαφέροντος αποτελούν οι ομάδες εικονοστοιχείων συγκεκριμένου εύρους τιμών οι οποίες αντιστοιχούν στις φωτοβολούμενες περιοχές. Η εύρεση, και ο διαχωρισμός των περιοχών αυτών από αντικείμενα του προσκηνίου (foreground) αποτελεί αναγκαίο στάδιο στην επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων. Ορισμένες από τις ισχυρότερες μεθόδους τμηματοποίησης εικόνων αποτελούν οι τεχνικές κατωφλίωσης (thresholding) και πολυκατωφλίωσης (multilevel thresholding). Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκαν τεχνικές της πρώτης κατηγορίας, και συγκεκριμένα η τεχνική του *καθολικού κατωφλίου* (global thresholding).

Οι τεχνικές κατωφλίωσης στηρίζονται στην ανάλυση του ιστογράμματος, με σκοπό την εύρεση μιας τιμής φωτεινότητας (κατώφλι) βάση της οποίας διαχωρίζεται η εικόνα σε δύο ομάδες εικονοστοιχείων. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ένας σημαντικός αριθμός μελετών σχετικών με την κατωφλίωση των δορυφορικών εικόνων DMSP σταθερού φωτισμού. Στη πλειονότητά τους οι μελέτες αυτές εξετάζουν την ικανότητα των δεδομένων νυχτερινού φωτισμού στον προσδιορισμό της χωρικής έκτασης των αστικών ιστών σε διάφορα επίπεδα ανάλυσης. Η καθολική κατωφλίωση των δορυφορικών δεδομένων έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να αποτελέσει μια ικανοποιητική

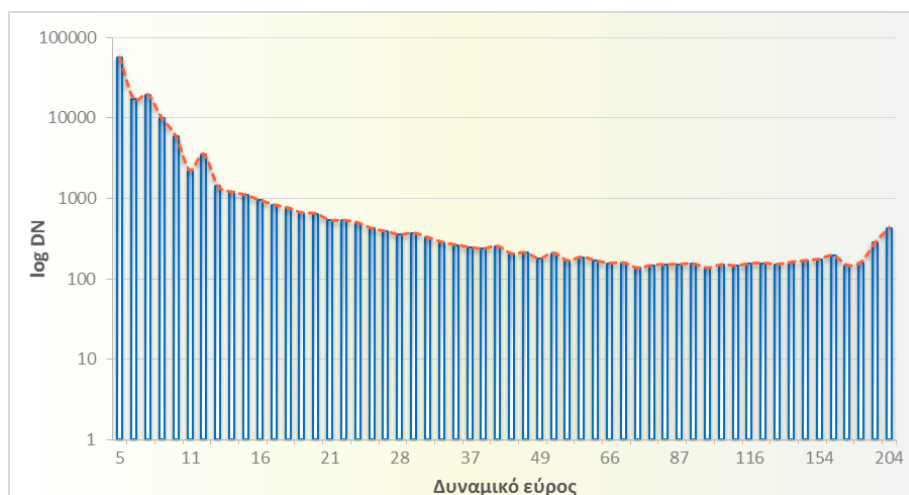
μέθοδο για την χαρτογράφηση των αστικών προτύπων σε περιφερειακό και διεθνές επίπεδο ανάλυσης (Imhoff et al., 1997; Amaral et al., 2005, Sutton, Elvidge & Ghosh, 2007; Zhao, Ghosh & Samson, 2007. Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες αναφέρουν ότι δεν είναι δόκιμη η εφαρμογή μιας καθολικής τιμής κατωφλίου σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς χωρικές διαφοροποιήσεις ως προς το φυσικό περιβάλλον και τα επίπεδα κοινωνικό-οικονομικής ανάπτυξης της εκάστοτε περιοχής, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη περισσότερο πολύπλοκων τεχνικών κατωφλίωσης και πολυκατωφλίωσης όπως η μέθοδος ανάπτυξης περιοχών (Zhou et al., 2014) και άλλων (Henderson et al., 2003, Small et al., 2005, Cao et al., 2009; Liu et al., 2012).

Καθώς το ενδιαφέρον της παρούσας εργασίας εστιάζει στην χωροχρονική ανάλυση των ΝΕΦ στο σύνολο του Ελλαδικού χώρου, γίνεται η παραδοχή ότι η εφαρμογή ενός καθολικού κατωφλίου για κάθε δορυφορική εικόνα της χρονοσειράς δεδομένων θα εξυπηρετήσει τις ανάγκες και τους σκοπούς που τέθηκαν.

2.2.2.1.1 Κατωφλίωση με προσέγγιση του ιστογράμματος των εικόνων

Το ιστόγραμμα μιας εικόνας αποχρώσεων του γκρι παρουσιάζει ένα σύνολο πολύτιμων πληροφοριών που εμπεριέχονται σε αυτή, και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνων (Παπαμάρκος, 2010). Σε αυτήν την ενότητα εφαρμόζονται τεχνικές και μέθοδοι βελτιστοποίησης των δορυφορικών εικόνων του νυχτερινού φωτισμού οι οποίες ως επί το πλείστον στηρίζονται στην ανάλυση και τροποποίηση του ιστογράμματος των εικόνων.

Οι ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων των βαθμονομημένων εικόνων εξήχθησαν σε νέους πίνακες στους οποίους για κάθε τιμή απόχρωσης του γκρι καταγράφεται ο συνολικός αριθμός εμφάνισης των εικονοστοιχείων στο επίπεδο αυτό. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τα ιστογράμματα των εικόνων για την ανάλυση και διερεύνηση της κατανομής των τιμών φωτεινότητας με κύριο σκοπό την εύρεση των βέλτιστων κατωφλίων για κάθε δορυφορική εικόνα, βάσει των οποίων θα διαχωριστούν εν συνεχεία ομάδες εικονοστοιχείων συγκεκριμένου εύρους τιμών της κλίμακας του γκρι. Στο Σχήμα 2.12 απεικονίζεται το ιστόγραμμα της βαθμονομημένης εικόνας DMSP F18 για το έτος 2012. Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης εικονοστοιχείων στο κατώτατο όριο του γραφήματος, στην τιμή 5 η οποία αντιστοιχεί στις σκοτεινές περιοχές με απουσία φωτισμού, οι τιμές μετασχηματίστηκαν με βάση τον $\log_{10}$.



Σχήμα 2.12. Συχνότητα τιμών της δορυφορικής εικόνας DMSP – OLS F18 του έτους 2012. Οι τιμές φωτεινότητας μετασχηματίζεται με βάση τον $\log_{10}$ προκειμένου να είναι εμφανής η συχνότητα στο σύνολο του δυναμικού εύρους. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

Η διαδικασία αναζήτησης του ιδανικού κατωφλίου μέσω της οπτικής ερμηνείας ιστογράμματος καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη καθώς η κατανομή συχνότητας των τιμών των εικονοστοιχείων προσδίδει μια ιδιαίτερη μορφή, με ποικίλες εξάρσεις και “κοιλάδες”. Στην ιδανική περίπτωση το ιστόγραμμα της εικόνας θα αποτελούταν από δύο ξεκάθαρους “λόφους” (bimodal histogram) γεγονός που θα διευκόλυνε την διαδικασία επιλογής του βέλτιστου κατωφλίου.

2.2.2.1.2 Κατωφλίωση με τη μέθοδο του Otsu

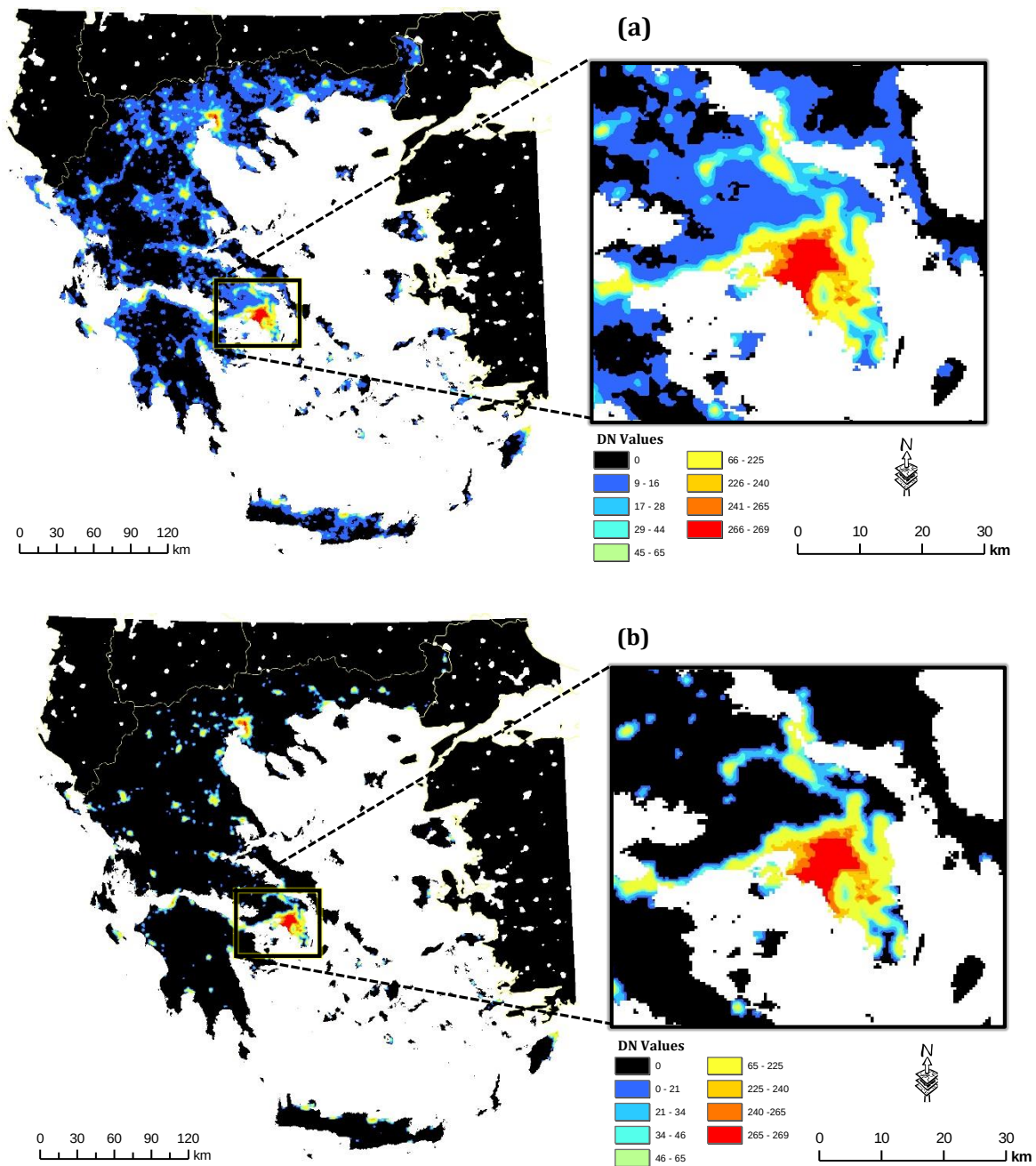
Για την κατωφλίωση των δορυφορικών εικόνων επιλέχθηκε η μέθοδος του Otsu (Otsu, 1979) η οποία αποτελεί μια από τις ισχυρότερες τεχνικές εύρεσης κατωφλίου. Στην μέθοδο αυτή το κριτήριο για την επιλογή του βέλτιστου κατωφλίου είναι η ελαχιστοποίηση της ενδο-ομαδικής και η μεγιστοποίησης της δια-ομαδικής διακύμανσης των κλάσεων. Η εφαρμογή της μεθόδου του Otsu πραγματοποιήθηκε στο διαδραστικό περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού Matlab στο οποίο έγινε η συγγραφή του αλγόριθμου για την υλοποίηση της μεθόδου Otsu (Παπαμάρκος, 2010). Η εκτέλεση του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε διαδοχικά για το σύνολο των 34 βαθμονομημένων δορυφορικών εικόνων και το αποτέλεσμα είναι νέες δυαδικές εικόνες στις οποίες εικονοστοιχεία με τιμές φωτεινότητας ίση ή μικρότερη του κατωφλίου λαμβάνουν την τιμή 0 (εικονοστοιχεία προσκήνιου) ενώ όλα τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία επιλέχθηκε να διατηρούν τις τιμές τους (φωτοβολούμενες περιοχές).

Δηλαδή, αν $g(x,y)$ είναι η νέα δυαδική εικόνα ύστερα από την εφαρμογή του κατωφλίου, και $f(x,y)$ η αρχική εικόνα τότε

$$g(x,y) = \begin{cases} f(x,y), & f(x,y) > T \\ 0, & f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (5)$$

Όπου T η τιμή κατωφλίου όπως προέκυψε με την εφαρμογή της μεθόδου του Otsu. Οι τιμές κατωφλίων που υπολογίστηκαν για κάθε εικόνα κυμαίνονται μεταξύ των τιμών φωτεινότητας 19 – 21. Αντίστοιχες τιμές κατωφλίων στην βιβλιογραφία κυμαίνονται μεταξύ 10 και 48 για την ευρύτερη περιοχή της Κίνας (Zhao Ghosh & Samson, Cao et al., 2009), 30 για τις χώρες της Ινδίας, Τουρκίας, Κίνας και ΗΠΑ (Sutton et al., 2007). Παρατηρείται ότι τα κατώφλια ακόμα και για την ίδια γεωγραφική περιοχή διαφέρουν μεταξύ των αναλυτών, γεγονός που αναδεικνύει την υποκειμενικότητα που εμπεριέχεται στην διαδικασία επιλογής του ιδανικού κατωφλίου. Είναι προφανές ότι η βέλτιστη επιλογή του κατωφλίου αποτελεί το κρίσιμότερο στάδιο στις τεχνικές τμηματοποίησης εικόνας καθώς διαφορετικά κατώφλια δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει ότι εύκολα ο αναλυτής μπορεί να συμπεριλάβει εξωγενείς ομάδες εικονοστοιχείων που δεν αποτελούν μέρος των τελικών επιθυμητών περιοχών, και το αντίστροφο, δηλαδή την αγνόηση σημαντικού μέρους εικονοστοιχείων με αποτέλεσμα την απώλεια πληροφοριών.

Για την αξιολόγηση της επιτυχίας της μεθόδου για τον διαχωρισμό των κλάσεων των εικονοστοιχείων σε φωτεινές και μη φωτεινές περιοχές, στις νέες τμηματοποιημένες εικόνες υπερέθηκαν δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης του λογισμικού Google Earth. Από την ανάλυση βρέθηκε ότι η γεωμετρική ταύτιση των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν στις φωτοβολούμενες περιοχές με τις ανθρώπινες εγκαταστάσεις ήταν ικανοποιητική. Επιπρόσθετα, πέραν του προσδιορισμού των επιθυμητών περιοχών με την τμηματοποίηση των δορυφορικών εικόνων DMSP επιτυγχάνεται και η ελάττωση του θορύβου που οφείλεται στην ύπαρξη των κορεσμένων εικονοστοιχείων στους πυρήνες των αστικών κέντρων (Σχήμα 2.13, Εικόνα b).



Σχήμα 2.13 Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στον Ελλαδικό χώρο το έτος 2009. Στην εικόνα α, απεικονίζεται η χωρική κατανομή των τιμών της βαθμονομημένης εικόνας DMSP F16, και στην εικόνα β οι τιμές της νέας τμηματοποιημένης εικόνας. Η ταξινόμηση των τιμών πραγματοποιήθηκε για την ανάδειξη των διαφορών των δύο εικόνων. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

Η εικόνα b, στο Σχήμα 2.13 αποτελεί την τμηματοποιημένη δορυφορική εικόνα για το έτος 2009 όπως προέκυψε έπειτα από την εφαρμογή του κατωφλίου με τιμή 21. Συγκριτικά με την Εικόνα a, η οποία αναλύθηκε παραπάνω, πλέον στην τελική εικόνα η χωρική κατανομή, συγκέντρωση και έκταση των εικονοστοιχείων, αναλογιζόμενης βέβαια και της χονδροειδούς χωρικής ανάλυσης της εικόνας (1x1 km), προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματική χωρική διάσταση των τεχνητών πηγών φωτισμού. Επιπλέον, ο υπερβολικός θόρυβος από διάχυτα εικονοστοιχεία μικρών τιμών της κλίμακας του γκρι που παρατηρείται στην Εικόνα a έχει πλέον εξαλειφθεί προσφέροντας έτσι μια κατά προσέγγιση πραγματική άποψη των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού πάνω από τον Ελλαδικό χώρο.

2.2.2.2 Σχετική γεωμετρική εγγραφή επιλεγμένων εικόνων

Όπως αναφέρθηκε, στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, κατά τη διαδικασία σύνθεσης των πολυχρονικών εικόνων που συλλέγονται από τους δορυφόρους DMSP, για την παραγωγή των ετήσιων προϊόντων Stable lights, υπεισέρχονται σφάλματα που σχετίζονται με την ακριβή γεωτοποθέτηση των εικονοστοιχείων. Καθώς η ταύτιση των εικονοστοιχείων στο σύνολο της χρονοσειράς δορυφορικών εικόνων αποτελεί μείζονος σημασίας σε εφαρμογές ανίχνευσης μεταβολών (Yaun & Elvidge, 1999; Coppin et al., 2004) πραγματοποιήθηκε σχετική γεωμετρική εγγραφή ορισμένων εικόνων.

Με τον όρο *σχετική γεωμετρική εγγραφή* δηλώνεται η διαφοροποίηση μεταξύ της γεωμετρικής εγγραφής ή συνόρθωσης που πραγματοποιείται για τον μετασχηματισμό του συστήματος συντεταγμένων μιας εικόνας με βάση αυτό μιας άλλης, καθώς εδώ στόχος είναι απλά η μετατόπιση των εσφαλμένων εικονοστοιχείων στη χωρική θέση των εικονοστοιχείων μιας εικόνας αναφοράς.³ Κατά την διερεύνηση των διαχρονικών εικόνων βρέθηκε ότι οι δορυφορικές εικόνες των ετών 1998, 2009, 2010 και 2011 παρουσιάζουν σημαντικές παρεκκλίσεις στην χωρική αναφορά των εικονοστοιχείων. Η μετατόπιση των εικονοστοιχείων πραγματοποιήθηκε με βάση τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

³ Η σχετική γεωμετρική εγγραφή των επιλεγμένων εικόνων πραγματοποιήθηκε στο στάδιο αυτό καθώς στις νέες τμηματοποιημένες εικόνες η διαδικασία υπολογισμού της χωρικής μετατόπισης των εικονοστοιχείων ήταν πιο απλοϊκή

Εικόνα προς διόρθωση / Εικόνα αναφοράς	DMSP F14 1997 (Μετατόπιση σε m)	DMSP F16 2008 (Μετατόπιση σε m)
DMSP F14 1998	X: 0 Y: -1000	
DMSP F16 2009		X: 1000 Y: 2000
DMSP F18 2010		X: 1000 Y: 2000
DMSP F18 2011		X: 0 Y: 1000

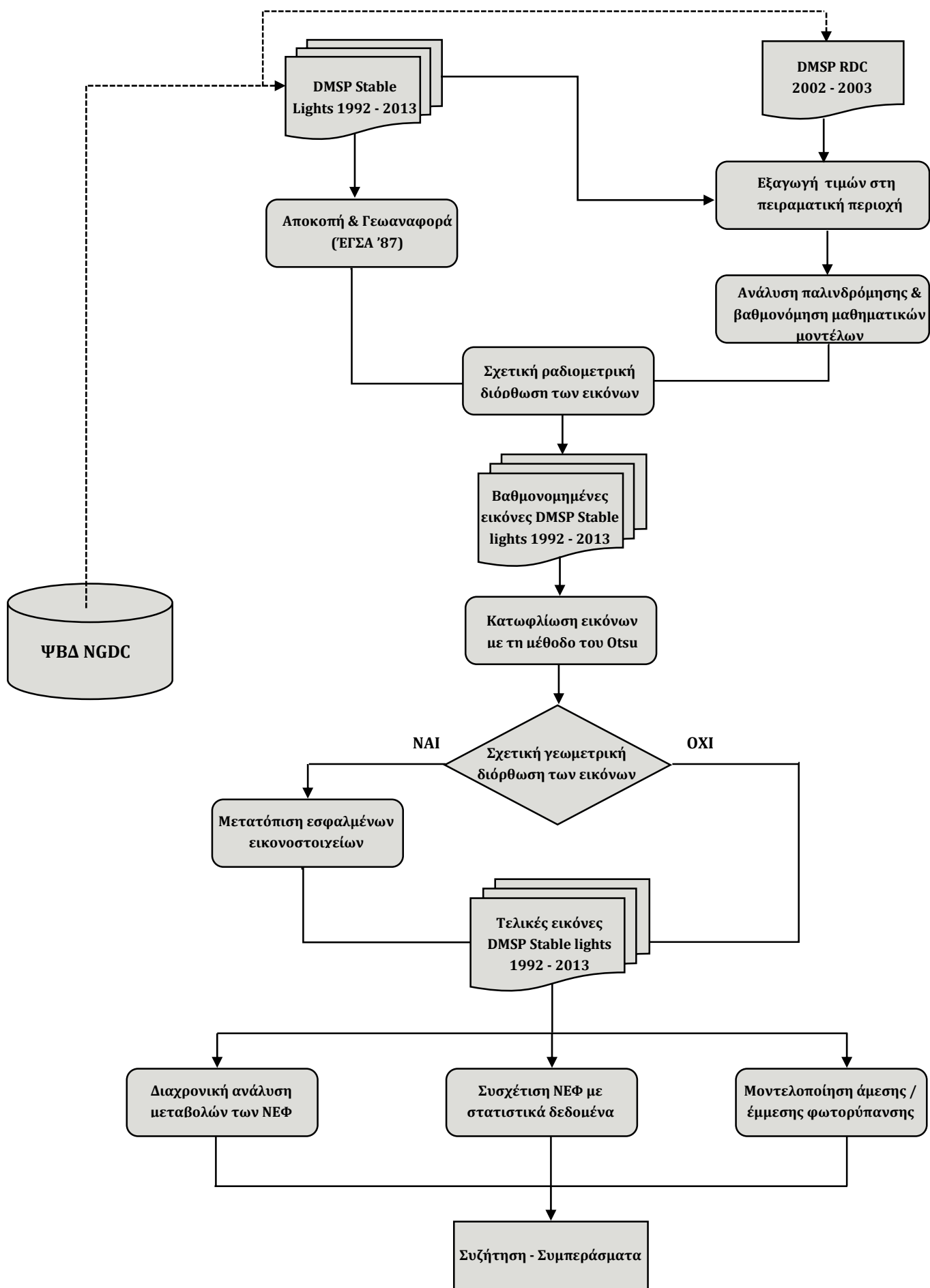
Πίνακας 4. Υπολογιζόμενες τιμές για την σχετική γεωμετρική διόρθωση των εικονοστοιχείων.
Πηγή: Προσωπική επεξεργασία

2.2.2.3 Ενίσχυση της αντίθεσης των δορυφορικών εικόνων

Το τελευταίο στάδιο στα πλαίσια αυτής της αλληλουχίας διαδικασιών για την ψηφιακή επεξεργασία και ανάλυση των δορυφορικών εικόνων αποτελεί η ενίσχυση της αντίθεσης των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων. Η ενίσχυση της αντίθεσης ουσιαστικά στοχεύει στον μετασχηματισμό του αρχικού εύρους των τιμών της κλίμακας του γκρι της εικόνας σε κάποιο άλλο εύρος μέσω σύμπτυξης ή διάτασης (ανάπτυξης) του ιστογράμματος (Καρτάλης & Φειδάς, 2006, Μερτίκας, 2009).

Οι τεχνικές αυτές τροποποίησης του αρχικού εύρους διακύμανσης των τιμών του επιπέδου του γκρι επιτυγχάνονται με χρήση γραμμικών ή μη γραμμικών συναρτήσεων μετασχηματισμού. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν γραμμικοί μετασχηματισμοί που βασίζονται στην τυπική απόκλιση των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων.

Στο παρακάτω διάγραμμα, παρουσιάζονται γραφικά τα βήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας.



Σχήμα 2.14 Ροή διαδικασιών της προτεινόμενης μεθοδολογίας. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

2.3 Ανάλυση & Αποτελέσματα

2.3.1 Διαχρονική ανάλυση των μεταβολών στα χωρικά πρότυπα των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού

Στην ενότητα αυτή εφαρμόζονται τεχνικές για την χωροχρονική ανάλυση των ΝΕΦ στον Ελλαδικό χώρο των δορυφορικών δεδομένων την περίοδο 1992 – 2013. Η χωροχρονική (Spatiotemporal) διάσταση αναφέρεται στη συνέχεια που παρουσιάζουν τα χωρικά και χρονικά πρότυπα στο σύνολο της χρονοσειράς δεδομένων (Small, 2012). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, στόχος της χωροχρονικής ανάλυσης αποτελεί ο εντοπισμός των ετήσιων μεταβολών της χωρικής έκτασης, έντασης και κατανομής των ΝΕΦ, καθώς και η ποσοτικοποίηση των αλλαγών αυτών.

Η χωροχρονική ανάλυση στηρίχθηκε σε πολύτιμα εργαλεία και ρουτίνες που προσφέρουν τόσο η τεχνολογία των GIS όσο και η τηλεπισκόπηση. Ένα εξ' αυτών αποτελεί η δυνατότητα πράξεων άλγεβρας χαρτών (map algebra) μέσω της οποίας μπορούν να αναπτυχθούν πολύπλοκες αλγεβρικές ακολουθίες για την ανάλυση γεωγραφικών δεδομένων. Οι αλγόριθμοι αυτοί στηρίζονται σε ταξινομητές και φασματικές πληροφορίες σε επίπεδο εικονοστοιχείου (Coppin et al., 2004). Ως μέθοδος ανάλυσης των διαχρονικών μεταβολών (change detection) επιλέχθηκε η μέθοδος της αφαίρεσης των εικόνων, βάσει της οποίας οι ψηφιακές τιμές κάθε εικονοστοιχείου μια εικόνας αφαιρούνται από αυτές μιας άλλης. Η μέθοδος αυτή είναι μιας από τις πλέον ευρέως διαδεδομένες τεχνικές ανίχνευσης μεταβολών (Hayes & Sauder, 2001) και διακρίνεται για την απλοϊκότητα των αλγεβρικών πράξεων, την ακρίβεια αλλά και την ευκολία στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Μαθηματικά, μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω σχέση:

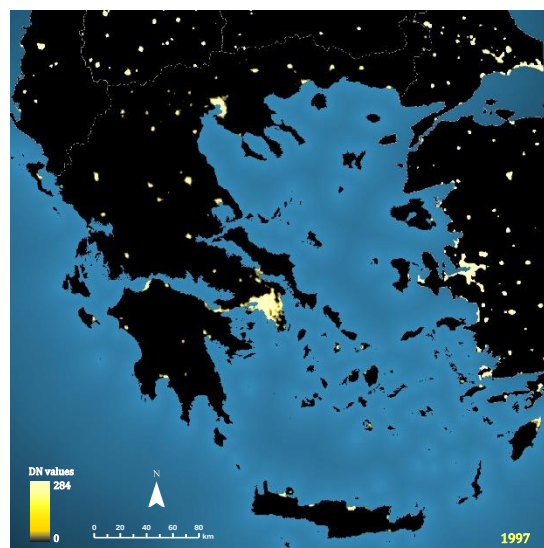
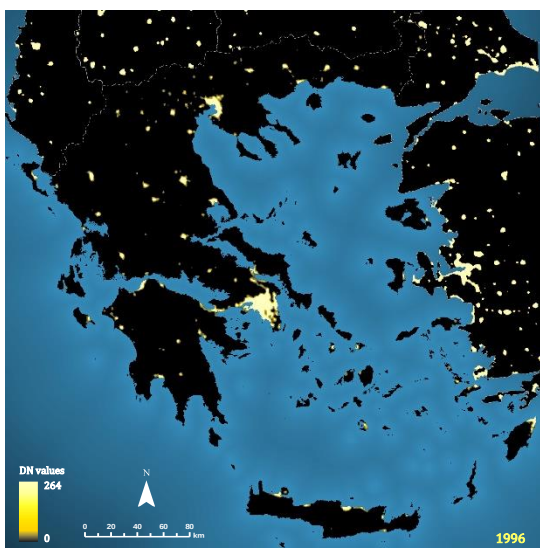
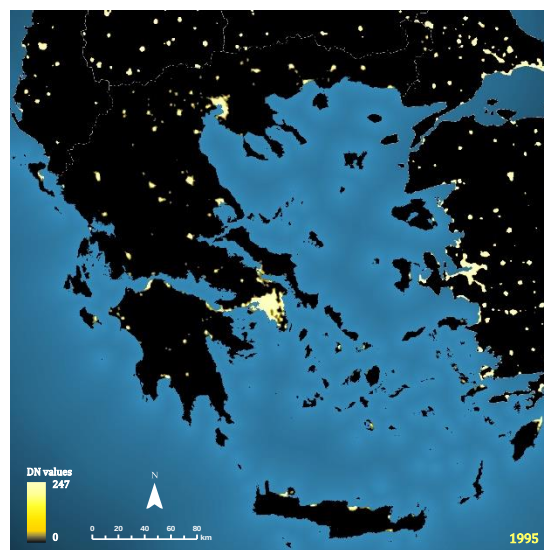
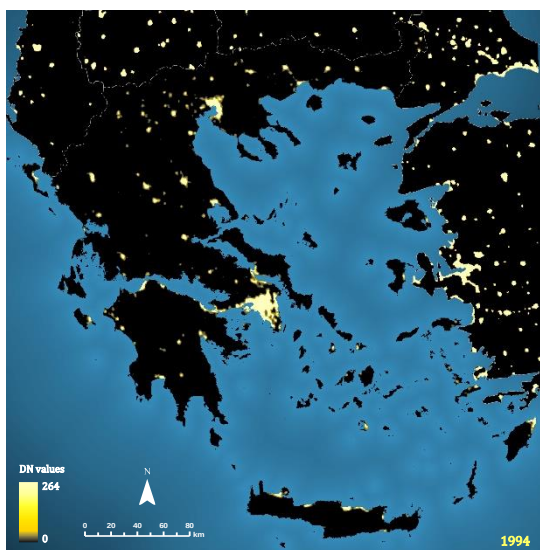
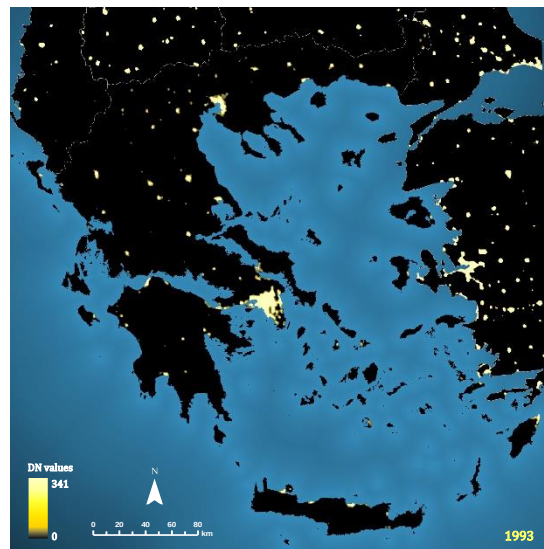
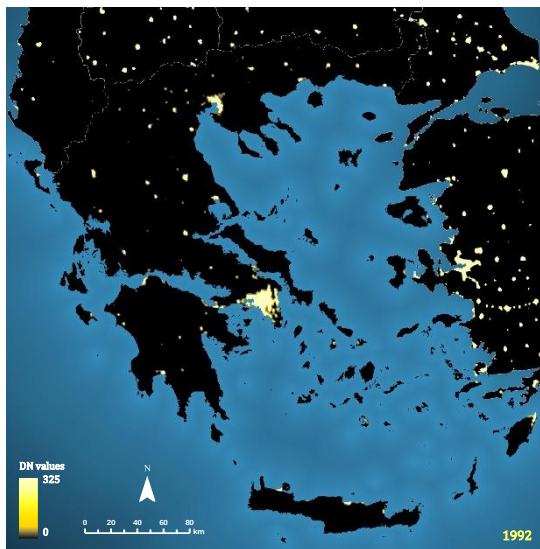
$$D_x^k{}_{ij} = x^k{}_{ij} (t_2) - x^k{}_{ij} (t_1) + C \quad (6)$$

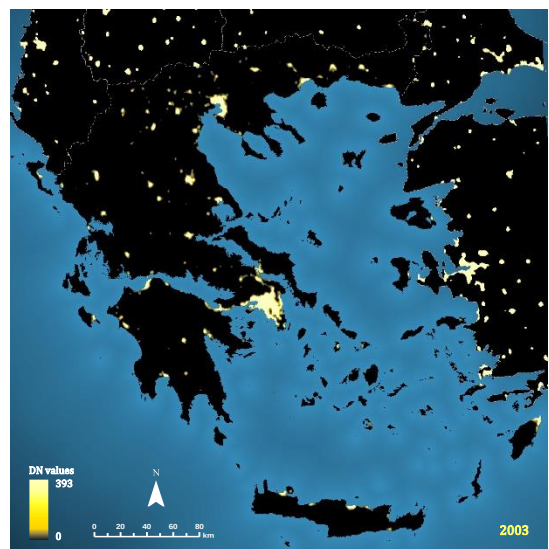
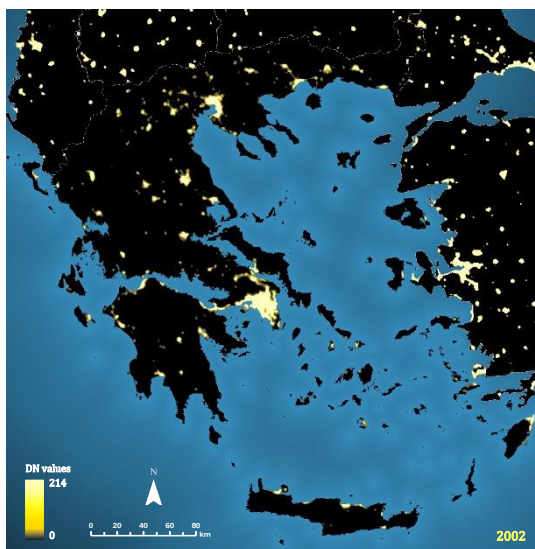
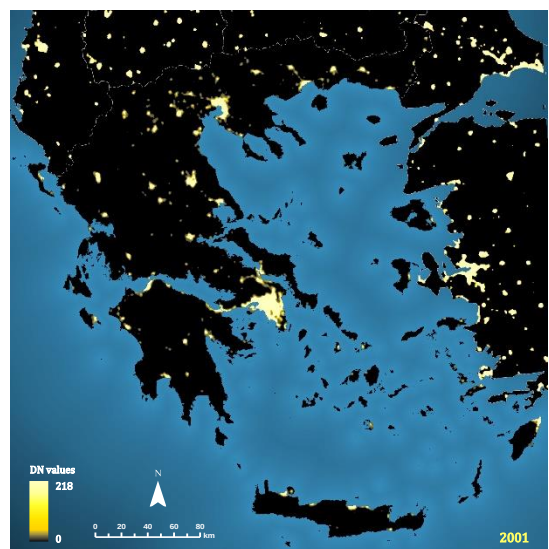
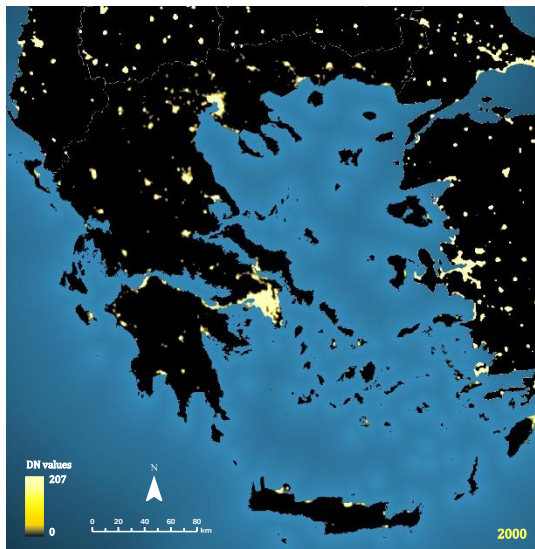
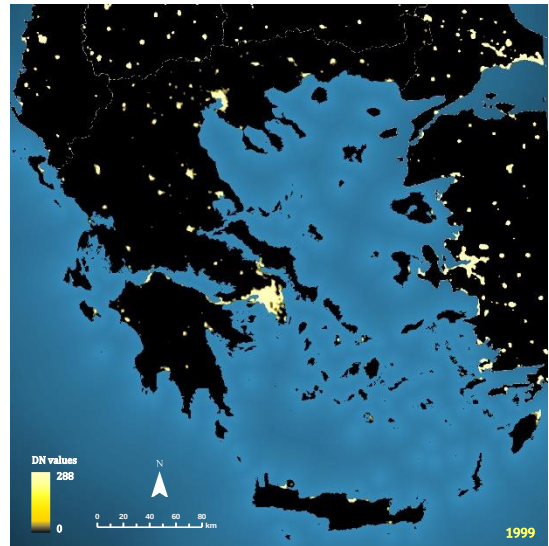
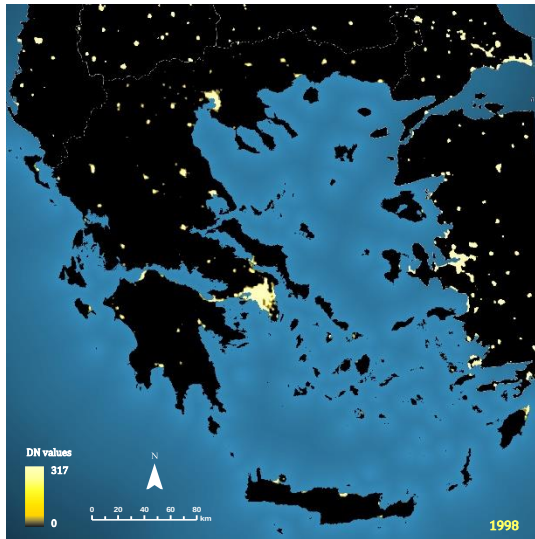
Όπου i, j οι εικονοσυντεταγμένες, k το φασματικό κανάλι, $x^k{}_{ij}$ η ψηφιακή τιμή του i, j για το φασματικό κανάλι k , t_1, t_2 οι χρονικές περίοδοι λήψης των δύο εικόνων, και c η σταθερά.

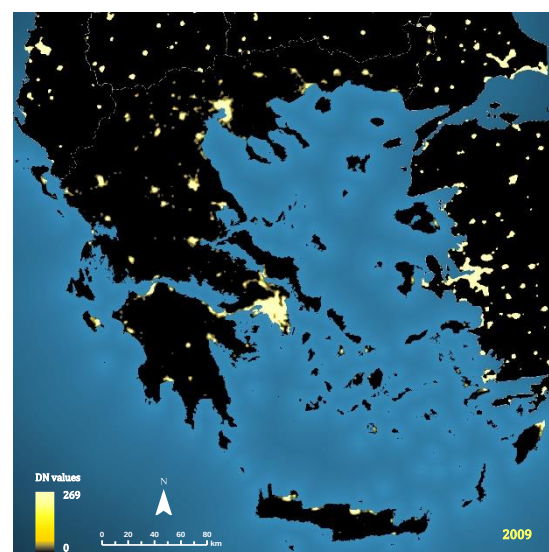
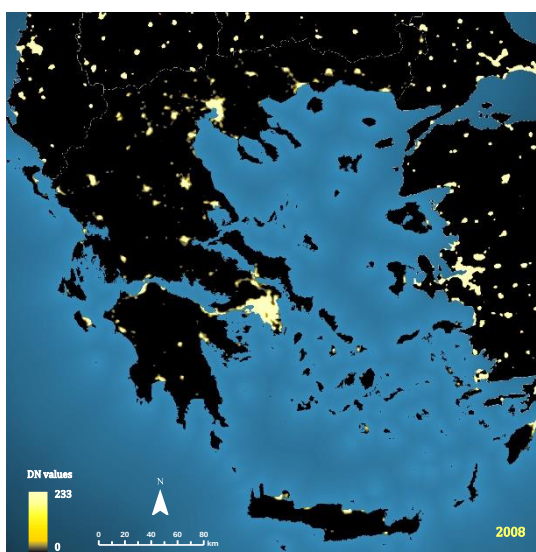
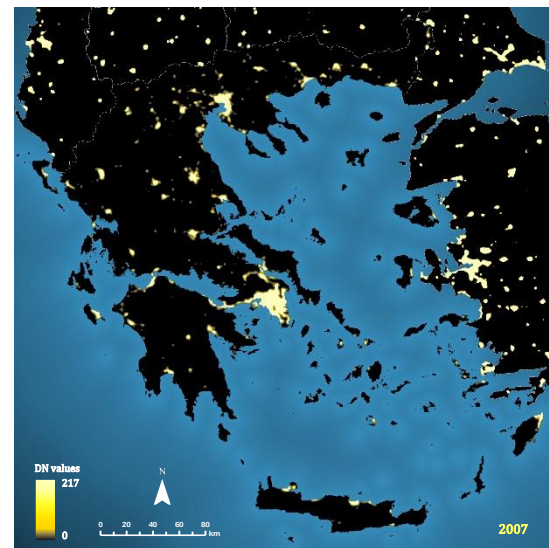
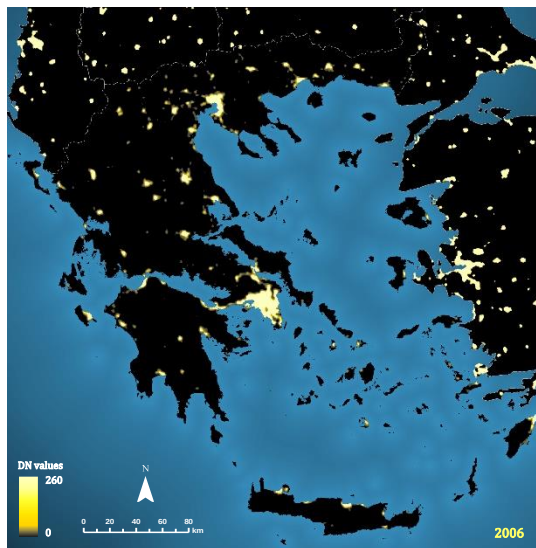
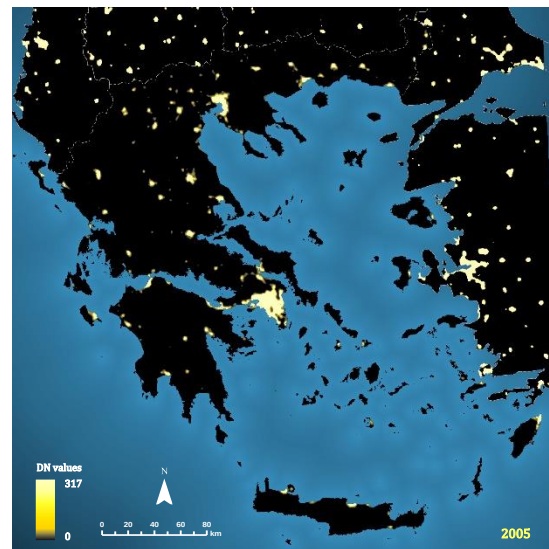
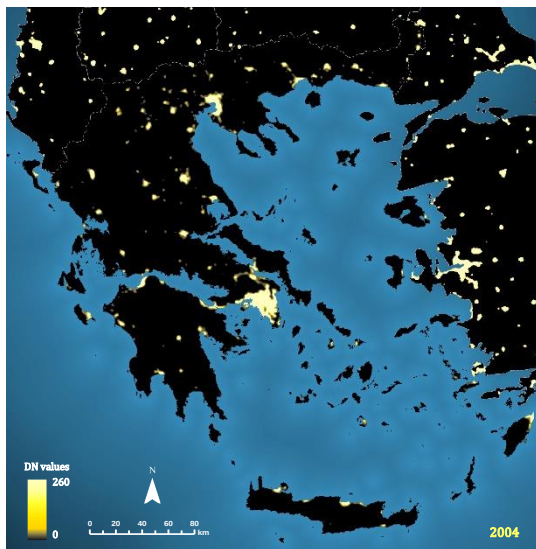
Αν έχει προηγηθεί μια απόλυτα επιτυχής προεπεξεργασία των δορυφορικών εικόνων, το αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής είναι νέες εικόνες στις οποίες αρνητικές και θετικές τιμές αναπαριστούν τις μεταβληθείσες περιοχές ενώ με την τιμή 0 αποτυπώνονται οι αμετάβλητες, στάσιμες περιοχές. Η απόφαση επιλογής του κατωφλίου για την ταξινόμηση των τιμών των εικονοστοιχείων στις παραπάνω κλάσεις αποτελεί το κρισιμότερο στάδιο της μεθόδου αυτής, ιδιαιτέρως σε περιπτώσεις που τα φασματικά χαρακτηριστικά των εικονοστοιχείων παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις που δεν οφείλονται σε πραγματικές μεταβολές αλλά σε άλλους λόγους (Καρτάλης & Φειδάς, 2006).

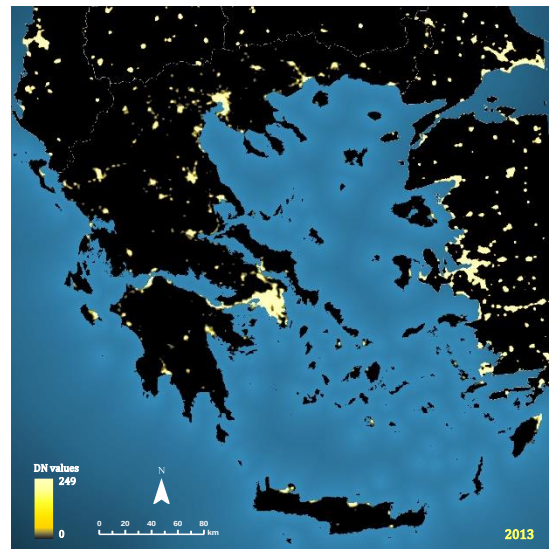
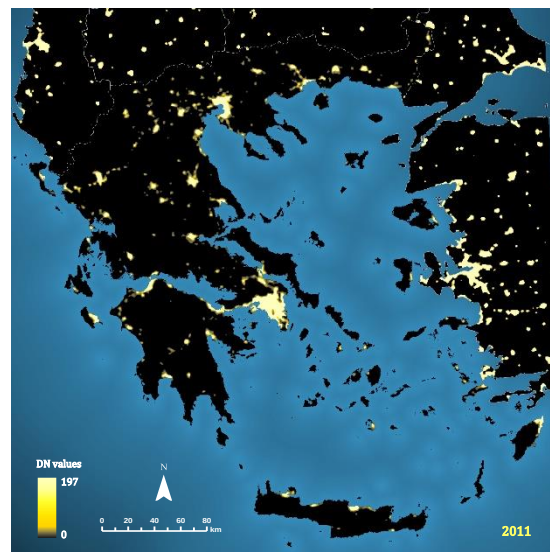
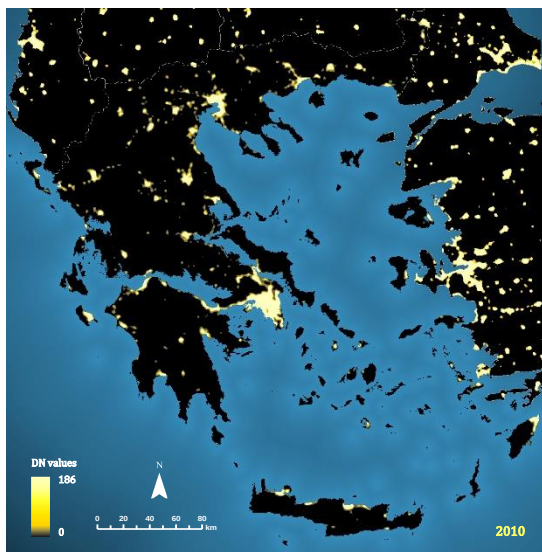
Η μέθοδος της αφαίρεσης των εικόνων εφαρμόστηκε στις τελικές τμηματοποιημένες εικόνες DMSP – OLS Stable lights του συνόλου της χρονοσειράς, οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 2.15. Στα «στιγμιότυπα» αυτά διαφαίνεται η σταδιακά αυξανόμενη χωρική διασπορά των τεχνητών πηγών φωτισμού κυρίως περιμετρικά των αστικών κέντρων, γεγονός που εκ πρώτης όψεως οφείλεται τόσο στην πληθυσμιακή αύξηση όσο και στο φαινόμενο της αστικής διάχυσης καθώς και στην κατασκευή έργων υποδομής για την υποστηρικτική λειτουργία του πληθυσμού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, αποτελεί η κατασκευή του μεγαλύτερου οδικού άξονα της χώρας, η Εγνατία οδός, τα ίχνη της οποίας εμφανίζονται κατά το έτος λειτουργίας της στην δορυφορική Εικόνα του έτους 2009 και έπειτα στο σχήμα 2.15.

Στο σχήμα 2.16 παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες ετήσιες μεταβολές στα χωρικά πρότυπα των ΝΕΦ στον Ελλαδικό χώρο. Η στρατηγική για την ταξινόμηση των ψηφιακών τιμών βασίστηκε στην ανάλυση του ιστογράμματος των νέων εικόνων, δημιουργώντας συνολικά 7 ομάδες δυναμικού για τον εντοπισμό περιοχών που σημείωσαν σημαντικές μεταβολές στα πρότυπα των ΝΕΦ καθώς και αυτών που παρέμειναν στάσιμες. Περιοχές με αποχρώσεις του μπλε αναπαριστούν τις περιοχές στις οποίες η ετήσια μεταβολή των ΝΕΦ ήταν αρνητική, δηλαδή περιοχές στις οποίες η ένταση φωτεινότητας των τεχνητών πηγών ήταν μικρότερη από την αντίστοιχη του επόμενου έτους ενώ αντίστοιχα με αποχρώσεις του κόκκινου απεικονίζονται περιοχές στις οποίες επήλθε αύξηση των ΝΕΦ. Με γκρι χρώμα απεικονίζονται περιοχές οι οποίες παρουσιάζουν αμελητέες (± 1 ψηφιακή τιμή) ή μηδενικές μεταβολές ως προς τις ΝΕΦ.

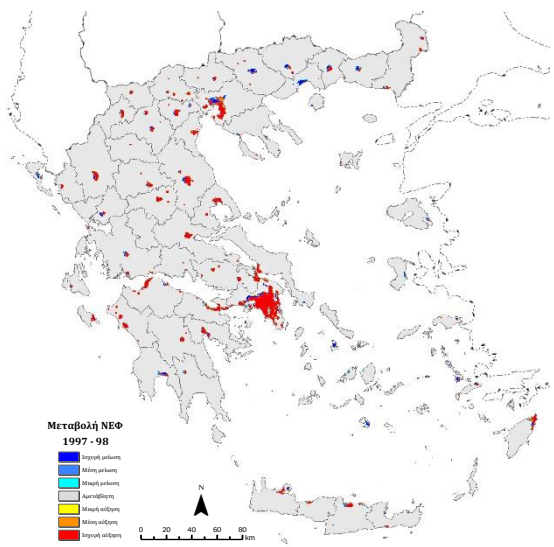
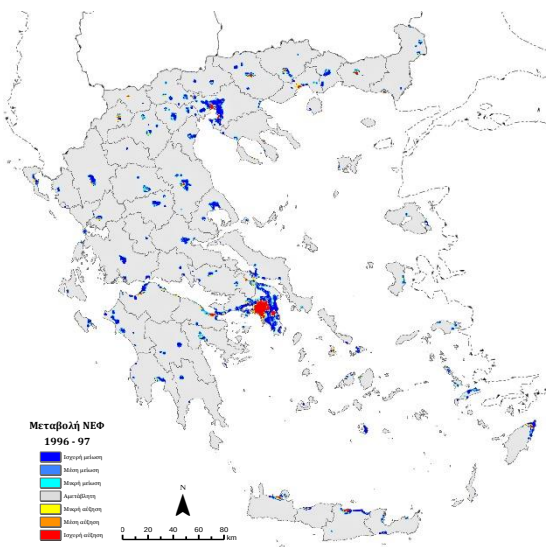
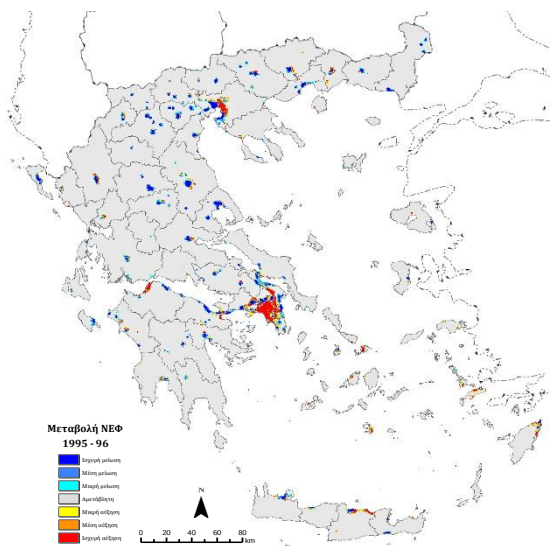
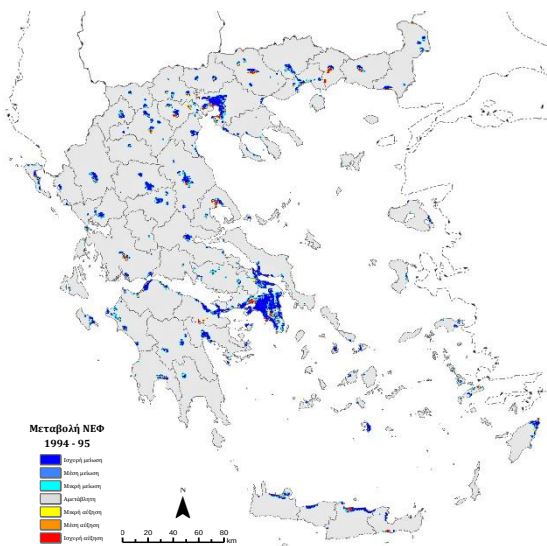
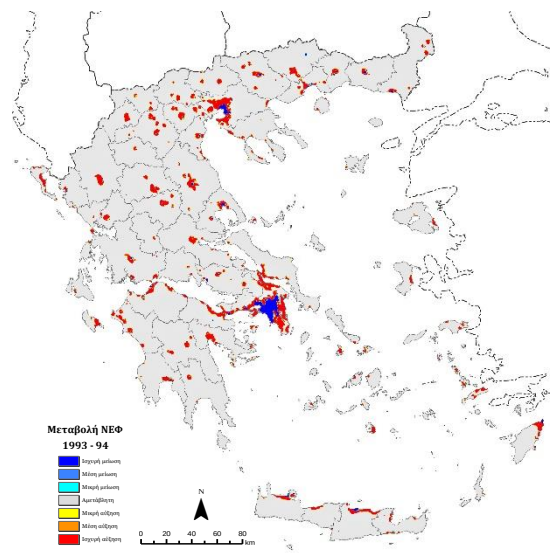
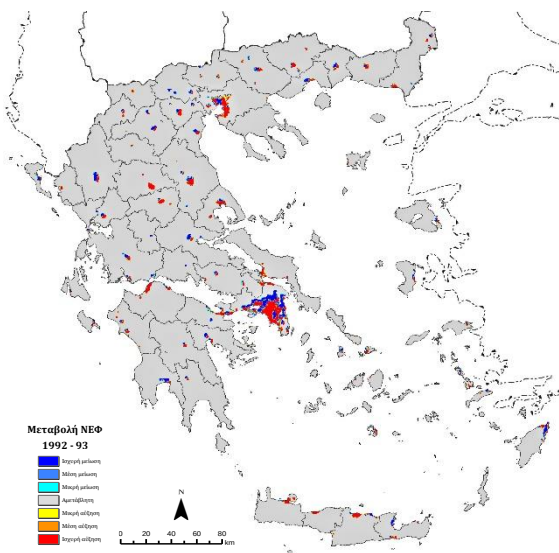


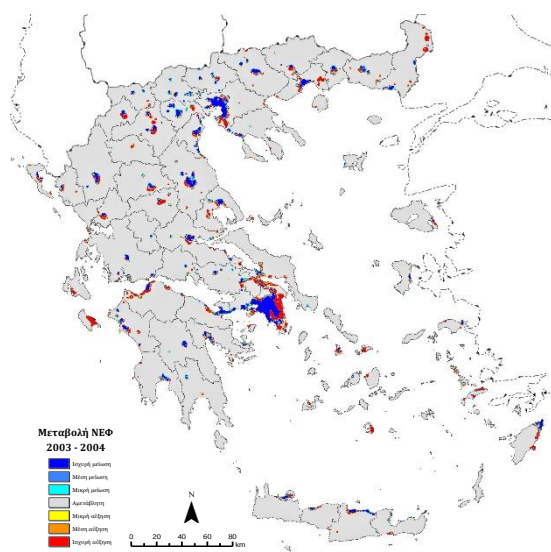
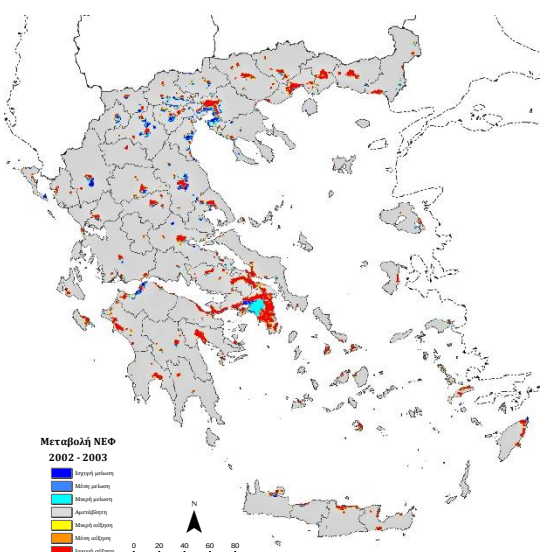
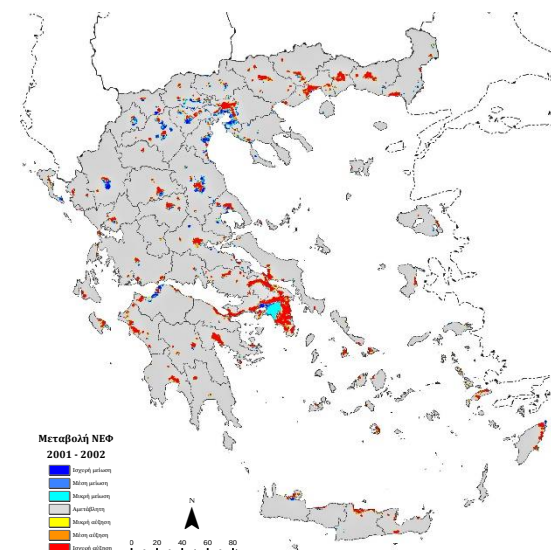
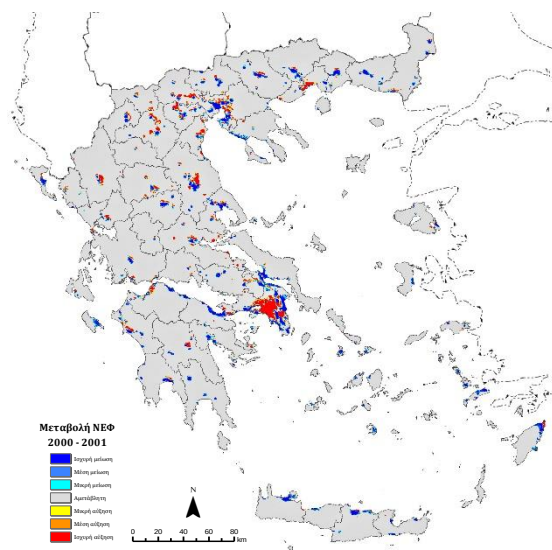
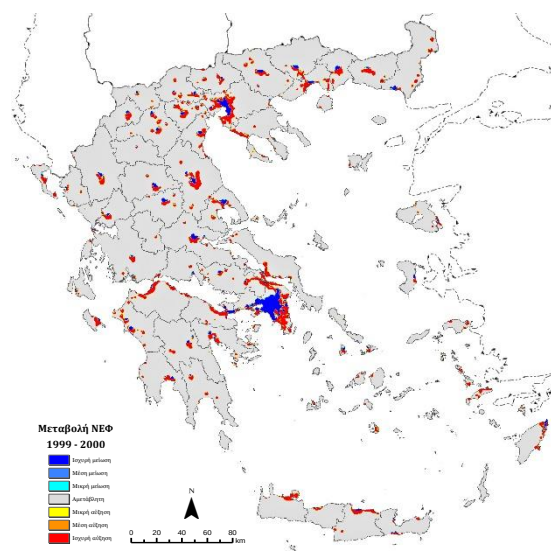
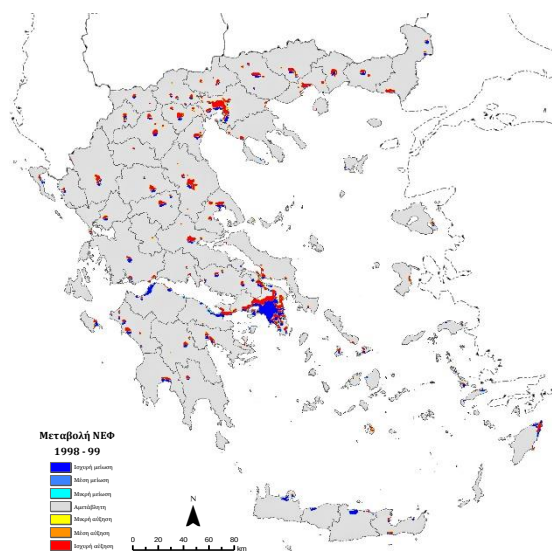


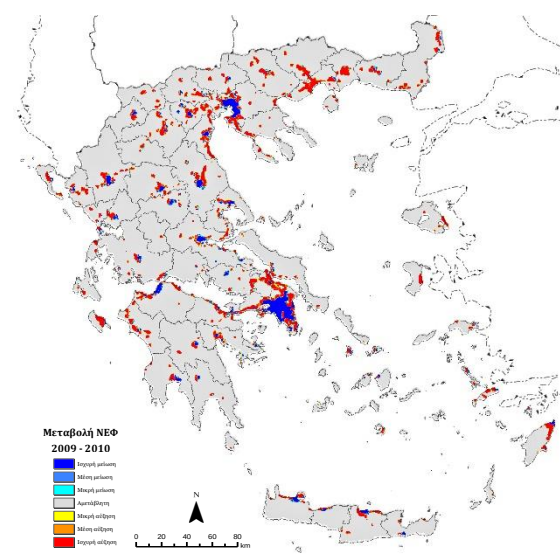
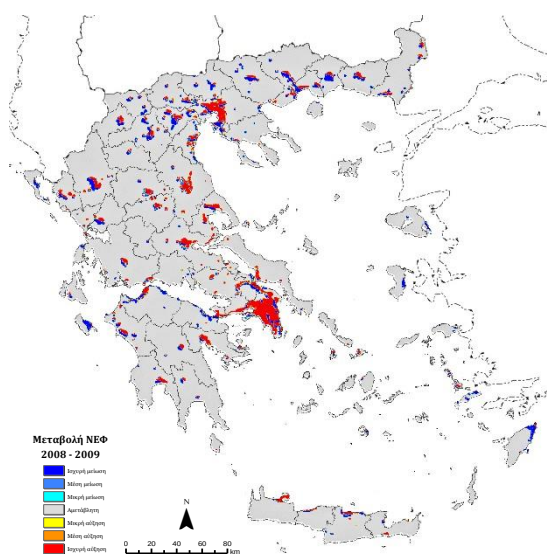
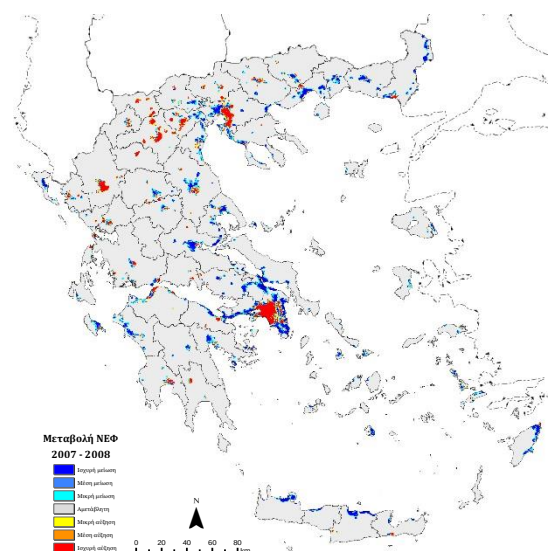
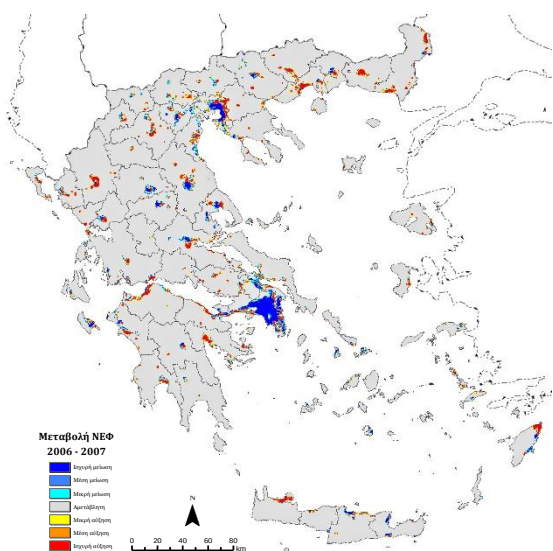
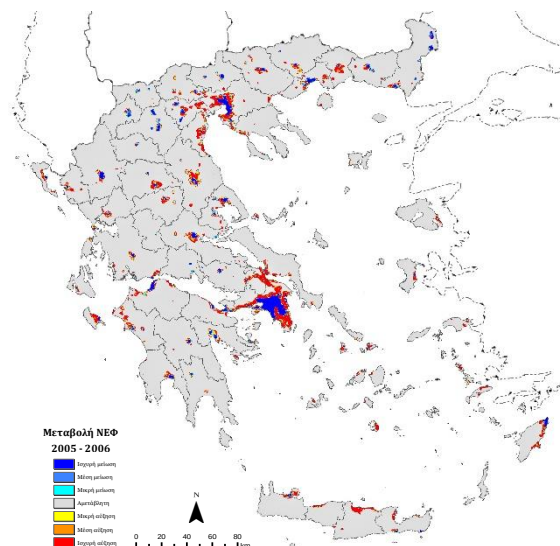
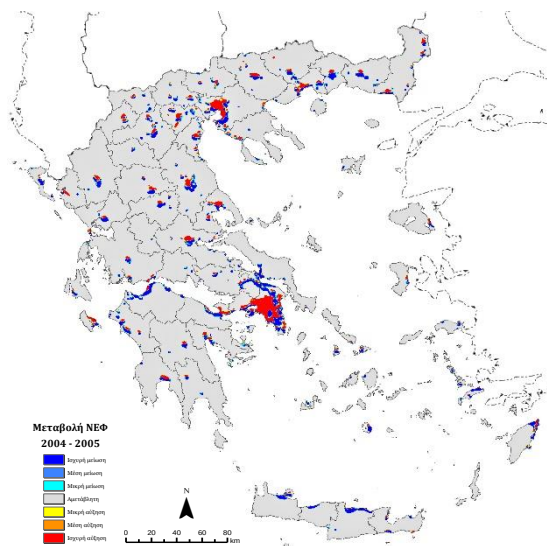


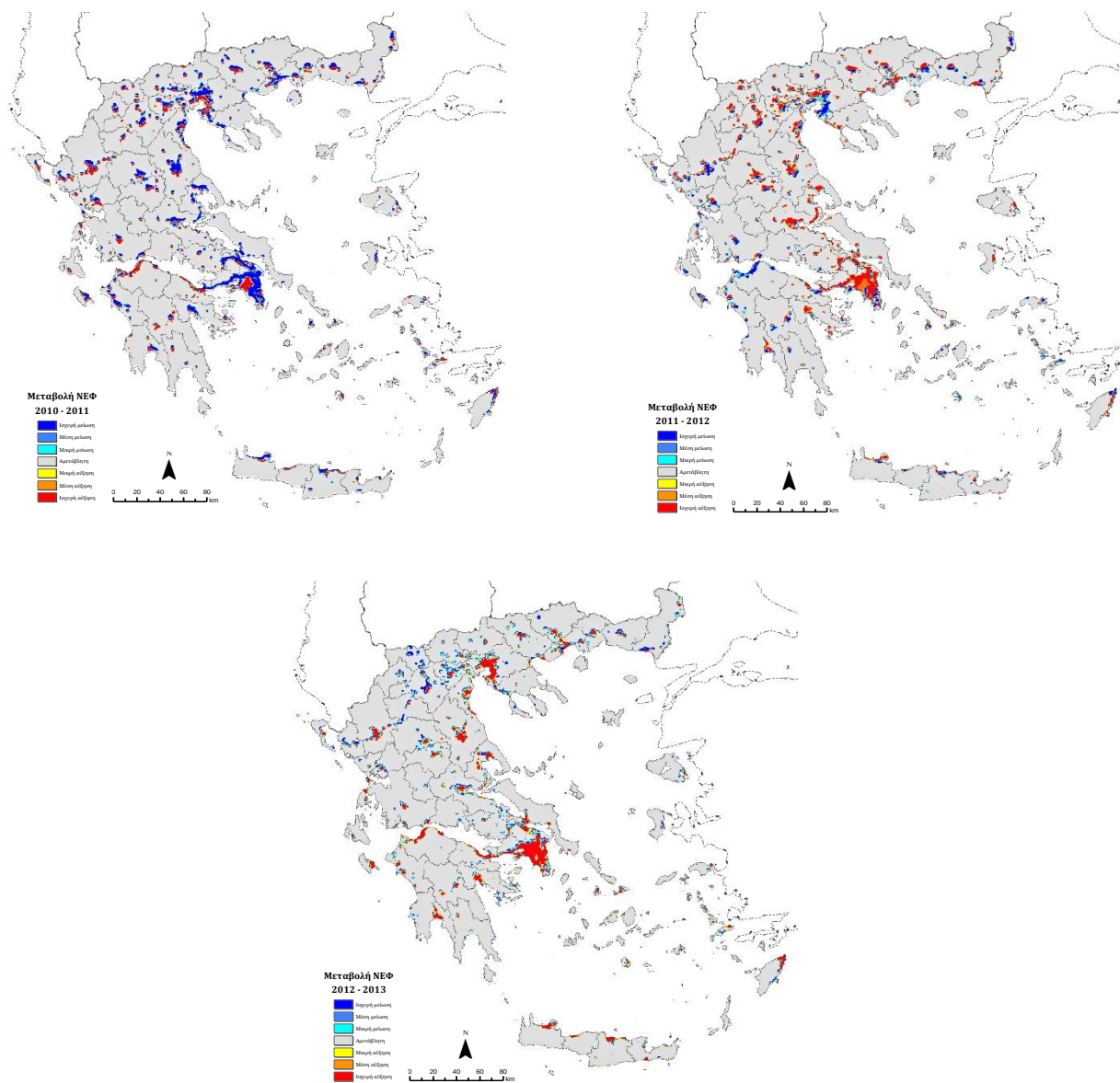


Σχήμα 2.15 Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στην ευρύτερη περιοχή μελέτης όπως αποτυπώνονται στις τελικές τμηματοποιημένες δορυφορικές εικόνες DMSP – OLS. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία



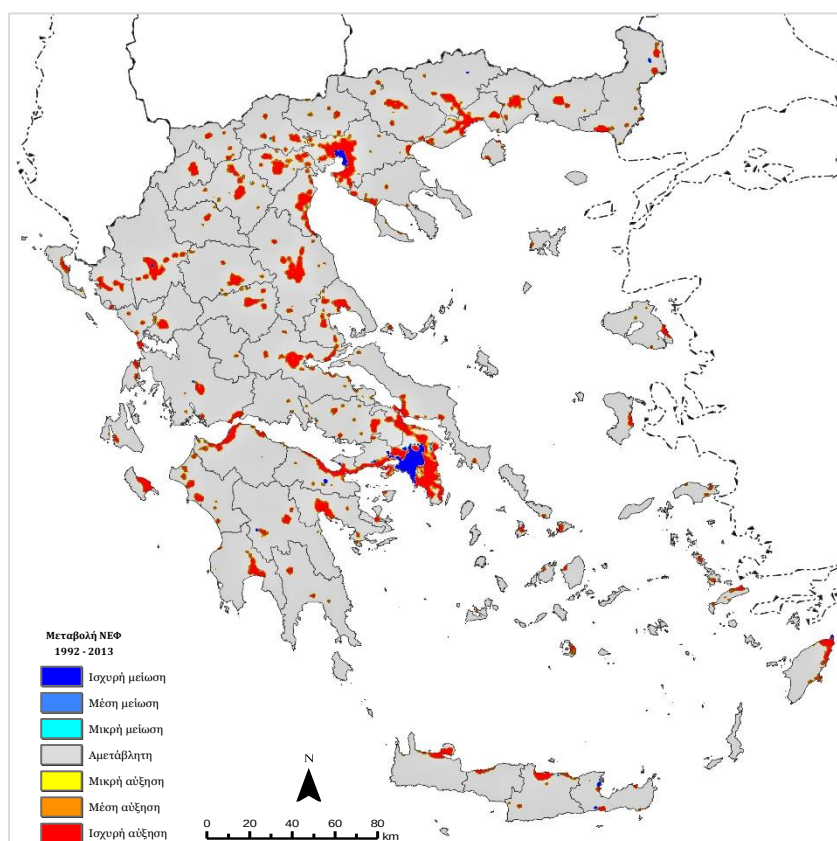






Σχήμα 2.16 Ετήσιες μεταβολές των ΝΕΦ στον Ελλαδικό χώρο για την χρονοσειρά δορυφορικών δεδομένων DMSP – OLS Stable lights 1992 - 2013. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

Σημαντικές ετήσιες μεταβολές παρατηρούνται στη χωρική κατανομή των ΝΕΦ στον Ελλαδικό χώρο κατά τη χρονική περίοδο εξέτασης. Παρότι εν γένει στο σύνολο αυτών των χαρτών του σχήματος 2.16 δεν διαφαίνεται κάποια σαφή τάσης αύξησης ή μείωσης, καθώς τα χωρικά πρότυπα αλλαγών των ΝΕΦ γίνονται όλο και περισσότερο πολύπλοκα ιδιαίτερα στις έντονα αστικοποιημένες περιοχές, όπως στον Νομό Αττικής, Θεσσαλονίκης, Αχαΐας και Λάρισας, ωστόσο εν γένει η χωρική κατανομή και συγκέντρωση των τεχνητών πηγών φωτισμού φαίνεται ότι παρουσίασε μια έντονη ανάπτυξη, κυρίως περιμετρικά των αστικών κέντρων. Για την ανάλυση της συνολικής διαχρονικής τάσης στα πρότυπα αλλαγών των ΝΕΦ κατασκευάστηκε ο χάρτης μεταβολών των ετών 1992, 2013 (Σχήμα 2.17).



Σχήμα 2.17 Μεταβολές στα πρότυπα των ΝΕΦ στον Ελλαδικό χώρο την περίοδο 1992 – 2013.

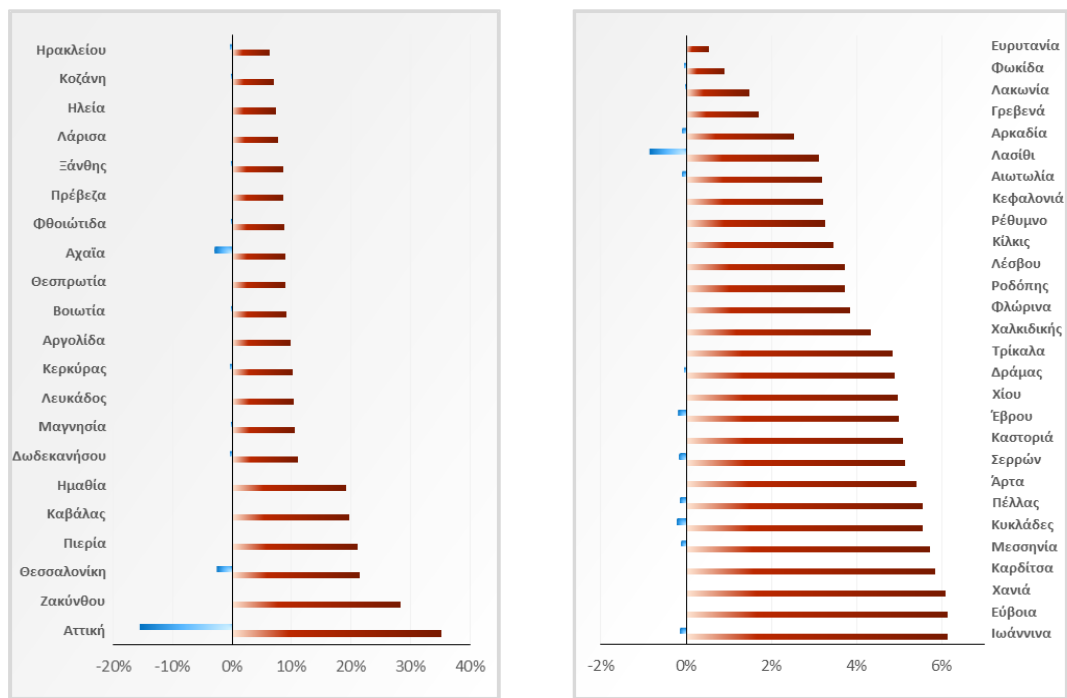
Πηγή: Προσωπική επεξεργασία

Στον Χάρτη του Σχήματος 2.17, διαφαίνεται πλέον η αλματώδης ανάπτυξη των τεχνητών πηγών φωτισμού η οποία εντοπίζεται περιμετρικά τόσο των μεγάλων αστικών κέντρων καθώς και στις περιφερειακές περιοχές του Ελλαδικού χώρου.

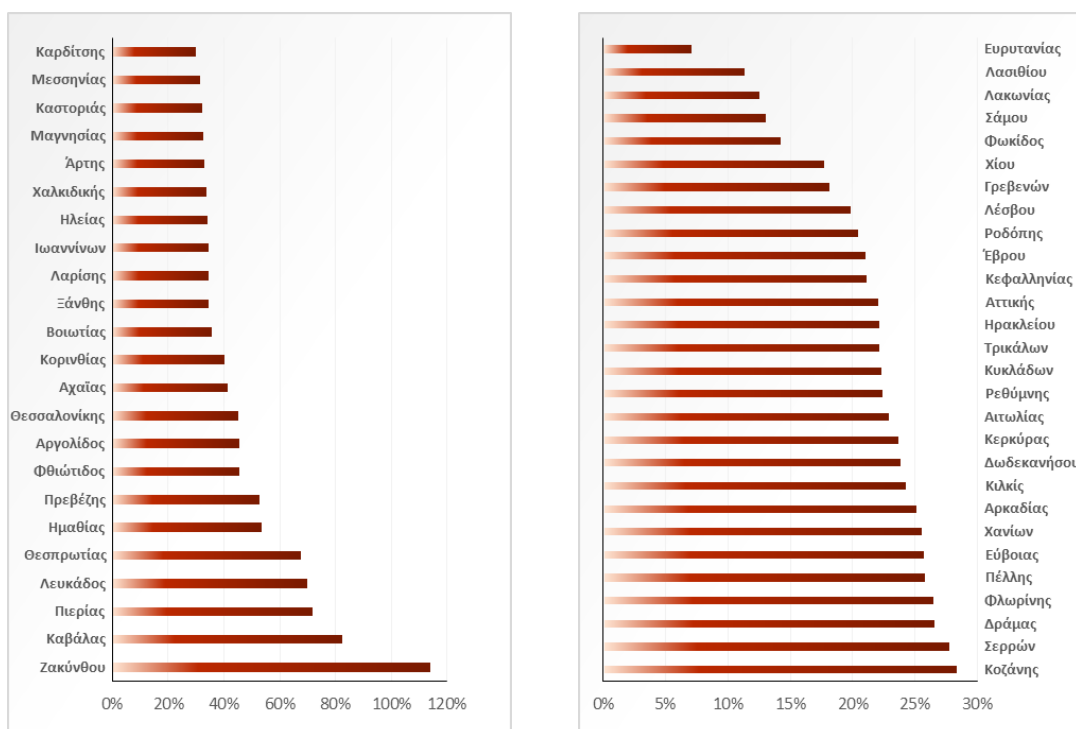
Η Περιφέρεια της Κεντρικής Μακεδονίας, και η Αττική αποτελούν τις πλέον επιβαρυνμένες περιοχές ενώ πλεονεκτική θέση διατηρούν σημαντικές περιοχές της Ηπείρου της κεντρικής και νότιας Πελοποννήσου. Αφενός η πληθυσμιακή αύξηση, η αστική επέκταση και οι οικονομικές δραστηριότητες συμβάλλουν στην περεταίρω σταδιακή αύξηση της χρήσης του τεχνητού φωτισμού με αποτέλεσμα ολοένα και περισσότερες περιοχές να επηρεάζονται από το φαινόμενο της φωτορύπανσης. Αφετέρου, η παγκόσμια οικονομική κρίση, και η βαρύνουσα οικονομική κατάσταση στην οποία περιήλθε η Ελλάδα τα τελευταία τέσσερα χρόνια, καθώς και η θέσπιση περιβαλλοντικών νομοθεσιών και προγραμμάτων για την μείωση του ενεργειακού κόστους μέσω της εφαρμογής συστημάτων διαχείρισης του φωτισμού, παρέχουν ισχυρά κίνητρα για τον περιορισμό του δημόσιου και ιδιωτικού τεχνητού φωτισμού.

Για παράδειγμα η πτωτική τάση που εμφανίζουν οι ΝΕΦ στον αστικό ιστό του Λεκανοπεδίου Αττικής, στο Νομό Αττικής, οφείλεται κατά μεγάλο ποσοστό τόσο στις μειωμένες κρατικές χορηγίες επί των δήμων με αποτέλεσμα τον περιορισμό χρήσης του ηλεκτροφωτισμού, όσο και στην εφαρμογή συστημάτων διαχείρισης του οδοφωτισμού στον Δήμο Αθηναίων για εξοικονόμηση ενέργειας, που ξεκίνησε το 2011.

Στο σχήμα 2.18 απεικονίζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές σε επίπεδο νομών στα χωρικά πρότυπα των ΝΕΦ. Όπως παρατηρήθηκε και στην χαρτογραφική απεικόνιση των διαχρονικών μεταβολών, ο νομός Αττικής σημειώνει μια δυναμική εξέλιξη (η οποία εκφράζεται τόσο μέσω της τάσης μεγέθυνσης των χωρικών προτύπων των ΝΕΦ (35.2%) κυρίως στο δίκτυο οικισμών της εξωαστικής ενδοχώρας του πολεοδομικού μητροπολιτικού συγκροτήματος (προαστιοποίηση), όσο και μέσω των προτύπων περιορισμού των ΝΕΦ με ποσοστό 15% της συνολικής γεωγραφικής έκτασης του νομού. Παρόμοια χαρακτηριστικά εμφανίζει και ο νομός Θεσσαλονίκης με περαιτέρω μεγέθυνση του πολεοδομικού συγκροτήματος με την τάση μείωσης και αύξησης των ΝΕΦ να αγγίζει το 21.4% και -2.7%.



Σχήμα 2.18 Ποσοστιαία μεταβολή των αλλαγών στη χωρική έκταση των πρότυπων των ΝΕΦ σε επίπεδο νομών κατά την χρονική περίοδο 1992 - 2013. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία



Σχήμα 2.19 Ποσοστιαία μεταβολή των αλλαγών των αθροιστικών τιμών SOL σε επίπεδο νομών κατά την χρονική περίοδο 1992 - 2013. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ύπαρξη στις πρώτες θέσεις των δυναμικών περιοχών νομοί όπως η Ζάκυνθος, ο νομός Πιερίας, Καβάλας και Ημαθίας. Ιδιαίτερα για αυτούς τους νομούς οι αιτιογενείς παράγοντες που ενδεχομένως οδήγησαν σε αυτήν την αλματώδη αύξηση στη χωρική κατανομή των ΝΕΦ συνδέονται περισσότερο με οικονομικές δραστηριότητες (εμπόριο, αγροτική παραγωγή) αλλά και την τουριστική ανάπτυξη κυρίως στους νησιωτικούς νομούς όπως η Ζάκυνθος, η οποία σημείωσε άνοδο της τάξης των 28.29%.

Στο επόμενο διάγραμμα στο Σχήμα 2.19, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαχρονικής ποσοτικής ανάλυσης όσον αφορά τις αθροιστικές τιμές SOL σε επίπεδο νομών. Παρατηρείται ότι ο νομός Αττικής παρουσιάζει μια μικρή θετική μεταβολή της τάξης του 22% γεγονός που υπερισχύει τις υποθέσεις που έγιναν προηγουμένως. Αντιθέτως ο νομός Ζακύνθου εμφανίζει την μεγαλύτερη θετική μεταβολή στις τιμές SOL (γεγονός που σχετίζεται άμεσα με την αύξηση της έντασης φωτεινότητας των ΝΕΦ). Σημαντική αυξητική τάση παρουσιάζουν επίσης οι νομοί Πιερίας, Καβάλας, Λευκάδος, Θεσπρωτίας και Πρέβεζας.

Οι νομοί οι οποίοι κατά το χρονικό διάστημα αναφοράς παρουσιάζουν τάσης στασιμότητας ή μικρών αυξομειώσεων είναι μεταξύ άλλων ο νομός Ευρυτανίας, Λακωνίας, Λασιθίου, Σάμου, Φωκίδας, Γρεβενών κ.α.

2.3.2 Συσχέτιση των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού με κοινωνικό-οικονομικές μεταβλητές

Στην προσπάθεια για την περαιτέρω κατανόηση των αιτιοδών παραγόντων που διαδραμάτισαν μείζονα ρόλο στην αύξηση των ΝΕΦ στον Ελλαδικό χώρο κατά το χρονικό διάστημα αναφοράς, πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ των αθροιστικών τιμών SOL και των επιλεγμένων στατιστικών μεταβλητών, μόνιμο πληθυσμό, ΑΕΠ και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, σε επίπεδο νομών. Σε πρώτο στάδιο, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε περιφερειακό επίπεδο δημιουργώντας τα αντίστοιχα διαγράμματα για κάθε περιφέρεια ούτως ώστε να καταστεί πιο εμφανής η κοινή συσπείρωση των νομών ως προς την εκάστοτε στατιστική μεταβλητή.

Από τη ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ των ΝΕΦ και των τριών στατιστικών μεταβλητών βρέθηκε ότι οι μεταβλητές συνδέονται ικανοποιητικά με γραμμικό τρόπο αποδίδοντας ικανοποιητικές τιμές του συντελεστή προσδιορισμού. Εν συνεχεία, με βάση τις παρατηρούμενες τιμές οι νομοί ταξινομήθηκαν σε τέσσερις κύριες ομάδες (Elvidge et al., 2009, 2014): Οικονομικά κεντρώοι (GDP Centric), Πληθυσμιακά κεντρώοι (Population Centric), Αμφίρροποι Οικονομικά & Πληθυσμιακά (GDP & Pop Centric) και Στάσιμοι (Stable).

Οικονομικά κεντρώοι (GDP Centric)

Στην κατηγορία αυτοί εντάσσονται νομοί οι οποίοι εμφανίζουν θετικές τιμές συντελεστή προσδιορισμού υψηλότερες με τα δεδομένα του ΑΕΠ. Στους νομούς αυτούς η αύξηση των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού συνδέθηκε με παράλληλη αύξηση της χρηματοοικονομικής δραστηριότητας και ανάπτυξης.

Πληθυσμιακά κεντρώοι (Pop Centric)

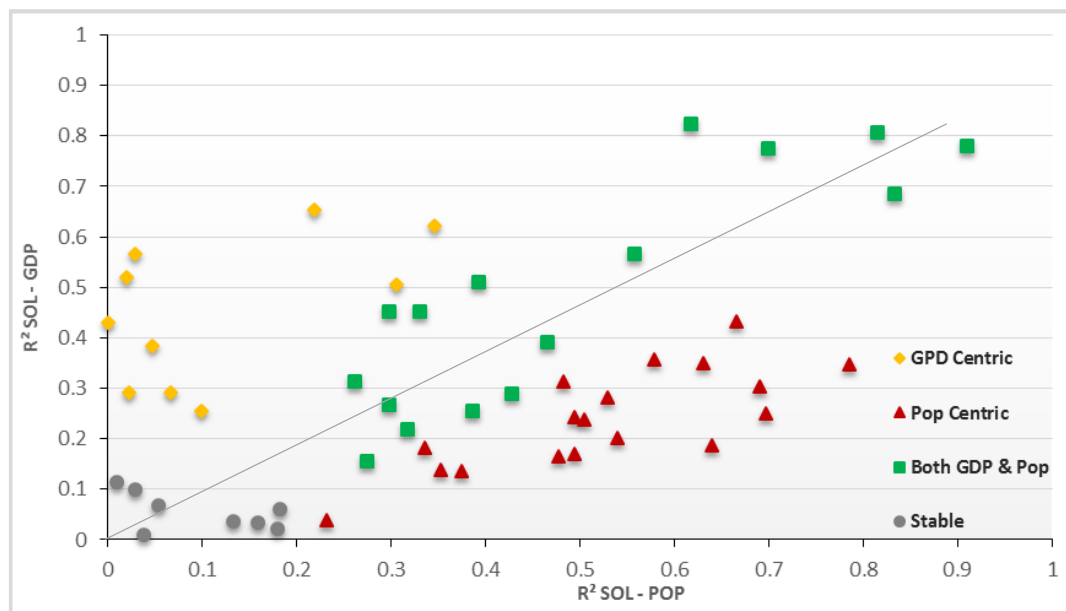
Στην κατηγορία αυτοί εντάσσονται νομοί οι οποίοι εμφανίζουν θετικές τιμές συντελεστή προσδιορισμού υψηλότερες με τα πληθυσμιακά δεδομένα. Στους νομούς αυτούς η αύξηση των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού συνδέθηκε με παράλληλη αύξηση του μόνιμου πληθυσμού.

Αμφίρροποι Οικονομικά & Πληθυσμιακά (Both GDP & Pop Centric)

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει νομούς οι οποίοι εμφανίζουν ισοδύναμες τιμές συσχέτισης τόσο με τα οικονομικά στοιχεία του ΑΕΠ όσο και με τα δεδομένα του μόνιμου πληθυσμού.

Στάσιμοι (Stable)

Ως *Στάσιμοι* χαρακτηρίζονται οι νομοί οι οποίοι κατά την ανάλυση παλινδρόμησης προέκυψε ότι εμφανίζουν πολύ χαμηλή συσχέτιση ($0 \leq R^2 \leq 0.2$) τόσο με τα στοιχεία του ΑΕΠ όσο και με τον μόνιμο πληθυσμό. Οι νομοί αυτοί χαρακτηρίζονται από μικρές τάσεις αυξομείωσης στο σύνολο των επιλεγόμενων μεταβλητών.



Σχήμα 2.20 Διάγραμμα σκεδασμού των τιμών του R^2 μεταξύ των αθροιστικών τιμών SOL – GDP και SOL - Pop. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

Οι ταξινομημένοι νομοί στις τέσσερις αυτές κατηγορίες δυναμικού, απεικονίζονται στον Πίνακα 5. Παρατηρείται ότι στην πλειονότητα των νομών κύριος παράγοντας αύξησης των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού αποτέλεσε η πληθυσμιακή μεγέθυνση, ενώ μεγάλος αριθμός νομών οφείλει την ανάπτυξη της χρήσης του ηλεκτροφωτισμού τόσο στην πληθυσμιακή μεγέθυνση όσο και στην ανάπτυξη της οικονομικής δραστηριότητας όπως αυτή καταγράφεται στον δείκτη του ΑΕΠ.

POP Centric	GDP Centric	Both POP & GDP Centric	Stable
Αρκαδίας	Ηλείας	Αιτωλοακαρνανίας	Βοιωτίας
Άρτας	Θεσπρωτίας	Αργολίδος	Γρεβενών
Αχαΐας	Καβάλας	Αττικής	Δράμας
Δωδεκανήσου	Καστοριάς	Έβρου	Ευρυτανίας
Εύβοιας	Λέσβου	Ζακύνθου	Λακωνίας
Ηρακλείου	Λευκάδος	Ημαθίας	Λασιθίου
Ιωαννίνων	Μεσσηνίας	Θεσσαλονίκης	Σάμου
Καρδίτσας	Πρεβέζης	Κοζάνης	Φωκίδος
Κέρκυρας	Σερρών	Μαγνησίας	
Κεφαλληνίας	Φθιώτιδος	Πιερίας	
Κυκλίκης		Ρεθύμνης	
Κορινθίας		Τρικάλων	
Κυκλάδων		Φλώρινας	
Λάρισας		Χανίων	
Ξάνθης		Χίου	
Πέλλας			
Ροδόπης			
Χαλκιδικής			

Πίνακας 5. Ταξινομημένοι νομοί στις τέσσερις κύριες ομάδες βάσει του δυναμικού συσχέτισης μεταξύ των τιμών SOL – POP και SOL GDP. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

Στην κατηγορία *Stable* παρατηρείται ότι εντάσσονται οι νομοί οι οποίοι όπως βρέθηκε από την διαχρονική ανίχνευση και ποσοτική ανάλυση, δεν σημείωσαν σημαντικές τάσεις αυξομείωσης ως προς την μεταβολή των ΝΕΦ. Οι νομοί αυτοί αποτελούν τους πλέον ασθενέστερους στο σύνολό του Ελλαδικού και χαρακτηρίζονται από τάσεις δημογραφικής γήρανσης και οικονομικής συρρίκνωσης.

Ασθενή	Μέση	Ισχυρή	Στάσιμη
Αιτωλοακαρνανίας	Αχαΐας	Αργολίδος	Κεφαλληνίας
Αρκαδίας	Δωδεκανήσου	Αττικής	Κέρκυρα
Άρτας	Έβρου	Ζακύνθου	Κυκλάδων
Βοιωτίας	Ηλείας	Καβάλας	Σάμου
Δράμας	Ημαθίας	Ξάνθης	
Εύβοιας	Θεσσαλονίκης	Πιερίας	
Ηρακλείου	Καστοριάς		
Ιωαννίνων	Κιλκίς		
Καρδίτσας	Κορινθίας		
Κοζάνης	Λάρισας		
Λακωνίας	Μαγνησίας		
Λασιθίου	Μεσσηνίας		
Λέσβου	Ροδόπη		
Πέλλας	Σερρών		
Ρεθύμνης	Φθιώτιδος		
Σερρών	Φλώρινας		
Τρικάλων	Χαλκιδικής		
Φωκίδος			
Χανίων			
Χίου			

Πίνακας 6. Ταξινόμηση των νομών με βάση το δυναμικό συσχέτισης μεταξύ των τιμών SOL και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

Στη συνέχεια, βάσει των τιμών δυναμικού της συσχέτισης μεταξύ των αθροιστικών τιμών του δείκτη SOL και των δεδομένων κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, ταξινομήθηκαν οι νομοί σε τέσσερις κατηγορίες: Ασθενής συσχέτισης ($0.2 \leq R^2 \leq 0.4$), Μέσης συσχέτισης ($0.4 \leq R^2 \leq 0.6$), Ισχυρής ($R^2 > 0.6$) και Στάσιμη ($R^2 < 0.2$).

2.3.3 Μοντελοποίηση και χαρτογράφηση του φαινομένου της φωτορύπανσης

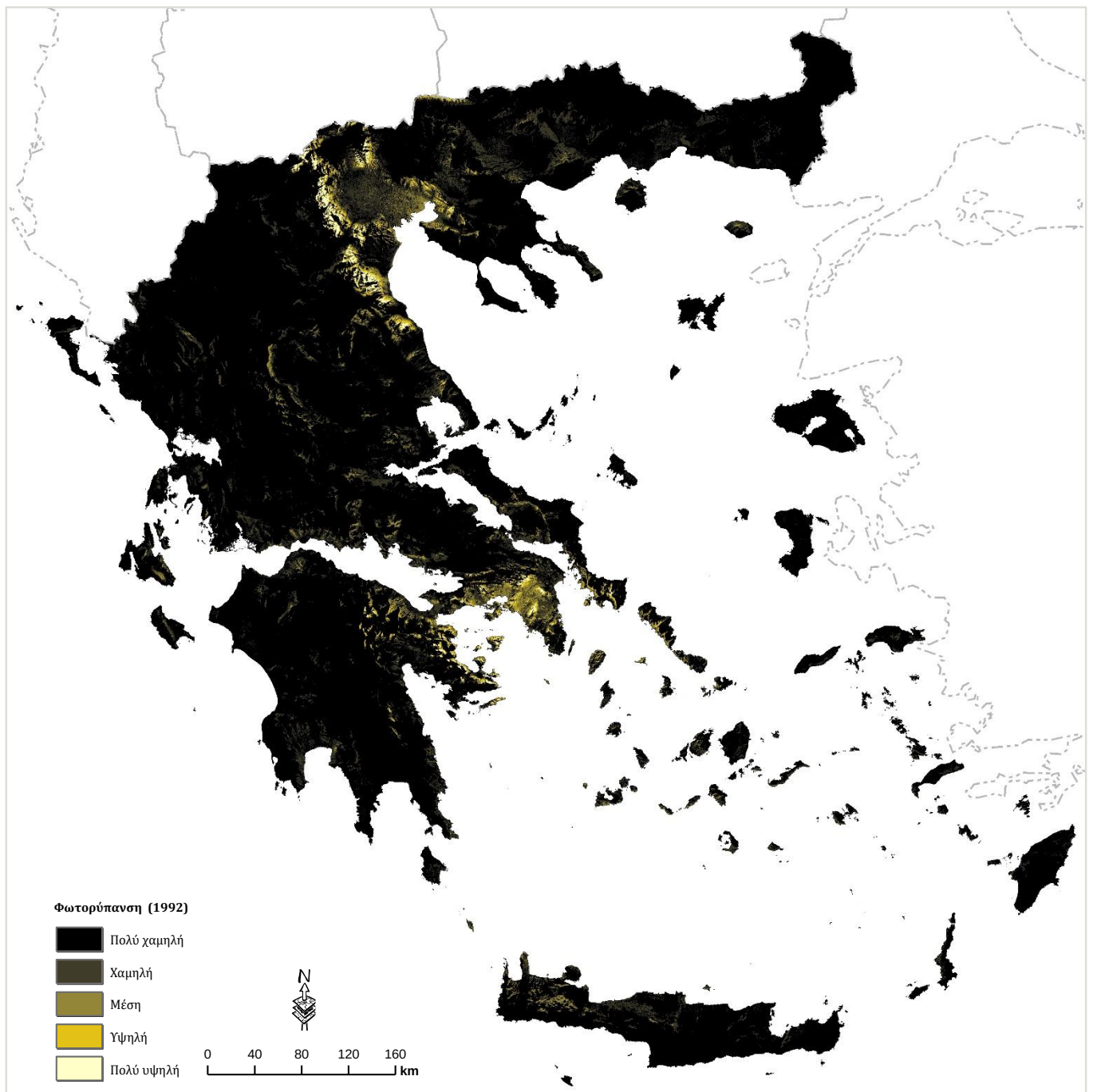
Στην ενότητα αυτή εφαρμόζεται μεθοδολογία στα πλαίσια χρήσης κατάλληλων εργαλείων που προσφέρει η σύγχρονη τεχνολογία των GIS, για την μοντελοποίηση και χαρτογράφηση δύο βασικών παραμέτρων του φαινομένου της φωτορύπανσης, της άμεσης (direct) και έμμεσης (indirect) φωτορύπανσης.

2.3.3.1 Άμεση φωτορύπανση

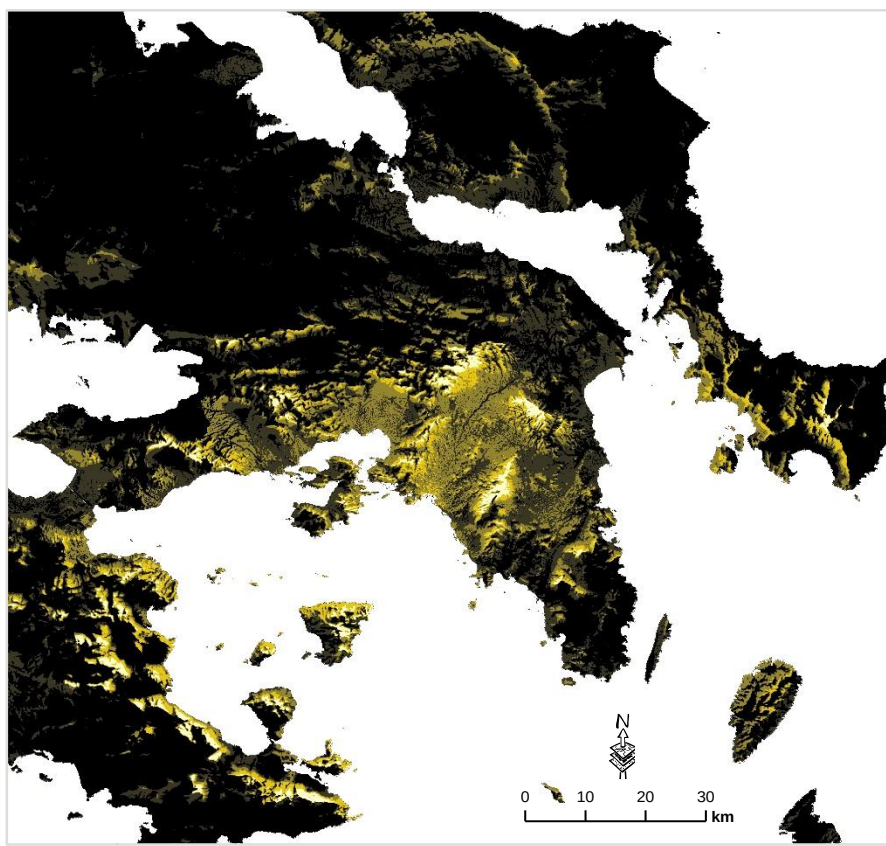
Με τον όρο άμεση φωτορύπανση δηλώνεται η παράμετρος εκείνη που αφορά την άμεση οπτική επαφή ενός παρατηρητή με τις τεχνητές ανθρωπογενείς πηγές νυχτερινού φωτισμού σε μια δεδομένη περιοχή. Για την διερεύνηση και ποσοτικοποίηση της χωρικής έκτασης και έντασης της άμεσης φωτορύπανσης που δέχεται ένας παρατηρητής κατασκευάστηκαν δύο θεματικοί χάρτες για το σύνολο του Ελλαδικού χώρου αξιοποιώντας τις τελικές διορθωμένες δορυφορικές εικόνες DMSP – OLS Stable lights, των ετών 1992 – 2013, καθώς και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης (Σχήμα 2.2).

Η μεθοδολογία έλαβε χώρα σε περιβάλλον GIS, στο λογισμικό ArcMap 10.2.1 της ESRI, αξιοποιώντας μια σειρά από πλούσια εργαλεία που προσφέρονται για την ανάλυση ορατότητας (visibility analysis). Ως παρατηρητές τέθηκαν οι φωτοβολούμενες περιοχές για κάθε χρονική περίοδο, εξάγοντας τις επιφάνειες αυτές ως σημειακές οντότητες. Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι νέο ψηφιδωτό αρχείο κανάβου (GRID) στο οποίο κάθε ψηφίδα λαμβάνει μια τιμή η οποία αντιστοιχεί στο σύνολο των ψηφίδων οι οποίες μπορούν να γίνουν διακριτές από αυτήν. Σημειώνεται ότι λόγω του μεγάλου όγκου των σημειακών οντοτήτων η εκτέλεση του αλγορίθμου απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ και αποτελεί μια πολύωρη επαναληπτική διαδικασία η οποία διήρκησε συνολικά 52 συνεχείς ώρες. Οι τιμές των τελικών ψηφιδωτών προϊόντων ταξινομήθηκαν κατάλληλα για τον προσδιορισμό της χωρικής διαφοροποίησης της έντασης της άμεσης φωτορύπανσης.

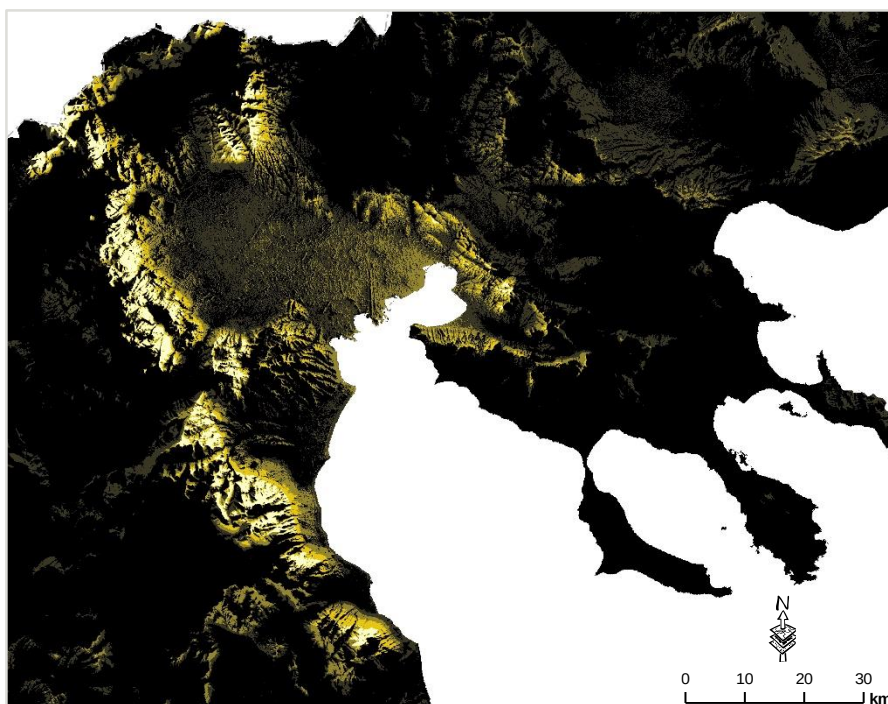
Στο παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι θεματικοί χάρτες της άμεσης φωτορύπανσης για το σύνολο του Ελλαδικού χώρου.



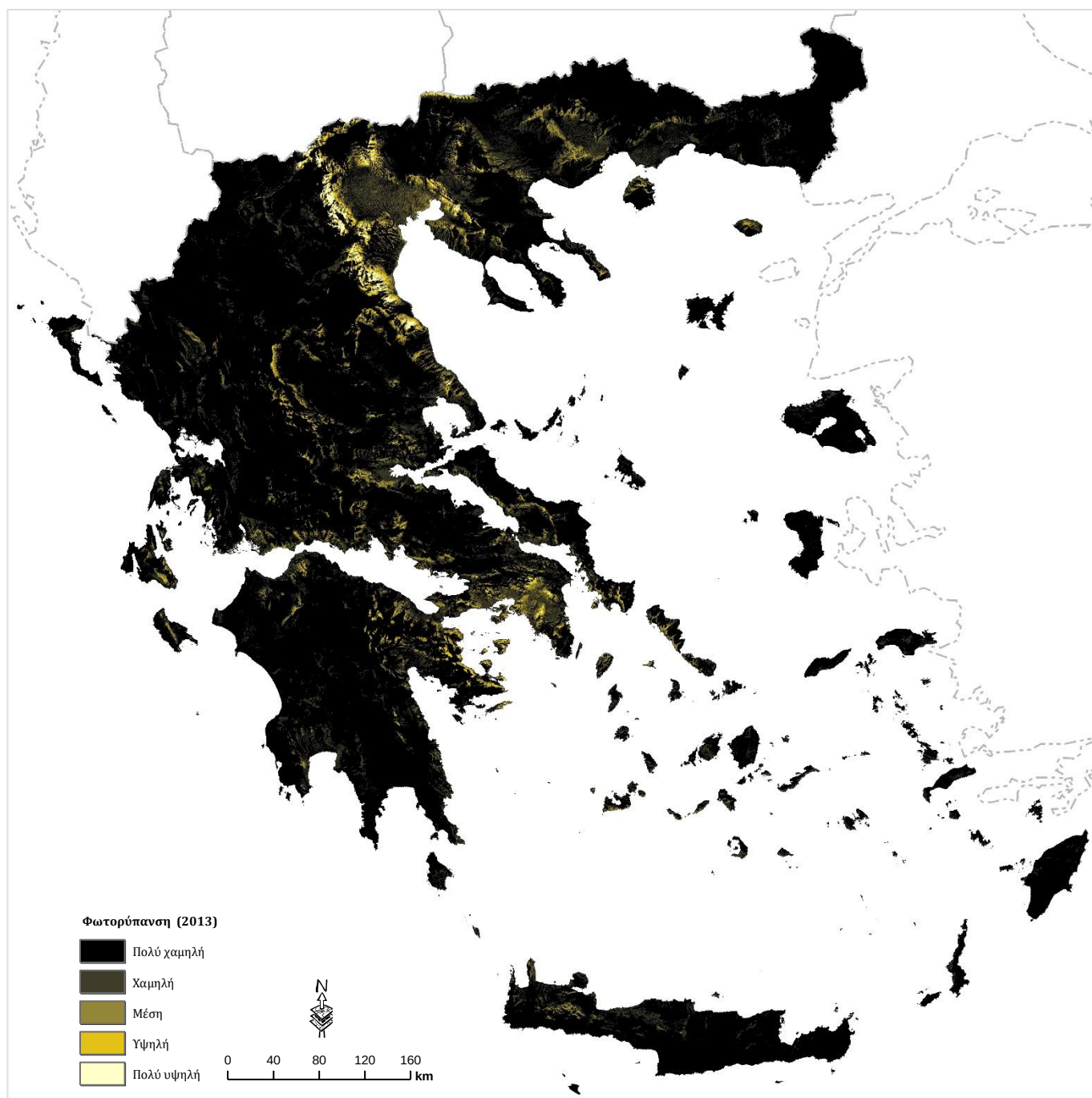
Σχήμα 2.21 Άμεση φωτορύπανση στον Ελλαδικό χώρο κατά το έτος 1992. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία.



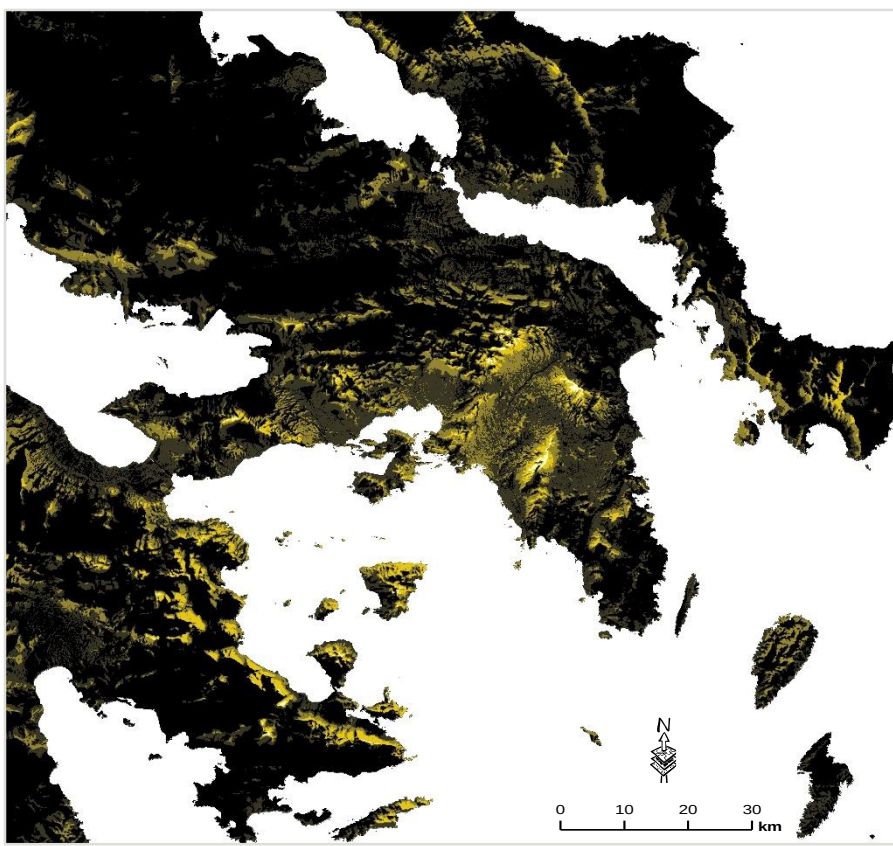
Σχήμα 2.22 Άμεση φωτορύπανση στον ευρύτερο χώρο του νομού Αττικής κατά το έτος 1992. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία



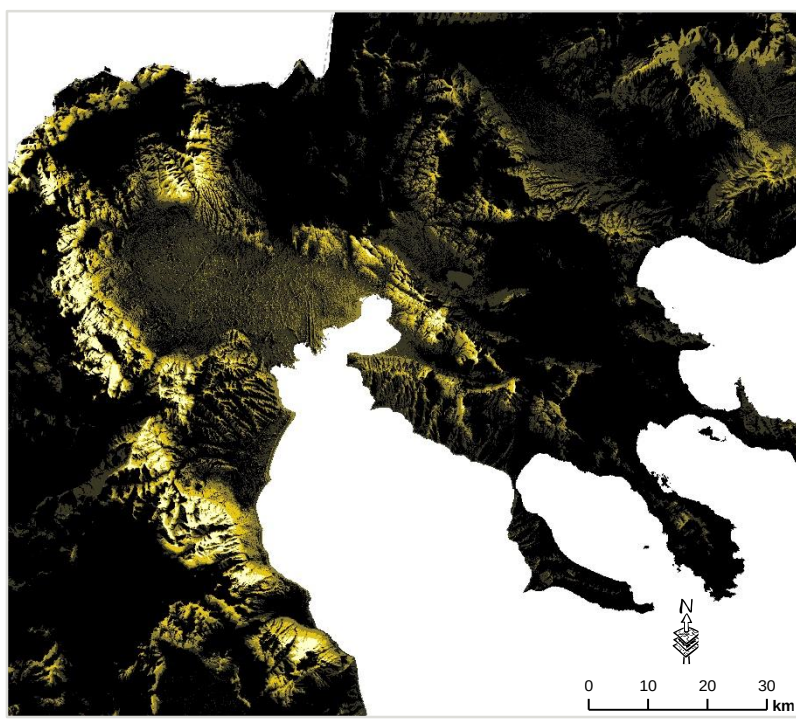
Σχήμα 2.23 Άμεση φωτορύπανση στον ευρύτερο χώρο του νομού Θεσσαλονίκης κατά το έτος 1992. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία



Σχήμα 2.24 Άμεση φωτορούπανση στον Ελλαδικό χώρο κατά το έτος 2013. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία



Σχήμα 2.25 Άμεση φωτορύπανση στον ευρύτερο χώρο του νομού Αττικής κατά το έτος 2013. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία



Σχήμα 2.26 Άμεση φωτορύπανση στον ευρύτερο χώρο του νομού Θεσσαλονίκης κατά το έτος 2013. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

Από την ανάγνωση των παραπάνω θεματικών χαρτών γίνεται εμφανής η επίδραση που ασκούν οι τεχνητές πηγές φωτισμού των μεγάλων μητροπολιτικών αστικών κέντρων, κυρίως αυτό των Αθηνών και Θεσσαλονίκης, στην φυσική φωτεινότητα του νυχτερινού ουρανού. Κατά συνέπεια ένα μεγάλο τμήμα της περιφέρειας της Κεντρικής Μακεδονίας και σχεδόν το σύνολο του νομού Αττικής έχουν «εγκλωβιστεί» σε ένα φωτεινό ουράνιο πέπλο εντός του οποίου η τεχνητή φωτεινότητα του νυχτερινού ουρανού υπερβαίνει έως και 5000% τα επίπεδα της φυσικής φωτεινότητας. Για να διαφύγει ένας παρατηρητής από αυτή τη ζώνη επιρροής των υπερβολικά υψηλών επιπέδων τεχνητού φωτισμού στον ουράνιο θόλο χρειάζεται να ταξιδέψει εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από τα αστικά κέντρα.

Οι περιοχές οι οποίες καταφέρνουν και διατηρούν τα επίπεδα του τεχνητού φωτισμού σε περισσότερο φυσιολογικά πλαίσια εντοπίζονται στο βορειοανατολικό τμήμα του Ελλαδικού χώρου, στους νομούς Έβρου, Ροδόπης, και στο ορεινό τμήμα του νομού Δράμας, στο βορειοδυτικό τμήμα, στους νομούς της περιφέρειας δυτικής Μακεδονίας, στην κεντρική και νότια Πελοπόννησο, καθώς και σε ορισμένες νησιωτικές περιοχές του νομού Κυκλάδων, Δωδεκανήσου και την Ανατολική Κρήτη.

Οι ποσοτικές μεταβολές που σημειώθηκαν στην χωρική έκταση της φωτορύπανσης στο χρονικό διάστημα 1992 – 2013 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Παρατηρείται ότι οι γεωγραφικές περιοχές με πολύ χαμηλά επίπεδα τεχνητού φωτισμού έχουν περιοριστεί κατά 4.2%, ενώ μικρή πτωτική τάση σημειώθηκε και στις περιοχές με πολύ υψηλή φωτορύπανση.

Φωτορύπανση	Έκταση 1992 (km ²)	% Έκταση 1992 (km ²)	Έκταση 2013 (km ²)	% Έκταση 2013 (km ²)	% Μεταβολή 1992 - 2013
Πολύ χαμηλή	114538	86.76	109004	82.6	-4.2
Χαμηλή	12365	9.37	16094	12.2	2.8
Μέση	3397	2.57	5036	3.8	1.2
Υψηλή	1071	0.81	1321	1.0	0.2
Πολύ υψηλή	644	0.49	561	0.4	-0.1

Πίνακας 7. Ποσοστά μεταβολών της έκτασης του δυναμικού φωτορύπανσης στον Ελλαδικό χώρο κατά την περίοδο 1992 - 2013. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

Το ποσοστό αυτό μείωσης (0.1%), το οποίο αντιστοιχεί σε περιοχές με υψηλή ορατότητα στο πεδίο επίδρασης του τεχνητού φωτισμού των μεγάλων αστικών κέντρων, όπως έχει προαναφερθεί πιθανώς οφείλεται στην ανάληψη προγραμμάτων δράσεων εξοικονόμησης ενέργειας και διαχείρισης του δημόσιου ηλεκτροφωτισμού καθώς και στην συρρίκνωση της οικονομικής δραστηριότητας που σημειώνεται τα τελευταία 6 χρόνια στο σύνολο του Ελλαδικού χώρου. Ο διαφαινόμενος περιορισμός των περιοχών που επηρεάζονται από υψηλά επίπεδα οχληρού φωτός αναδεικνύει τις ευκαιρίες που υφίστανται ακόμη για την λήψη περιοριστικών μέτρων με στόχο τον έλεγχο και την περιστολή της φωτορύπανσης. Αντίθετα, περιοχές με χαμηλά έως υψηλά επίπεδα φωτορύπανσης σημείωσαν αυξητική τάση γεγονός που πιθανώς οφείλεται στην μεγέθυνση των οικισμών και στην φυσική πληθυσμιακή αύξηση.

2.3.3.1 Έμμεση φωτορύπανση

Με τον όρο έμμεση φωτορύπανση δηλώνεται η οπτική επαφή ενός παρατηρητή με τον τεχνητό φωτεινό ουράνιο θόλο (sky glow, light dome) που εμφανίζεται στο νυχτερινό ουρανό μεγάλων άστεων.

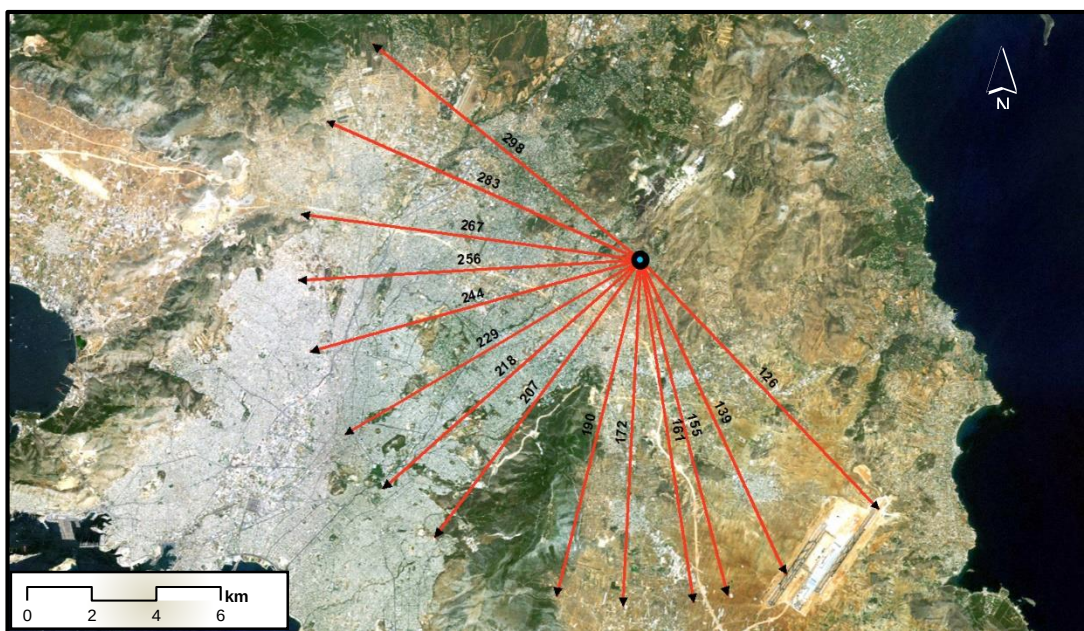
2.3.3.1.1 Λήψη μετρήσεων των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού

Για την μελέτη και ανάλυση της έμμεσης φωτορύπανσης, στα πλαίσια εκπόνησης της πρακτικής άσκησης στο Ε.Α.Α., πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των εκπομπών του νυχτερινού φωτισμού πάνω από την ευρύτερη περιοχή του Λεκανοπεδίου Αττικής. Οι λήψεις μετρήσεων των επιπέδων φωτεινότητας των νυχτερινού ουρανού ως συνάρτηση της ζενίθιας γωνίας και της γωνίας αζιμούθιου, αποτελεί ένα ευρέως αξιοποιήσιμο και χρήσιμο ποσοτικό μέσο εκτίμησης των επιπέδων του τεχνητού φωτισμού σε μια συγκεκριμένη περιοχή (Birriel & Kevin, 2010). Μια κοινή πρακτική για την λήψη μετρήσεων είναι η αξιοποίηση CCD φωτογραφικών μηχανών ή τηλεσκοπίων με τις οποίες λαμβάνονται φωτομωσαϊκά της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού σε διάφορες γωνίες αζιμούθιου και ζενίθ, οι οποίες στη συνέχεια μέσω εξειδικευμένης ψηφιακής επεξεργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της φωτορύπανσης σε μια περιοχή (Duriscoe et al., 2007; Krisciunas et al., 2010; Falchi et al., 2011; Hampf et al., 2011; Bilki et al., 2012; Birriel et al., 2014; Pun et al., 2014; Rabaza et al., 2014).

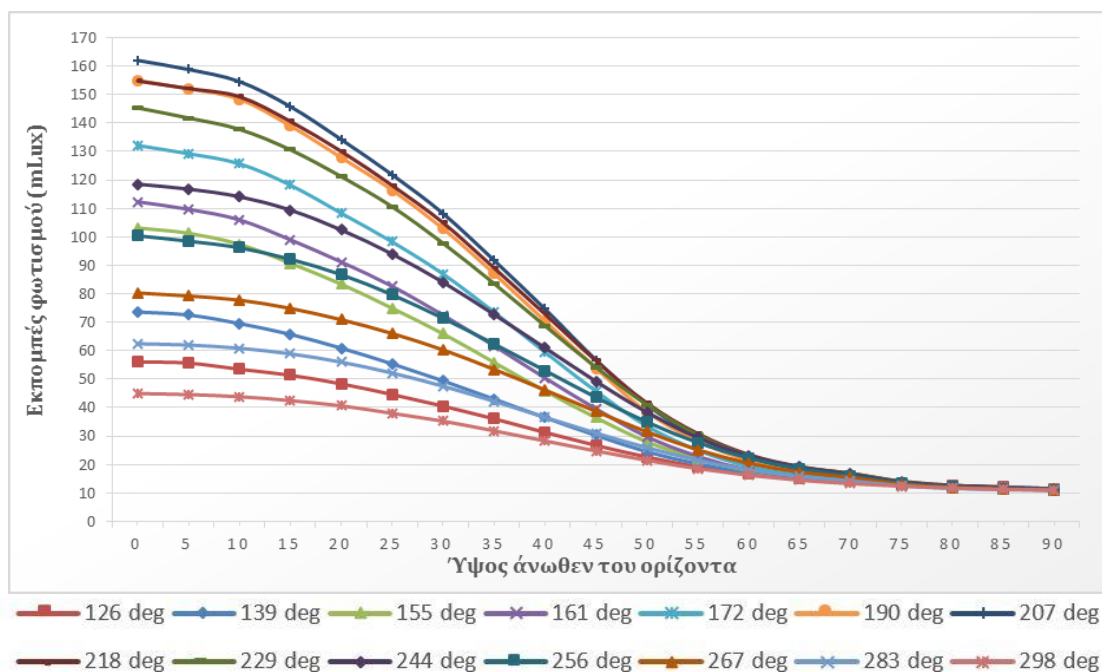
Παρόλο που αυτού του είδους τα όργανα παρέχουν ακριβείς, γρήγορες και επαναλαμβανόμενες μετρήσεις, αποτελεί μια ιδιαίτερα αυξημένου κόστους πρακτική (Birriel & Kevin, 2010). Πρόσφατα η εισαγωγή χαμηλού κόστους εξειδικευμένων οργάνων φωτομετρίας για την λήψη μετρήσεων της έντασης της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού, τα SQMs (Sky Quality Meters) έχουν συμβάλλει στην διάδοση και γενική χρήση τους στο ευρύ κοινό συνθέτοντας έτσι ένα παγκόσμιο παρατηρητήριο μετρήσεων.

Στην παρούσα εργασία οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Ι.Ε.Π.Β.Α, στον λόφο Κουφού, Πεντέλη Αττικής. Η ημερομηνία πραγματοποίησης των μετρήσεων ορίστηκε ύστερα από επισκόπηση των αστρονομικών (φάση σελήνης) και μετεωρολογικών συνθηκών ούτως ώστε η παρεμβολή από φυσικές πηγές φωτισμού και νεφών να είναι οι ελάχιστες. Οι μετρήσεις του νυχτερινού φωτισμού στο Λεκανοπέδιο Αττικής πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση επαγγελματικού φωτόμετρου LMT B510A, με αισθητήρα ακριβείας LMT P30SCT διαμέτρου 3cm το οποίο λαμβάνει μετρήσεις φωτισμού στο ορατό φάσμα με μονάδα μέτρησης στο SI (Διεθνές Σύστημα Μονάδων), το Lux, με εύρος λειτουργίας 0.001 – 600000 Lux. Το φωτόμετρο τοποθετήθηκε σε αναλογικό θεοδόλιχο για τη λήψη μετρήσεων σε διάφορες γωνίες ζενίθ και αζιμούθιου ούτως ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή των χωρικών διαφοροποιήσεων στις τιμές του φωτισμού (Σχήμα 2.27) (βλ. Παράρτημα).

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2.27 παρουσιάζονται οι ληφθείσες μετρήσεις των ΝΕΦ στο λεκανοπέδιο Αττικής ως είχαν στις 26/05/2014. Παρατηρείται ότι η ένταση του νυχτερινού φωτισμού φθίνει καθώς η διεύθυνση παρατήρησης απομακρύνεται από τον πυρήνα του αστικού ιστού της Αθήνας προς τα προάστια. Επιπλέον οι τιμές φωτισμού λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές στο οριζόντιο επίπεδο παρατήρησης (γωνία ζενίθ 90°) γεγονός που οφείλεται στην άμεση διάδοση της ακτινοβολίας φωτός από τα φωτιστικά σώματα στο οπτικό πεδίο παρατήρησης, ενώ οι ελάχιστες τιμές σημειώνονται σε μεγάλο κατακόρυφο ύψος (γωνία ζενίθ < 25°).

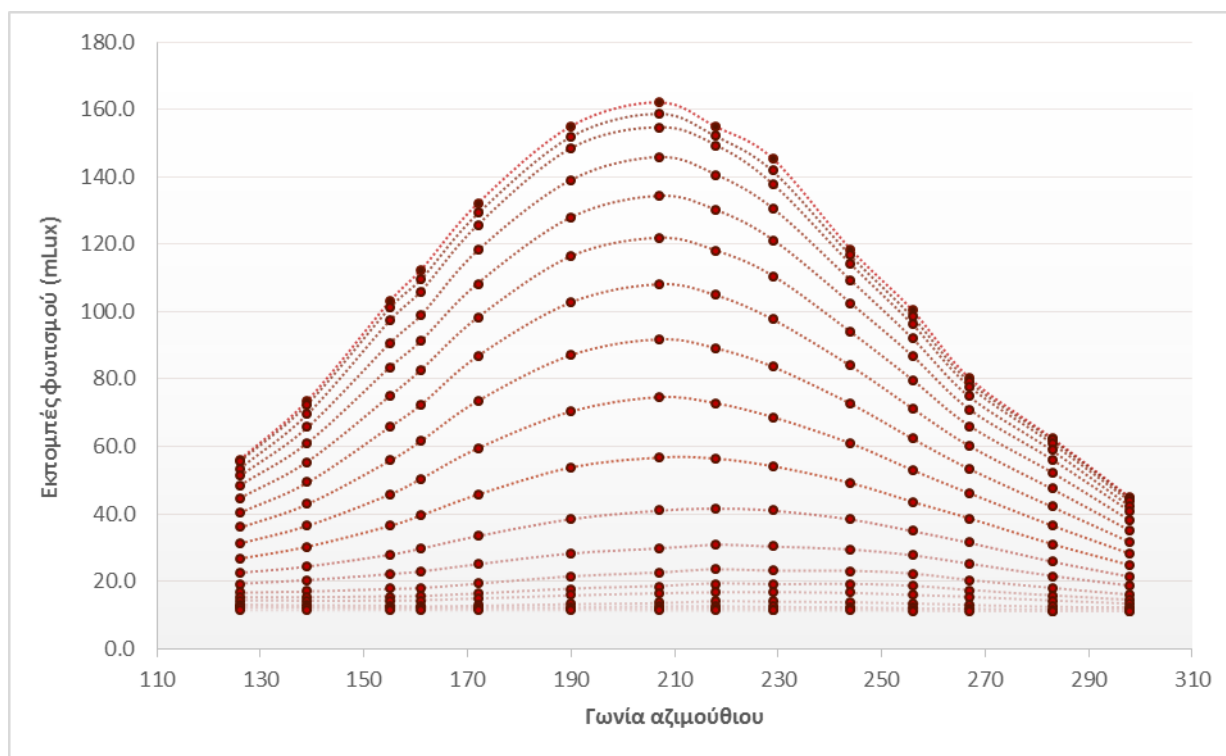


Σχήμα 2.27. Γωνίες αζιμούθιου για τη λήψη μετρήσεων των νυκτερινών εκπομπών φωτισμού.
Πηγή: Δορυφορική εικόνα υποβάθρου ESRI. Προσωπική επεξεργασία



Σχήμα 2.28. Μετρήσεις νυκτερινού φωτισμού στο Λεκανοπέδιο Αττικής όπως λήφθηκαν από το λόφο Κουφού, Πεντέλη Αττικής. **Πηγή:** Προσωπική επεξεργασία

Επιπλέον, από την ερμηνεία των μετρήσεων καθίσταται δυνατή η εκτίμηση του ύψους του τεχνητού φωτεινού ουράνιου θόλου που σχηματίζεται πάνω από το λεκανοπέδιο Αττικής. Αυτό γίνεται διακριτό στο διάγραμμα του σχήματος 2.29, στο οποίο απεικονίζεται η κατά προσέγγιση μορφή του ουράνιου θόλου.



Σχήμα 2.29. Σχηματική απεικόνιση του τεχνητού φωτεινού ουράνιου θόλου στο Λεκανοπέδιο Αττικής.
Πηγή: Προσωπική επεξεργασία

Τέλος, για την επαλήθευση των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ο εξελιγμένος νόμος του Walker με τον οποίο υπολογίστηκε το ποσοστό αύξησης των επιπέδων φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού στο Λεκανοπέδιο Αττικής.

$$\Delta I = c \cdot p \cdot r^{-n} \quad (7)$$

Όπου ΔI η αύξηση του επιπέδου της τεχνητής φωτεινότητας σε ύψος 45° άνωθεν της πόλης αναφοράς, p ο πληθυσμός της πόλης, r η απόσταση σε km από τον παρατηρητή έως το κέντρο της πόλης, ενώ οι παράμετροι c , n κυμαίνονται σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$c = 0.01 \text{ \& } n = 2.5, \text{ για αποστάσεις } 10 < r < 50$$

$$c = 0.000632 \text{ \& } n = 1.4281, \text{ για αποστάσεις } r < 10$$

Πόλη	Συντεταγμένες (φ, λ)	Πληθυσμός (2011)	Παρατηρητήριο	Συντεταγμένες (φ, λ)	Απόσταση (km)	Γωνία αζιμούθιου
Αθήνα	37.975, 23.743	3.828.434	Λόφος Κουφού Πεντέλη	38.047, 23.865	13.37	233.1°

Πίνακας 7. Παράμετροι για την εφαρμογή της εξίσωσης του Walker στο λεκανοπέδιο Αττικής.

Πηγή: Προσωπική επεξεργασία

Στη συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται η παραδοχή, ότι η φωτεινή ένταση I που εκπέμπεται από τα φωτιστικά σώματα κατανέμεται ισότροπα στον ουράνιο θόλο του Λεκανοπεδίου Αττικής. Επιπλέον, η φυσική φωτεινότητα των ουράνιων σωμάτων (άστρα, σελήνη) καθώς και η ύπαρξη διαφόρων σκεδαστών στην ατμόσφαιρα είναι αμελητέα, δηλαδή, θεωρείται ότι κατά προσέγγιση οι συνθήκες παρατήρησης είναι οι ιδανικές.

Από την εφαρμογή της εξίσωσης του Walker βρέθηκε τιμή $\Delta I = 58.58$. Η ερμηνεία της τιμής αυτής είναι ότι στο λόφο Κουφού, στο Ε.Α.Α, σε απόσταση 13.37km από το κέντρο της Αθήνας, σε ύψος 45° άνωθεν του οριζόντιου επιπέδου παρατήρησης και γωνία αζιμούθιου 233° η φωτεινότητα του νυχτερινού ουρανού είναι έως και 5858% (!) υψηλότερη από την αντίστοιχη φωτεινότητα του φυσικού ουρανού υποβάθρου. Η μετρούμενη τιμή που κατέγραψε το ηλεκτροφωτόμετρο για την αντίστοιχη γωνία ύψους και αζιμούθιου είναι 51.7 lux, διαφορά της τάξης των 6.88 μονάδων lux, σφάλμα ικανοποιητικά μικρό. Ορίζοντας αποστάσεις τυχαίων στον χώρο παρατηρητηρίων υπολογίστηκε ότι για να διαφύγει ένας παρατηρητής από την ζώνη αυτή του έντονου οχληρού φωτός, χρειάζεται να ταξιδέψει έως και 422km μακριά ώστε τα επίπεδα τεχνητής φωτεινότητας να ισορροπήσουν με την φυσική φωτεινότητα, δηλαδή τιμή $\Delta I = 10\%$.

3. Συζήτηση - Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια εις βάθος προσπάθεια μελέτης και ανάλυσης του φαινομένου της φωτορύπανσης η οποία τείνει να αποτελέσει ένα μείζον παγκόσμιο περιβαλλοντικό και κοινωνικοπολιτικό πρόβλημα. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε το σύνολο του Ελλαδικού χώρου ο οποίος παρουσιάζει ιδιαίτερα τοπογραφικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με αυτά άλλων Ευρωπαϊκών χωρών, προσδίδοντας έτσι ένα ανομοιογενές προφίλ στην χωρική κατανομή και διασπορά των αστικών περιοχών τα οποία αποτελούν τις σημαντικότερες ανθρωπογενείς τεχνητές πηγές φωτισμού. Κύριοι στόχοι αποτέλεσαν αφενός η χαρτογράφηση των διαχρονικών μεταβολών στα χωροχρονικά πρότυπα των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού που έλαβαν μέρος κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου 1992 – 2013, η ανάλυση συσχέτισης των εκπομπών αυτών με επιλεγμένες στατιστικές μεταβλητές για την προσπάθεια κατανόησης των αιτιογενών παραγόντων, και τέλος η μοντελοποίηση και χαρτογράφηση του φαινομένου της φωτορύπανσης.

Αξιοποιώντας μια σειρά από πλούσια εργαλεία που προσφέρουν τόσο η τεχνολογία των GIS όσο και της τηλεπισκόπησης αναπτύχθηκε προτεινόμενη μεθοδολογία για την επίτευξη των παραπάνω στόχων. Στα πλαίσια αυτά, δημιουργήθηκε και οργανώθηκε ειδικά σχεδιασμένη γεωβάση, πυρήνας της οποίας αποτελούν τα δορυφορικά δεδομένα σταθερού φωτισμού των δορυφόρων DMSP – OLS της χρονοσειράς 1992 – 2013. Καθώς οι πρωτογενείς δορυφορικές εμπεριέχουν μια σειρά από σημαντικά συστηματικά σφάλματα, όπως έλλειψη ραδιομετρικής βαθμονόμησης, κορεσμός (overglow) των εικονοστοιχείων και υπερεκτίμηση της πραγματικής χωρικής διάστασης των τεχνητών πηγών φωτισμού, αλλά και σφάλματα στην γεωαναφορά των εικόνων., πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαιτούμενες ενέργειες για την διόρθωση των δορυφορικών εικόνων.

Από την ανάλυση των διαχρονικών μεταβολών στα χωρικά πρότυπα των ΝΕΦ της χρονοσειράς δεδομένων βρέθηκε ότι κατά τα τελευταία 22 χρόνια αφενός σημειώθηκε μια σημαντική αύξηση στις τεχνητές πηγές φωτισμού οι οποίες οφείλονται στην πληθυσμιακή αύξηση και την επακόλουθη μεγέθυνση των αστικών περιοχών, αφετέρου υπάρχουν ενδείξεις πτωτικής τάσης εντός των κύριων αστικών κέντρων όπως το πολεοδομικό συγκρότημα Αθηνών γεγονός το οποίο συνδέεται τόσο με τον

περιορισμό χρήσης του δημόσιου και δημοτικού ηλεκτροφωτισμού εξαιτίας της βαρύνουσας οικονομικής κατάστασης των τελευταίων ετών αλλά και με την εφαρμογή δράσεων και συστημάτων διαχείρισης της ενέργειας. Ωστόσο, σημειώνεται ότι παρά τον ικανοποιητικό βαθμό επιτυχίας βαθμονόμησης των δορυφορικών εικόνων ώστε να καθίσταται εφικτή η χωρική διαφοροποίηση των τιμών φωτεινότητας εντός των πυρήνων των αστικών κέντρων, πρέπει να διατηρούνται ορισμένες επιφυλάξεις ως προς την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Οι νομοί οι οποίοι σημείωσαν ραγδαίες αυξητικές τάσεις στην χωρική έκταση των προτύπων φωτισμού α αποτελούν ο νομός Αττικής με 35.24% αύξηση, ο νομός Ζακύνθου με 28.29%, οι νομοί Θεσσαλονίκης, Πιερίας, Καβάλας και Ημαθίας με 21.4%, 21.04%, 19.69% και 19.15% αντίστοιχα. Όσον αφορά τις αθροιστικές τιμές φωτισμού SOL, ο νομός Ζακύνθου σημείωσε αλματώδη αύξηση αγγίζοντας το 114%.

Η ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού και των στατιστικών μεταβλητών που αφορούν τον μόνιμο πληθυσμό, το ΑΕΠ, και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, σε επίπεδο νομών, ανέδειξε την ικανοποιητική γραμμική συνάφεια που χαρακτηρίζει τις μεταβλητές αυτές. Ωστόσο, σε ορισμένους νομούς η συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων νυχτερινού φωτισμού με τα στατιστικά στοιχεία είναι ιδιαίτερα ασθενής γεγονός που οφείλεται τόσο στην περιορισμένη γεωγραφική έκταση των νομών του Ελλαδικού χώρου συγκριτικά με την χαμηλή χωρική ανάλυση των δορυφορικών εικόνων, καθώς μελέτες έχουν δείξει ότι ο βαθμός συσχέτισης εξαρτάται σημαντικά από το χωρικό επίπεδο ανάλυσης (Doll, Muller & Morley, 2006) όσο και στο στάσιμο προφίλ που παρουσιάζουν διαχρονικά οι νομοί αυτοί ως προς τις επιλεγμένες μεταβλητές. Από την ανάλυση βρέθηκε ότι στην πλειονότητα των νομών τόσο η πληθυσμιακή αύξηση όσο και η οικονομική δραστηριότητα διαδραμάτισαν πρωτεύοντα ρόλο στην μεγέθυνση των ΝΕΦ.

Τέλος η μοντελοποίηση και η χαρτογράφηση του φαινομένου της φωτορύπανσης ανέδειξε τις σημαντικές διαστάσεις που λαμβάνει το φαινόμενο αυτό ακόμα και εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από τις ισχυρές πηγές τεχνητού φωτισμού, τα αστικά κέντρα. Οι νομοί της περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, καθώς και ο νομός Αττικής έχουν «εγκλωβιστεί» σε ένα τεράστιο φωτεινό πέπλο επηρεάζοντας άμεσα τόσο τις νυχτερινές δραστηριότητες, αλλά και το βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων αλλά και όλων των ζωικών και φυτικών οργανισμών. Ιδιαίτερα για τον νομό Αττικής, υπολογίστηκε

ότι σε απόσταση 13.70 km από το κέντρο της πόλης η φωτεινότητα του νυχτερινού υποβάθρου είναι έως και 5858% υψηλότερη από την φυσική φωτεινότητα ενώ η ζώνη επιρροής του οχληρού φωτός προσεγγίζει τα 422km.

Από την παρουσίαση των παραπάνω γίνεται εύκολα κατανοητή η σπουδαιότητα της ιδιότυπης κατηγορίας δορυφορικών δεδομένων νυχτερινού φωτισμού. Το έντονο διεπιστημονικό ενδιαφέρον που έχει προσελκύσει αναμένεται να βελτιώσει περαιτέρω τις υφιστάμενες μεθοδολογίες και πρακτικές για αποτελεσματικότερη ανάλυση και χρήση των δεδομένων αυτών σε μια πληθώρα εφαρμογών. Παράλληλα, η αλματώδης ανάπτυξη της δορυφορικής τεχνολογίας προσφέρει την κατασκευή δορυφορικών συστημάτων για την καταγραφή και συλλογή δεδομένων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εκτόξευση και η επιχειρησιακή λειτουργία του δορυφόρου Suomi NPP ο οποίος τα επόμενα έτη αναμένεται να βελτιώσει και να αναβαθμίσει τα υπάρχοντα διαθέσιμα δεδομένα νυχτερινού φωτισμού, προσφέροντας έτσι λεπτομερέστερη και ακριβέστερη ποσοτική ανάλυση του φαινομένου της φωτορύπανσης.

Πλέον, καταγράφεται ένα παγκόσμιο ενδιαφέρον για την καταγραφή των επιπτώσεων που επιφέρει η φωτορύπανση τόσο στο φυσικό όσο και στο ανθρωπογενές περιβάλλον, αλλά και στην ανάπτυξη και θέσπιση προγραμμάτων και μέτρων περιορισμού σε συνδυασμό με την συνεχή πίεση για αποδοτικότερη διαχείριση ενέργειας. Η αποτελεσματική ανάλυση των δορυφορικών δεδομένων νυχτερινού φωτισμού μπορεί να αποτελέσει τον συνδετικό κρίκο για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών και να βοηθήσει στη αποτελεσματικότερη λήψη αποφάσεων από τους αρμόδιους φορείς.

Βιβλιογραφία

ΕΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Akiyama Y., 2012. *Analysis of light intensity data by the DMSP/OLS satellite image using existing spatial data for monitoring human activity in Japan*, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, I-2.

Albers S., Duriscoe D., 2001. *Modeling Light Pollution from Population Data and Implications for National Park Service Lands*, George Wright Forum, 18, 4, 56-68.

Amaral S., et al., 2005. *Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazonia using DMSP night-time satellite data*, Computers, Environment and Urban Systems, 29, 179-195.

Amaral S., et al., 2006. *DMSP OLS night-time light imagery for urban population estimates in the Brazilian Amazon*, International Journal of Remote Sensing, 27, 5, 855-870.

Anderson S. J., et al., 2010. *Characterizing relationships between population density and nighttime imagery for Denver, Colorado: issues of scale and representation*, International Journal of Remote Sensing.

Aube M., Roby J., Kocifaj M., 2013. *Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility*, Plos One, 8.

Aubrecht C., et al., 2010. *Observing stress of artificial night lighting on marine – A remote sensing application study*, ISPRS TC VII Symposium, XXXVIII, Part 7B.

Baddiley C., 2007. *A model to show the differences in skyglow from types of luminaire designs with a view to recovering rural dark skies*, British astronomical Association - Campaign for Dark Skies.

Baugh K., et al., 2013. *Nighttime Lights Compositing Using the VIIRS Day-Night Band: Preliminary Results*, Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 35, 70-86.

Baugh K., et al., 2010. *Development of a 2009 Stable Lights Product using DMSPOLS data*, Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 30, 114-130.

Bennie J., et al., 2014. *Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed night time lights*, Scientific reports.

Bennie J., et al., 2014. *Mapping artificial lightscapes for ecological studies*, Methods in Ecology and Evolution.

Berg T., et al., 2014. *Disability Glare in the Aging Eye. Assessment and Impact on Driving*, Review, J Optom, 2, 112-118.

Biggs J. D., et al., 2012. *Measuring and mapping the night sky brightness of Perth, Western Australia*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 421, 1450–1464.

Birriel J., Adkins J. K., 2010. *A Simple, Portable Apparatus to Measure Night Sky Brightness at Various Zenith Angles*, JAAVSO, 38.

Birriel J., Walker C., Thornsberry C., 2014. *Analysis of Seven Years of Globe at Night Data*, JAAVSO, 42.

Birriel J., Wheatley J., McMichael C., 2010. *Documenting Local Night Sky Brightness Using Sky Quality Meters: An Interdisciplinary College Capstone Project and a First Step Toward Reducing Light Pollution*, JAAVSO, 38.

Brainard G., et al., 2001. *Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor*, the Journal of Neuroscience, 21(16):6405–6412.

British Astronomical Association Campaign for Dark Skies (CfDS), 2009. *Blinded by the Light?*, britastro.

Butt M. J., 2013. *Estimation of Light Pollution Using Satellite Remote Sensing and Geographic Information System Techniques*, GIScience & Remote Sensing.

Cajochen C., Krauchi K. & Wirz-Justice A., 2003. *Role of Melatonin in the Regulation of Human Circadian Rhythms and Sleep*, Journal of Neuroendocrinology, 15, 432–437.

Cao X., et al., 2014. *Spatialization of electricity consumption of China using saturation-corrected DMSP-OLS data*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 28, 193–200

Cao X., et al., 2009. *A SVM-based method to extract urban areas from DMSP-OLS and SPOT VGT data*, Remote Sensing of Environment, 113, 2205–2209.

Chalkias C., et al., 2006. *Modelling of light pollution in suburban areas using remotely sensed imagery and GIS*, Journal of Environmental Management, 79, 57–63.

Chen, X. & Nordhaus, W. D., 2011. *Using luminosity data as a proxy for economic statistics*, P. Natl. Acad. Sci., 108, 8589–8594.

Cheng L., et al., 2007. *An estimate of the city population in China using DMSP nighttime satellite imagery*, IEEE.

Chepesiuk R., 2009. *Missing the Dark - Health Effects of Light Pollution*, Environews Focus, 117.

Chunyang H., 2012. *Spatiotemporal dynamics of electric power consumption in Chinese Mainland from 1995 to 2008 modeled using DMSP/OLS stable nighttime lights data*, J. Geogr. Sci., 22(1), 125-136.

Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), 1997. *Guidelines for minimizing sky glow*, Vienna: CIE Publications 126

Cinzano P., *Light pollution by luminaires in roadway lighting*, CIE TC4-21, 28 September - 3 October 2003.

Cinzano P., 2000. *Measuring and modelling light pollution*, Journal of the Italian astronomical society, 71.

Cinzano P., 2002. *Light pollution and the situation of the night sky in Europe, in Italy and in Veneto*, Proceedings of the IDA Regional meeting “Venice: Let’s save the night”.

Cinzano P., et al., 2000. *The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 318, 641-657.

Cinzano P., Elvidge C. D., 2004. *Night sky brightness at sites from DMSP-OLS satellite measurements*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 353, 1107–1116.

- Cinzano P., Falchi F., 2012.** *The propagation of light pollution in the atmosphere*, Mon. Not. R. Astron. Soc. xxx, xx-xx.
- Cinzano P., Falchi F., 2013.** *Quantifying light pollution*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer.
- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C. D., 2001.** *The first World Atlas of the artificial night sky brightness*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 328, 689–707.
- Coppin P., Jonckheere I., Nackaerts K., Muys B., & Lambin E., 2004.** *Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review*, International Journal of Remote Sensing, 25, 9, 1565 – 1596.
- Davies T. W., et al., 2013.** *Artificial light alters natural regimes of night-time sky brightness*, Scientific Reports.
- Della Prugna F., 1999.** *Visual measurements and spectral survey of night sky brightness in Venezuela and Italy*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 140, 345-349.
- Doll C., 2008.** *CIESIN Thematic Guide to Night-time Light Remote Sensing and its Applications*, CIESIN Thematic Guide.
- Doll C., Muller J.-P., Morley J., 2006.** *Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery*, Ecological Economics 57, 75– 92.
- Duffy J. F., Czeisler C. A., 2009.** *Effect of Light on Human Circadian Physiology*, NIH Public Access, 4(2): 165–177.
- Duriscoe D. M., Luginbuhl C. B., Elvidge C. D., 2013.** *The relation of outdoor lighting characteristics to sky glow from distant cities*, Lighting Res. Technol., 0, 1–15.
- Duriscoe D., Luginbuhl C., & Moore C., 2007.** *Measuring Night-Sky Brightness with a Wide-Field CCD Camera*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 119.
- Elvidge C. D., et al., 2013.** *Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights*, Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, 35, 62-69.

Elvidge C. D., et al., 2009. *Overview of DMSP Nighttime Lights and Future Possibilities*, Urban Remote Sensing Joint Event.

Elvidge C. D., et al., 1999. *Radiance Calibration of DMSP-OLS Low-Light Imaging Data of Human Settlements*, REMOTE SENS. ENVIRON. , 68, 77–88.

Elvidge C. D., et al., 2007. *Potential for global mapping of development via a nightsat mission*, GeoJournal, 69, 45–53.

Elvidge C. D., et al., 2007. *The Nightsat mission concept*, International Journal of Remote Sensing, 28:12, 2645-2670.

Elvidge C. D., et al., 2010. *Spectral Identification of Lighting Type and Character*, Sensors, 10, 3961-3988.

Elvidge C. D., et al., 1997. *Mapping City Lights With Nighttime Data from the DMSP Operational Linescan System*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 63, 6.

Elvidge C. D., et al., 2001. *Night-time lights of the world: 1994–1995*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 56, 81– 99.

Elvidge C. D., et al., 2012. *The Night Light Development Index (NLDI): a spatially explicit measure of human development from satellite data*, Social Geography, 7, 23–35.

Elvidge C. D., et al., 2007. *Change Detection in Satellite Observed Nighttime Lights: 1992-2003*, Urban Remote Sensing Joint Event.

Elvidge C. D., et al., 2011. *National Trends in Satellite Observed Lighting: 1992–2009*, Remote Sens., 3, 1-x manuscripts.

Elvidge C. D., et al., 2009. *A Fifteen Year Record of Global Natural Gas Flaring Derived from Satellite Data*, Energies, 2, 595-622.

Elvidge C. D., et al., 2013. *National Trends in Satellite Observed Lighting: 1992-2012*, Chapter in “Global Urban Monitoring and Assessment Through Earth Observation”, CRC Press.

- Falchi F., et al.,** 2011. *Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility*, Journal of Environmental Management, 92, 2714-2722.
- Falchi F., et al.,** 2011. *Campaign of sky brightness and extinction measurements using a portable CCD camera*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 412, 33–48.
- Forbes D. J.,** 2013. *The sunshine state, GDP, and the DMSP-OLS: time series trend case study*, Applied Geography, 36, 165-173.
- Forbes D. J., Roberts C.,** 2011. *Multi-temporal Composite Trend Classification using DMSP-OLS Images*, The Florida Geographer, 42.
- Gamba p., Herold M.,** 2009. *Global Mapping of Human Settlement: Experiences, Datasets, and Prospects*, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Gallaway T., Olsen R. D., Mitchell D. M.,** 2010. *The economics of global light pollution*, Ecological Economics, 69, 658–665.
- Garstang, R. H.** 1984. *Improved Scattering Formula for Calculations of Artificial Night-Sky Illumination*, The Observatory, 104, 196–197.
- Garstang, R. H.** 1989. *Night-Sky Brightness at Observatories and Sites*, Publ. Astron. Soc. Pacific, 101 306–329.
- Gaston K. J., et al.,** 2013. *The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal*, Biological Reviews, 88, 912-927.
- Ghosh T., et al.,** 2009. *Estimation of Mexico's informal economy and remittances using nighttime imagery*, Remote Sensing, 1, 418 – 444.
- Ghosh T., et al.,** 2013. *Using Nighttime Satellite Imagery as a Proxy Measure of Human Well-Being*, Sustainability, 5, 4988-5019.
- Hale J. D., et al.,** 2013. *Mapping Lightscapes: Spatial Patterning of Artificial Lighting in an Urban Landscape*, Plos One, 8, 5: e61460.
- Hall R. C.,** 2001. *A history of the military polar orbiting meteorological satellite program*, Office of the historian national reconnaissance office.

- Hampf D., et al.**, 2011. *Measurement of night sky brightness in southern Australia*, Advances in Space Research 48, 1017–1025.
- Han P., et al.**, 2014. *Monitoring Trends in Light Pollution in China Based on Nighttime Satellite Imagery*, Remote Sens., 6, 5541-5558.
- Hipskind S., et al.**, 2011. *Global Night-Time Lights for Observing Human Activity*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 34.
- Huang Q., et al.**, 2014. *Application of DMSP/OLS Nighttime Light Images: A Meta-Analysis and a Systematic Literature Review*, Remote Sens., 6, 6844-6866.
- Hölker F., Moss T.**, 2010. *The Dark Side of Light: A Transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy*, Ecology and Society 15(4): 13.
- Imhoff M. L., et al.**, 1997. *A Technique for Using Composite DMSP/OLS “City Lights” Satellite Data to Map Urban Area*, Remote Sensing Environment, 61, 361-370.
- Imhoff M. L., et al.**, 1997. *Using Nighttime DMSP/OLS Images of City Lights to Estimate the Impact of Urban Land Use on Soil Resources in the United States*, REMOTE SENS. ENVIRON., 59, 105-117.
- Isobe S., Hamamura S.**, 2000. *Light pollution and its energy loss*, Astrophysics and Space Science 273: 289–294.
- Jensen H. W., et al.**, 2001. *A Physically-Based Night Sky Model*, SIGGRAPH conference proceedings.
- Khorram A., Yusefi M., Fardad M.**, 2014. *Assessment of light pollution in Bojnord city using remote sensing data*, International Journal of Environmental Health Engineering, 3, 1.
- Kim M., Hong S.-H.**, 2013. *Relationship between the reflected brightness of artificial lighting and land-use types: a case study of the University of Arizona campus*, Landscape Ecol. Eng.
- Kim M.**, 2012. *Modeling Nightscapes of Designed Spaces—Case Studies of the University of Arizona and Virginia Tech Campuses*, 13th International Conference on Information Technology in Landscape Architecture Proceedings, 455–463.

Kocifaj M., 2011. *A numerical experiment on light pollution from distant sources*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 415, 3609–3615.

Kocifaj M., 2010. *Modelling the spectral behaviour of night skylight close to artificial light sources*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 403, 2105–2110.

Kocifaj M., et al., 2010. *The effect of spatial and spectral heterogeneity of ground-based light sources on night-sky radiances*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 409, 1203–1212.

Kollath Z., 2001. *Measuring and modelling light pollution at the Zselic Starry Sky Park*, Journal of Physics: Conference Series 218, 012001.

Krisciunas K., et al., 2010. *Light pollution at high zenith angles, as measured at Cerro Tololo Inter-American Observatory*, Instrumentation and Methods for Astrophysics (astro-ph.IM).

Kristen J. N., Randy J. N., 2007. *The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences*, Journal of Pineal Research, 43:215–224.

Kyba C. C. M., et al., 2011. *Cloud Coverage Acts as an Amplifier for Ecological Light Pollution in Urban Ecosystems*, Plos One, 6.

Kuechly H., et al., 2012. *Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany*, Remote Sensing of Environment, 126, 39–50.

Lee T. E., et al., 2006. *The NPOESS VIIRS Day/Night Visible Sensor*, American Meteorological Society.

Lee S., et al., 2014. *A New Method for Suomi-NPP VIIRS Day–Night Band On-Orbit Radiometric Calibration*, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing.

Letu H., et al., 2012. *A Saturated Light Correction Method for DMSP/OLS Nighttime Satellite Imagery*, IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing, 50, 2.

Letu H., et al., 2010. *Estimating energy consumption from night-time DMPS/OLS imagery after correcting for saturation effects*, International Journal of Remote Sensing.

Letu H., et al., 2011. Monitoring the electric power consumption by lighting from DMSP/OLS nighttime satellite imagery, IGARSS.

Levin N., et al., 2014. *A new source for high spatial resolution night time images — The EROS-B commercial satellite*, Remote Sensing of Environment 149, 1–12.

Levin N., Duke Y., 2012. *High spatial resolution night-time light images for demographic and socio-economic studies*, Remote Sensing of Environment, 119, 1–10.

Lewin I., 2000. *Light Trespass and Light Pollution*, IESNA Street and Area Lighting conference Minneapolis, Minnesota, USA.

Liao L. B., 2013. *Suomi NPP VIIRS day-night band on-orbit performance*, Journal of Geophysical Research, 118, 12.705–12.718.

Liu Z., et al., 2012. *Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008*, Landscape and Urban Planning 106, 62– 72.

Lo C. P., 2001. *Modeling the Population of China Using DMSP Operational Linescan System Nighttime Data*, 67, 9, 1037-1047.

Longcore T., Rich C., 2004. *Ecological light pollution*, Front Ecological Environment, 2(4): 191–198.

Longcore T., Rich C., 2007. *LIGHTS OUT! FOR NATURE*, Urban Wildlands.

Luginbuhl C., Boley P., Davis D., 2014. *The impact of light source spectral power distribution on sky glow*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 139, 21–26.

Luginbuhl C. B., et al., 2009. *From the Ground Up II: Sky Glow and Near-Ground Artificial Light Propagation in Flagstaff, Arizona*, PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF THE PACIFIC, 121, 204–212.

Luginbuhl C. B., et al., 2009. *From The Ground Up I: Light Pollution Sources in Flagstaff, Arizona*, PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF THE PACIFIC, 121, 185–203.

Ma T., et al., 2012. *Quantitative estimation of urbanization dynamics using time series of DMSP/OLS nighttime light data: A comparative case study from China's cities*, Remote Sensing of Environment, 124, 99–107.

McIntyre I. M., et al., 1989. *Human Melatonin Suppression by Light is Intensity Dependent*, Journal of Pineal Research 6:14-156.

Mellander C., et al., 2013. *Night-Time Light Data: A Good Proxy Measure for Economic Activity*, CESIS.

Metcalf, J. P., 2012. *Detecting and characterizing nighttime lighting using multispectral and hyperspectral imaging*, Calhoun, Naval Postgraduate School.

Miller S. D., 2013. *Illuminating the Capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band*, Remote Sens., 5, 6717-6766.

Miller S. D., 2012. *Suomi satellite brings to light a unique frontier of nighttime environmental sensing capabilities*, National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute, New York, 109.

Min B., et al., 2013. *Detection of rural electrification in Africa using DMSP-OLS night lights imagery*, International Journal of Remote Sensing.

Mizon B., 2002. *Light Pollution: Responses and Remedies*, London: Springer-Verlag

Nagatani I., 2010. *A methodology to create DMSP-OLS night-time mosaic image for monitoring fishing boats*, Proceedings of the 30th Asia-Pacific Advanced Network Meeting.

Nakagawara V. B., et al., 2007. *Aircraft accidents and incidents associated with visual effects from bright light exposures during low-light flight operations*, Optometry, 78, 415-420.

Otsu N., 1979. *A Threshold Selection Method for Gray – Level Histograms*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 9, 1, 62 - 66

Pauley S. M., 2004. *Lighting for the Human Circadian Clock. Recent Research Indicates That Lighting Has Become a Public Health Issue*, Medical Hypotheses, 63, 4, 588–596.

- Pun C. S. J., et al., 2014.** *Contributions of artificial lighting sources on light pollution in Hong Kong measured through a night sky brightness monitoring network*, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 139, 90-108.
- Puschnig J., et al., 2013.** *The night sky brightness at Potsdam - Babelsberg including overcast and moonlit conditions*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer.
- Puschnig J., et al., 2013.** *Night sky photometry and spectroscopy performed at the Vienna University Observatory*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer.
- Rabaza O., et al., 2014.** *A new method of measuring and monitoring light pollution in the night sky*, Lighting Res. Technol., 46, 5–19.
- Raine H., et al., 2007.** *Light pollution and its effect on Yelkouan Shearwaters in Malta; causes and solutions*, Environment life programme.
- Rich C., Longcore C., 2006.** Ecological consequences of artificial night lighting, Island Press, London.
- Riegel K. W., 1973.** *Light Pollution*, Science, 179, 1285-1291.
- Shi K., et al., 2014.** *Evaluating the Ability of NPP-VIIRS Nighttime Light Data to Estimate the Gross Domestic Product and the Electric Power Consumption of China at Multiple Scales: A Comparison with DMSP-OLS Data*, Remote Sens., 6, 1705-1724.
- Shirkey R. C., 2011.** *Sky Glow from Cities: The Army Illumination Model v2*, Army Research Laboratory.
- Small C., 2012.** *Spatiotemporal dimensionality and Time-Space characterization of multitemporal imagery*, Remote Sensing of Environment 124, 793–809.
- Small C., 2011.** *Spatial scaling of stable night lights*, Remote Sensing of Environment, 115, 269–280.
- Small C., Elvidge C. D., 2013.** *Night on Earth: Mapping decadal changes of anthropogenic night light in Asia*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 22, 40–52.

Small C., Elvidge C. D., Baugh K., 2013. *Mapping Urban Structure and Spatial Connectivity with VIIRS and OLS Night Light Imagery*, JURSE.

Small C., Pozzi F., Elvidge C. D., 2005. *Spatial analysis of global urban extent from DMSP-OLS night lights*, Remote Sensing of Environment 96, 277 – 291.

Spangler M. J., 2003. *The DMSP Block 5 Program History at Westinghouse and Northrop Grumman- As remembered by some participants*, Westinghouse Electric Corporation.

Stephen A., Sohail H. & Angele S. *The influence of street lighting on crime and fear of crime*, Crown, London: 1991.

Stephen J. A., Holliday I. E., 1995. *Night driving: effects of glare from vehicle headlights on motion perception*, Ophthal. Physiol. Opt., 15, 545-551.

Stevens R. G., 2009. *Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: assessment of existing evidence*, Oxford University Press, 38, 963–970.

Sutton P. C., Elvidge C. D., Ghosh t., 2007. *Estimation of Gross Domestic Product at Sub-National Scales using Nighttime Satellite Imagery*, International Journal of Ecological Economics & Statistics (IJEES), 8.

Tang M., et al., 2003. *Mapping night-time light emissions in the EU using satellite observed visible-near-infrared emissions as a policy tool: The MANTLE Project*, Geoinformation for European-wide Integration, Benes.

Tavoosi H., et al., 2009. *Modelling light pollution in Suburbs using remote sensing and GIS*, The seventh International Conference on Urban Climate.

Taylor M. M., 2012. *Light Pollution, Nuisance and Planning Laws in the UK: The Legal Methods of Controlling Light Pollution in the UK*, KAST, CSHeB, Seoul, Korea.

Wainscoat R. J., 2009. *The magnificent night sky — why it must be protected from light pollution*, International Astronomical Union, 260.

Walker M. F., 1973. *Light pollution in California and Arizona*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 85, 508 – 519.

Walker, M. F., 1977. *The Effects of Urban Lighting on the Brightness of the Night Sky*, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 89, 405–409.

Walker C., Luginbuhl C., Wainscoat R., 2009. *Lighting and astronomy*, AIP Scitation.

Welsh B. C., Farrington D. P., 2008. *Effects of Improved Street Lighting on Crime*, *Campbell Systematic Reviews*, 13.

Welsh B. C., Farrington D. P., 2007. *Improved Street Lighting and Crime Prevention*, *Brottsförebyggande rådet*, Stockholm.

Wise S., 2007. *Studying the ecological impacts of light pollution on wildlife amphibians as models*, *starlight*.

Wu J., et al., 2013. *Intercalibration of DMSP-OLS nighttime light data by the invariant region method*, *International Journal of Remote Sensing*.

Wu J., et al., 2013. *Exploring factors affecting the relationship between light consumption and GDP based on DMSP/OLS nighttime satellite imagery*, *Remote Sensing of Environment* 134, 111–119.

Yagi H., et al., 2010. *Estimation of night light from the DMSP/OLS*, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XXXVIII, 8.

Yang X., Yue W., Gao D., 2013. *Spatial improvement of human population distribution based on multisensory remote-sensing data: an input for exposure assessment*, *International Journal of Remote Sensing*.

Yao Y., 2012. *Correlation of Human Activities with Population and GDP in Chinese Cities - Based on the Data of DMSP-OLS*, *IJEME*, 2, 3.

Yi K., et al., 2014. *Mapping and Evaluating the Urbanization Process in Northeast China Using DMSP/OLS Nighttime Light Data*, *Sensors*, 14, 3207-3226.

Zeitzer J. M., et al., 2000. *Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression*, *Journal of Physiology*, 526.3, 695—702.

Zeng C., et al., 2011. *Population spatialization in China based on night-time imagery and land use data*, International Journal of Remote Sensing, 32, 24, 9599–9620.

Zhang Q., Seto K. C., 2013. *Can Night-Time Light Data Identify Typologies of Urbanization? A Global Assessment of Successes and Failures*, Remote Sens., 5, 3476–3494.

Zhang Q., Seto K. C., 2011. *Mapping urbanization dynamics at regional and global scales using multi-temporal DMSP/OLS nighttime light data*, Remote Sensing of Environment, 115, 2320–2329.

Zhao N., Ghosh T., Samson E. L., 2012. *Mapping spatio-temporal changes of Chinese electric power consumption using night-time imagery*, International Journal of Remote Sensing.

Zhou Y., et al., 2014. *A cluster-based method to map urban area from DMSP/OLS nightlights*, Remote Sensing of Environment, 147, 173–185.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Καρτάλης Κ., Φειδάς Χ., *Αρχές & εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης*, Γκιούρδας, Αθήνα: 2006.

Κούτρας Μ., Ευαγγελάρας Χ., *Ανάλυση Παλινδρόμησης – Θεωρία και Εφαρμογές*, Σταμούλης, Αθήνα: 2010.

Μ.Ν. Ντυκέν & Κρομυδάκης Ν., 2009. *Η Απόκλιση Πραγματικού – Μόνιμου πληθυσμού στα διάφορα χωρικά επίπεδα της Κρήτης: Καθοριστικός παράγοντας για το χωροταξικό σχεδιασμό*, Πρακτικά 2ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Πολεοδομίας, Χωροταξίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Τόμος III, σελ. 1425–1432

Παπαμάρκος Ν., *Ψηφιακή Επεξεργασία & Ανάλυση Εικόνας*, Νικόλαος Παπαμάρκος, Ξάνθη: 2010.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Τοποθέτηση φωτομετρικού οργάνου στον αναλογικό θεοδόλιχο για την λήψη μετρήσεων των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού στο λεκανοπέδιο Αττικής.