



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΟΡΕΙΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ»
ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΚΕΝΤΡΟ ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Ποσοτικοποίηση της Οικολογικής Φωτορύπανσης στην Περιφέρεια Ηπείρου με Μεθόδους Τηλεπισκόπησης και GIS

ΘΩΜΑΣ ΠΑΠΑΚΟΣΜΑΣ
Φυσικός, ΕΚΠΑ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Καράντζαλος Κ., Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΑΤΜ, ΕΜΠ (Επιβλέπων)

Αργιαλάς Δ., Καθηγητής ΣΑΤΜ, ΕΜΠ

Κολοκούσης Π., Μέλος ΕΔΙΠ ΣΑΤΜ, ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2021

ΣΥΝΟΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η αξιοποίηση υπολογιστικού μοντέλου διάδοσης φωτός και διαθέσιμων τηλεπισκοπικών δεδομένων ανοδικής ακτινοβολίας, για την ποσοτικοποίηση της συνολικής οπτικής ποιότητας του νυχτερινού ουράνιου θόλου, και ως εκ τούτου την απεικόνιση της χωρικής διακύμανσης της οικολογικής φωτορύπανσης στην Περιφέρεια Ηπείρου. Η δυνητική απειλή του νυχτερινού φωτισμού στο φυσικό περιβάλλον, ονόματι «οικολογική φωτορύπανση», είναι ο κύριος άξονας πληθώρας ευρημάτων που συνιστούν μια πλούσια και ανησυχητική βιβλιογραφία. Αναγνωρίζοντας ότι η συνεχής επέκταση των αστικών κέντρων και του οδικού δικτύου στην Περιφέρεια Ηπείρου ακολουθείται από ολοένα αυξανόμενη φωταγόηση, η οποία εγκαθίσταται με βασικό κριτήριο την ενεργειακή κατανάλωση και με ελάχιστη προσοχή σε πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, επιχειρήσαμε για πρώτη φορά την εκτίμηση του μεγέθους της αύξησης των επιπέδων φωτισμού στο φυσικό περιβάλλον. Στο πλαίσιο αυτό, διεξήχθη μια βασική καταγραφή των οικοσυστημάτων της Περιφέρειας Ηπείρου, κατηγοριοποιώντας τα σε προστατευόμενες περιοχές και μη ευαίσθητες δασικές εκτάσεις. Έγινε χρήση του υπολογιστικού μοντέλου «Simplified All-sky Light pollution Ratio» (SALR), μέσω σύνταξης ενός Python script για την επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων VIIRS-DNB του δορυφόρου Suomi-NPP της NASA, με σκοπό την εξαγωγή ενός θεματικού χάρτη της ανθρωπογενούς λαμπρότητας του ουράνιου θόλου, εκφρασμένης ως προς τη φυσική κατάσταση. Εντοπίστηκαν οι περισσότερες απειλούμενες περιοχές και οι σημαντικότερες πηγές φωτορύπανσης, αποκαλύπτοντας την ύπαρξη υπερβολικού φωτισμού στο ήμισυ των οικοσυστημάτων της περιφέρειας, ο οποίος προκαλείται κυρίως από τέσσερις πόλεις και δύο αυτοκινητόδρομους. Επιπλέον, έγινε μια στοιχειώδης πρόβλεψη στην περίπτωση ολικής μετάβασης σε φωτισμό λευκών LED, παρουσιάζοντας την ενδεχόμενη μεγάλη αύξηση της φωτορύπανσης. Τέλος, προτάθηκαν συγκεκριμένες δράσεις για την καλύτερη διαχείριση της λειτουργίας των φωτιστικών σωμάτων και την ορθότερη επιλογή λαμπτήρων LED, εξετάζοντας την προοπτική αξιοποίησης των δυνατοτήτων τους για τη μείωση της παραγόμενης φωτορύπανσης.

ABSTRACT

The aim of this dissertation was to utilise a computational light propagation model and available remotely sensed upward radiance data for the quantification of the visual quality of the night sky dome, and thus the depiction of the spatial variation of ecological light pollution in the Region of Epirus. The potential threat that night lighting poses to the natural environment, called "ecological light pollution", is the main focus of numerous findings which constitute a rich and alarming literature. Recognising that the continuous expansion of urban centers and the road network in the Region of Epirus is followed by an increase in lighting, which is being installed on the basis of energy consumption and with little attention to possible environmental impacts, an attempt to assess the magnitude of the increase in lighting levels in the natural environment was made for the first time. In this context, a basic inventory of the ecosystems of the Region of Epirus was carried out, categorizing them into protected areas and non-sensitive forest areas. The «Simplified All-sky Light pollution Ratio» (SALR) computer model was used, through the compilation of a Python script for the processing of VIIRS-DNB data by NASA's Suomi-NPP satellite, with the purpose of modelling "all-sky" quality by creating a thematic map of average artificial luminance over the hemisphere of the night sky, expressed as a ratio to the natural condition. The most endangered areas and the greatest sources of light pollution were identified, revealing the existence of excessive lighting in half of the region's ecosystems, caused mainly by four cities and two motorways. Furthermore, an elementary prediction in the case of a total transition to white LED lighting was made, showing the potential large increase in light pollution. Finally, we proposed specific actions for the better management of the operation of the luminaires and the optimum choice of LED lamps, considering the prospect of exploiting their features to reduce the light pollution produced.

Ευχαριστίες

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή Κωνσταντίνο Καράντζαλο για την πολύτιμη καθοδήγησή του αλλά και παράλληλα την ελευθερία που μου έδωσε στη διαδικασία εκπόνησης της εργασίας. Οφείλω επίσης να τονίσω την βαθιά ευγνωμοσύνη μου στον Δρ. Πολυχρόνη Κολοκούση για τις συνεχείς συμβουλές και την αμέριστη βοήθειά του σε σημαντικά σημεία της εργασίας, εφόδια χωρίς τα οποία αυτή δεν θα ερχόταν εις πέρας. Είμαι τέλος ευγνώμων στο τελευταίο μέλος της Τριμελούς Επιτροπής, καθηγητή Δημήτριο Αργιαλά, για την αξιολόγηση της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Νιώθω ακόμη την ανάγκη να εκφράσω την απεριόριστη χαρά που ήμουν και εγώ μέλος του μοναδικού εγχειρήματος ονόματι ΜΕΚΔΕ. Έχοντας πλήρη καταγωγή από τα βουνά της Ηπείρου, η αίσθηση της ζωής στον τόπο μου και σε ένα πλαίσιο συλλογικότητας, παράλληλα με τη συμμετοχή στον κόσμο της επιστήμης, συνέθεσαν ένα χρόνο που δε θα ξεχάσω ποτέ. Εκεί όπου γνώρισα όμορφους ανθρώπους, τόσο φοιτητές όσο και καθηγητές, αλλά και ντόπιους. Εκεί όπου θυμήθηκα να ζω. Για το λόγο αυτό αφιερώνω την παρούσα εργασία στον καθηγητή Δημήτριο Ρόκο, τον εμπνευστή της ιδέας ενός μεταπτυχιακού συνυφασμένο με τις πολύτιμες ορεινές μας περιοχές.

Τέλος αισθάνομαι απεριόριστη αγάπη για τους ευεργέτες γονείς μου και τη συνεχή και αδιαπραγμάτευτη στήριξή τους, την οποία νιώθω ανεκτίμητη.

*Συχνά σκέφτομαι ότι η νύχτα είναι πιο ζωντανή
και πλουσιότερη σε χρώματα από την ημέρα.*

Επιστολή του Vincent Van Gogh στον αδελφό του, 1886-1889.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
1 Εισαγωγή	1
1.1 Βασικές Έννοιες	4
1.1.1 Σύνθεση Ατμόσφαιρας	4
1.1.2 Σκέδαση Φωτός	4
1.1.3 Ανακλαστικότητα (Λευκαύγεια) Εδάφους	5
1.1.4 Σύστημα Όρασης	6
1.1.5 Φωτομετρικά Μεγέθη	6
1.2 Φωτορύπανση	7
1.2.1 Είδη Φωτορύπανσης	9
1.3 Επιπτώσεις Οικολογικής Φωτορύπανσης	10
1.3.1 Επιρροή σε Οργανισμούς	10
1.3.2 Επιρροή σε Επίπεδο Οικοσυστήματος	12
1.3.3 Επίδραση του Skyglow	15
1.4 Μέθοδοι Ποσοτικοποίησης Τεχνητού Skyglow	15
1.5 LED Φωτισμός	16
1.5.1 Ορισμός και Είδη LED	16
1.5.2 Σύγκριση με Άλλους Τύπους Λαμπτήρων	19
1.5.3 Οικολογικές Επιπτώσεις των Λευκών LED	20
1.5.4 LED στην Περιφέρεια Ηπείρου	22
2 Οικοσυστήματα Περιφέρειας Ηπείρου	23
2.1 Προστατευόμενες Περιοχές	24
2.1.1 Εθνικά Πάρκα	25
2.1.2 Natura 2000	28
2.1.3 Καταφύγια Άγριας Ζωής	31
2.1.4 Περιοχές Προστασίας της Φύσης	34
2.2 Λοιπές Περιοχές Βλάστησης	34

3	Μοντελοποίηση Ανθρωπογενούς Φωτεινότητας Ουρανού	36
3.1	Αναλυτικό Μοντέλο Garstang	37
3.1.1	Διάδοση Φωτεινών Ακτίνων	37
3.1.2	Σύνθεση Ατμόσφαιρας	37
3.1.3	Ανοδικές Εκπομπές Φωτός	38
3.1.4	Βασική Σχέση Μοντέλου	39
3.1.5	Τροποποίηση για Ανώμαλη Επιφάνεια	40
3.2	Μοντέλο SALR	41
3.2.1	Αναλυτική Διαδικασία	42
3.2.2	Πηγή Δεδομένων	43
3.2.3	Έλεγχος Παραμέτρων Αναλυτικού Μοντέλου	44
4	Οικολογική Φωτορύπανση Περιφέρειας Ηπείρου	48
4.1	Εφαρμογή Μοντέλου SALR	48
4.1.1	Προεπεξεργασία Δεδομένων	48
4.1.2	Κατασκευή Αλγόριθμου Υπολογισμού ALR	49
4.2	Χάρτης Ολικής Τεχνητής Λαμπρότητας Ουράνιου Θόλου	50
4.2.1	Ερμηνεία των Προϊόντων του Μοντέλου	50
4.2.2	Οικολογική Φωτορύπανση στην Περιφέρεια Ηπείρου	51
4.2.3	Οικολογική Φωτορύπανση στις Προστατευόμενες Περιοχές	53
4.3	Σημαντικότερες Πηγές Φωτορύπανσης	59
4.4	Πρόβλεψη Μετάβασης σε LED	62
4.4.1	Περιορισμοί Λόγω Φασματικής Απόκρισης Αισθητήρα	65
5	Συμπεράσματα και Προοπτικές	66
5.1	Βελτίωση της Μοντελοποίησης	67
5.2	Προτάσεις για τον Εκσυγχρονισμό του Φωτισμού και την Ορθότερη Μετά- βαση σε LED	67
	Βιβλιογραφία	70
	Α΄ Κώδικας Υπολογισμού ALR	87

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ύστερα από εκατομμύρια χρόνια εξέλιξης, ζωικοί και φυτικοί πληθυσμοί έχουν αναπτύξει μηχανισμούς και συστήματα που βασίζονται στις μεταβολές του φυσικού φωτισμού, είτε αυτός αφορά τον ημερήσιο φωτισμό από τον Ήλιο είτε το νυχτερινό από τη Σελήνη. Οι κύκλοι του φυσικού φωτός (καθημερινός, σεληνιακός και εποχιακός) υπήρξαν σημαντικές μορφές περιβαλλοντικών διακυμάνσεων από την πρώτη κιόλας εμφάνιση της ζωής. Το φως, ως κύρια πηγή ενέργειας, υπήρξε χαρακτηριστικά ο βασικός περιβαλλοντικός παράγοντας για την ανταπόκριση της φυσιολογίας των φυτών, τη ρύθμιση της μορφογένεσης και την επακόλουθη ανάπτυξη των φυτών [1]. Αν το φωτεινό σήμα εκπέμπονταν σε λάθος βιολογική στιγμή, θα μπορούσε να επηρεάσει την κανονική συμπεριφορά των φυτών. Όπως λόγου χάρη, ανεπαρκές χρονικό διάστημα φωτισμού μπορεί να περιορίσει τη φωτοσύνθεση των φυτών, και στη συνέχεια να περιορίσει το καθαρό κέρδος άνθρακα (C), μειώνοντας τελικώς την ανάπτυξη των φυτών και τη σοδειά [2]. Οι φυσικές διαδικασίες που ενυπάρχουν στη φυσιολογία των φυτών ορίζονται λοιπόν από πολύ λεπτές ισορροπίες. Επιπλέον, η απλή αυτή αλλαγή σε μόνο ένα είδος χλωρίδας, όσο καταστροφική μπορεί να είναι για το ίδιο, μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μια αλυσίδα αντιδράσεων στο αντίστοιχο οικοσύστημα.

Τα αρχαία αυτά συστήματα διαταράσσονται για πρώτη φορά μέσω της εισαγωγής τεχνητού φωτισμού, και το νυχτερινό περιβάλλον υφίσταται μια δραματική μεταμόρφωση στην επιφάνεια της Γης. Κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα, οι χρήσεις τεχνητού ηλεκτρικού φωτισμού αυξήθηκαν ταχύτητα, τόσο στη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας. Εξετάζοντας την άφιξη της βιομηχανικής και τεχνολογικής επανάστασης, είναι φανερό η ραγδαία αύξηση του εξωτερικού τεχνητού φωτισμού που ακολουθεί την επέκταση των κατοικημένων περιοχών και του οδικού δικτύου. Ειδικότερα σε αστικές περιοχές, η αύξηση αυτή οδήγησε τους κατοίκους τους να προσαρμοστούν σε μια 24ωρη κοινωνία [3]. Χαρακτηριστικό των περιόδων αυτών, η χρήση νέων ή υφιστάμενων τεχνολογιών συνήθως γίνεται κυρίως στα πλαίσια επίλυσης στοιχειωδών ανθρώπινων προβλημάτων (εξοικονόμηση χρημάτων, παροχή υπηρεσιών), αλλά με ελάχιστη προσοχή σε υποκείμενες μακροπρόθεσμες οικολογικές-περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση της φωταγόνησης στις σύγχρονες πόλεις, με αποτέλεσμα μια ποικιλία φωτεινών πηγών

(όπως ο οδοφωτισμός, ο φωτισμός διαφημίσεων, ο αρχιτεκτονικός φωτισμός, ο φωτισμός ασφαλείας, ο οικιακός φωτισμός και ο φωτισμός οχημάτων) να οδηγούν στη διαταραχή των φυσικών επιπέδων φωτισμού, μέσω της άμεσης φωταγωγήσης καθώς και της ανεξέλεγκτης διάχυσης του φωτός (αγγλ. skyglow) που προκαλούν [4–8]. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε «φωτορύπανση» [9], με συνέπειες τόσο στο ανθρώπινο βιολογικό σύστημα όσο και στους υπόλοιπους οργανισμούς.

Η φωτορύπανση αποτελεί μία από τις πιο διαπεραστικές μορφές περιβαλλοντικής αλλοίωσης. Επηρεάζει ακόμη και παρθένες τοποθεσίες, αφού κατά τη διάρκεια της νύχτας παρατηρείται εύκολα ακόμη και εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από τη φωτεινή πηγή, σε τοποθεσίες που κατά την ημέρα μοιάζουν ανέγγιχτες από την ανθρωπότητα, καταστρέφοντας με αυτό τον τρόπο τα νυχτερινά τοπία ακόμη και σε προστατευόμενες περιοχές, όπως τα εθνικά πάρκα. Παρά την επιρροή της σε παγκόσμιο επίπεδο, η φωτορύπανση έχει λάβει σχετικά λίγη προσοχή στο παρελθόν από την περιβαλλοντική επιστημονική κοινότητα.

Γιατί όμως είναι τόσο σημαντική η συζήτηση για την βιοποικιλότητα; Ενώ η πρόληψη της εξαφάνισης και η προστασία των ειδών τίθενται κυρίως ως ηθικά ζητήματα, οι βιολογικοί πόροι είναι επίσης τα θεμέλια πάνω στα οποία οικοδομείται ένας πολιτισμός. Η απώλεια της βιοποικιλότητας απειλεί την παροχή τροφίμων και περιορίζει τις φυσικές πηγές που συνεισφέρουν στην ενεργειακή και ιατρική πρόοδο. Συνεπώς, η προστασία της βιοποικιλότητας πρέπει να αποτελεί ύψιστη προτεραιότητα [10]. Όπως είχε σχολιάσει ο Klaus Töpfer – πρώην Executive Director του United Nations Environment Programme (UNEP) - «αν και οι επιστήμονες είναι πλέον σε θέση να εκτιμήσουν την πολυπλοκότητα της αλληλεπίδρασης των φυσικών διεργασιών, είμαστε ακόμα πολύ μακριά από την κατανόηση του πώς ταιριάζουν όλοι μαζί. Αυτό που γνωρίζουμε είναι ότι αν οποιοδήποτε μέρος αυτού του ιστού της ζωής υποστεί κατάρρευση, το μέλλον της ζωής στον πλανήτη θα βρίσκεται σε κίνδυνο» [11].

Οι σημαντικότεροι εκπρόσωποι του σπουδαίου φυσικού πλούτου δεν είναι άλλοι από τις προστατευόμενες περιοχές. Οι προστατευόμενες περιοχές (άγρια φύση, εθνικά πάρκα, καταφύγια άγριας ζωής) ξεχωρίζουν για τα φυσικά χαρακτηριστικά τους και τις διαδικασίες των οικοσυστημάτων τους. Πέρα από τα πολλά και σημαντικά οφέλη που έχουν για την ανθρώπινη κοινωνία, όπως αναψυχή, τουριστικές δραστηριότητες και παροχή νερού, οι προστατευόμενες περιοχές είναι επίσης σημαντικές για τη διατήρηση των ειδών και συχνά παρέχουν ένα τελευταίο καταφύγιο για είδη που έχουν εξαφανιστεί από τις γύρω περιοχές. Ιδιαίτερα στην Ελλάδα, οι προστατευόμενες περιοχές αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο κομμάτι της ελληνικής φύσης. Για παράδειγμα, η συνολική έκταση των περιοχών του Δικτύου Natura 2000, εξαιρουμένων των αλληλοεπικαλύψεων, ανέρχεται σήμερα σε περίπου 4.3 εκ. εκτάρια και καταλαμβάνει το 27.3% της ηπειρωτικής Ελλάδας και το 6.1% των χωρικών υδάτων, ή αλλιώς περίπου το 19% της Ελληνικής Επικράτειας.

Προκαλώντας τη αύξηση των φυσικών επιπέδων φωτισμού, η φωτορύπανση μπορεί

να διαταράξει τις ισορροπίες των οικοσυστημάτων στις πολύτιμες προστατευόμενες περιοχές. Η προσεκτική διατήρηση της ακεραιότητας των περιοχών αυτών είναι μείζονος σημασίας και αποτελεί ένα διεπιστημονικό ζήτημα. Ένας από τους τρόπους διατάραξης των οικοσυστημάτων που αυτές αποτελούν είναι η παρεμβολή στα επίπεδα φωτισμού. Ο σχεδιασμός εξωτερικού φωτισμού σε πόλεις που βρίσκονται εκτός των περιοχών αυτών σπάνια θεωρείται ότι πιθανά έρχεται σε σύγκρουση με τον σκοπό των περιοχών αυτών για την προστασία της φύσης. Ωστόσο, καθώς το φως που διαφεύγει από τα αστικά περιβάλλοντα ταξιδεύει σε μεγάλες αποστάσεις μέσω της ατμόσφαιρας, και ειδικότερα καθώς οι ανθρώπινες υποδομές οικοδομούνται στα όρια αυτών των περιοχών, το φως που ανακλάται και σκεδάζεται από την ατμόσφαιρα θα διαβρώσει την ποιότητα του περιβάλλοντος. Η αλόγιστη χρήση φωτισμού (όσον αφορά το πλήθος των φωτιστικών, την ένταση αλλά και το είδος τους) προκαλεί δύο προβλήματα: α) μείωση ορατότητας νυχτερινού ουρανού και β) οικολογικές επιπτώσεις σε είδη χλωρίδας και πανίδας, οι οποίες οδηγούν στην πιθανή διαταραχή οικοσυστημάτων.

Ο κίνδυνος αυτός αφορά άμεσα και την Περιφέρεια Ηπείρου, ένα τόπο γνωστό για τα ποικίλα οικοσυστήματά του. Η Ήπειρος αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους θήλακες βιοποικιλότητας της χώρας, με πολλά είδη πανίδας και χλωρίδας που φιλοξενούνται σε πλήθος οικοτόπων, οι οποίοι όμως πλέον συναντούν την ανθρώπινη τεχνολογία. Οι οροσειρές με τις αμέτρητες πηγές που σχηματίζουν ποτάμια και λίμνες, τα πυκνά δάση και οι ακρογιαλιές συνυπάρχουν με γεφύρια, κάστρα, εκκλησίες αλλά και αστικές περιοχές που αποδίδουν σημαντικών επιπέδων φωτορύπανση. Ενώ με μια πρώτη ματιά, η Ήπειρος μοιάζει με παρθένο φυσικό τοπίο, το γεγονός αυτό ισχύει μόνο μερικώς. Η κρυφή επίδραση των ανθρώπινων τεχνολογιών όπως αυτή της διατάραξης των φυσικών επιπέδων φωτισμού μπορεί να ενέχει σημαντικούς κινδύνους για την επιβίωση πολλών οργανισμών και την εύρυθμη λειτουργία των πολύπλοκων οικοσυστημάτων. Επιπλέον, η Περιφέρεια Ηπείρου, συνάδοντας με τα σύγχρονα πρότυπα εξοικονόμησης ενέργειας, στρέφεται προς τη χρήση LED για την φωταγωγή σε περιφερειακό επίπεδο αλλά και σε επίπεδο δήμων, με περιβαλλοντικές επιπτώσεις που πιθανόν να μην είναι τετριμμένες. Είναι λοιπόν επιτακτική η ανάγκη εκτίμησης του μεγέθους της φωτορύπανσης, για τον έλεγχο πιθανής εισχώρησής της στα οικοσυστήματα και ιδιαίτερα στις προστατευόμενες περιοχές, αλλά και ο διαχρονικός έλεγχος της μεταβολής του μεγέθους αυτού εξαιτίας πιθανών μελλοντικών μετατροπών στα δίκτυα φωτισμού της περιφέρειας και των επιμέρους δήμων.

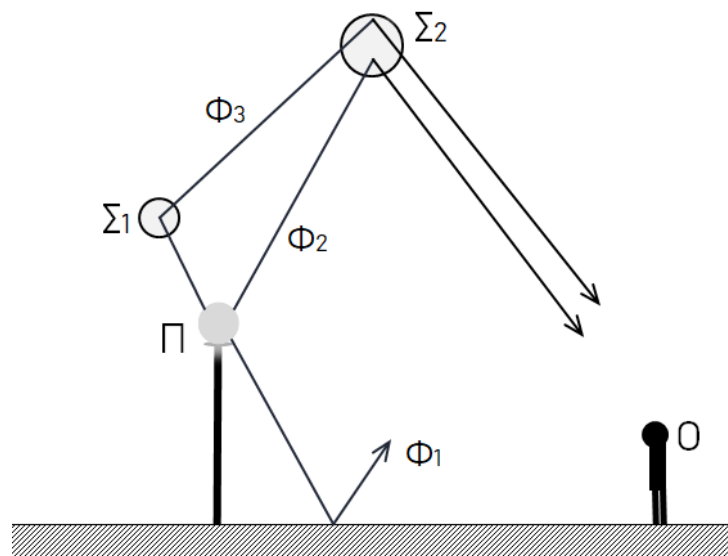
1.1 Βασικές Έννοιες

1.1.1 Σύνθεση Ατμόσφαιρας

Η φωτεινή ακτινοβολία αλληλεπιδρά με τα σωματίδια που αποτελούν την ατμόσφαιρα, μέσω των φαινομένων της σκέδασης και της απορρόφησης. Τα σωματίδια αυτά είναι μόρια ή άτομα, ή και αερολύματα. Ως αερολύμα (aerosol) χαρακτηρίζεται οποιοδήποτε μετασταθές αιώρημα ενός πληθυσμού σωματιδίων μέσα σε όγκο αέριου μέσου (π.χ. ατμοσφαιρικός αέρας). Τα αερολύματα μπορεί να βρίσκονται σε στερεά ή υγρή κατάσταση και να είναι φυσικά (όπως ομίχλη, σκόνη και εκκρίματα δασών) ή ανθρωπογενή (όπως σωματιδιακοί ατμοσφαιρικοί ρύποι και καπνός).

1.1.2 Σκέδαση Φωτός

Το φως που εκπέμπεται από φωτεινές πηγές μιας πόλης ή ενός αυτοκινητόδρομου μπορεί να διαδοθεί πολλά χιλιόμετρα μέσω της σκέδασης από την ατμόσφαιρα. Η διαδρομή που θα ακολουθήσει μια φωτεινή ακτίνα μπορεί να καθορίζεται από σκεδάσεις πρώτου και δευτέρου βαθμού, είτε εκπεμπόμενη άμεσα προς την ατμόσφαιρα είτε ύστερα από ανάκλαση από το έδαφος (Σχ. 1.1).



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα σκέδασης φωτεινών ακτίνων από μια πηγή φωτός Π προς έναν παρατηρητή O , από δύο περιοχές Σ_1 , Σ_2 . Η φωτεινή ακτίνα Φ_1 υφίσταται μόνο ανάκλαση, η ακτίνα Φ_2 υφίσταται σκέδαση 1ου βαθμού και η ακτίνα Φ_3 υφίσταται σκέδαση 2ου βαθμού.

Η σκέδαση της ακτινοβολίας από τα αερολύματα ονομάζεται σκέδαση Mie. Η σκέδαση Mie λαμβάνει χώρα στα κατώτερα 4500 m της ατμόσφαιρας, όπου μπορεί να υπάρχουν

πολλά σφαιρικά σωματίδια με διαμέτρους περίπου ίσες με το μέγεθος του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτίνας. Αντίθετα, η σκέδαση της ακτινοβολίας από τα μόρια της ατμόσφαιρας ονομάζεται σκέδαση Rayleigh (η υπεύθυνη για τον γαλάζιο ουρανό την ημέρα), και αφορά τις περιπτώσεις που το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι αρκετά μεγαλύτερο από τη διάμετρο των μορίων, συνήθως τουλάχιστον 10 φορές. Και οι δύο περιπτώσεις σκέδασης αφορούν ελαστική σκέδαση, κατά την οποία η ενέργεια και συχνότητα (ή το μήκος κύματος) της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι ίσες με τις αντίστοιχες της προσπίπτουσας.

1.1.3 Ανακλαστικότητα (Λευκαύγεια) Εδάφους

Ένα σημαντικό μέγεθος για τη διάδοση της ακτινοβολίας σε μια περιοχή είναι η ανακλαστικότητα (ή λευκαύγεια, αγγλ. albedo) εδάφους. Η λευκαύγεια ορίζεται ως το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας από μια επιφάνεια προς όλες τις διευθύνσεις, προς την προσπίπτουσα σε αυτή. Οι επιφάνειες χαρακτηρίζονται από ανισοτροπική συμπεριφορά (όσον αφορά την ανακλαστικότητα), η οποία περιγράφεται από τη συνάρτηση κατανομής της ανάκλασης (αγγλ. Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF), δηλαδή τη συνάρτηση που περιγράφει τις οπτικές ιδιότητες μιας επιφάνειας σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και τη γωνία παρατήρησης. Θεωρώντας ότι το έδαφος φωτίζεται από την απευθείας και διάχυτη ηλιακή ροή για όλες τις διευθύνσεις που ορίζει το ημισφαίριο πάνω από αυτό, ορίζονται τρεις διαφορετικές έννοιες της λευκαύγειας [12]:

- Η διευθυνσιακή-ημισφαιρική ανακλαστικότητα («black-sky» λευκαύγεια) $\bar{\alpha}$ είναι η ολοκλήρωση της αμφίδρομης ανακλαστικότητας στο ημισφαίριο θέασης. Προκύπτει από την υπόθεση ότι όλη η ενέργεια προέρχεται από μια άμεση ακτινοβολία από τον ήλιο και υπολογίζεται για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το Παγκόσμιο Σύστημα Κλιματολογικής Παρατήρησης (Global Climate Observing System-GCOS) χαρακτήρισε την «black-sky» λευκαύγεια ως βασική μεταβλητή στη μελέτη της κλιματικής αλλαγής [13].
- Η ημισφαιρική λευκαύγεια ή διημισφαιρική ανακλαστικότητα («white-sky» λευκαύγεια) $\bar{\bar{\alpha}}$ προκύπτει από την ολοκλήρωση της διευθυνσιακής λευκαύγειας στο ημισφαίριο ακτινοβολίας. Αφορά την υπόθεση ότι ο φωτισμός της επιφάνειας προέρχεται μόνο από ισότροπη διάχυτη ακτινοβολία.
- Η πραγματική («blue-sky») λευκαύγεια α η οποία ορίζεται ως ο γραμμικός συνδυασμός των δύο παραπάνω, $\alpha=(1-D)\bar{\alpha}+D\bar{\bar{\alpha}}$, όπου 1-D το ποσοστό της άμεσης ακτινοβολίας για μια δεδομένη γωνία ύψους του ήλιου και D είναι το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας. Λαμβάνοντας μετρήσεις σε ατμοσφαιρικές συνθήκες μηδαμινής νεφοκάλυψης και χαμηλής συγκέντρωσης αερολυμάτων, η «black-sky» λευκαύγεια κυριαρχεί.

Ένα σώμα που ανακλά ολόκληρη την ποσότητα προσπίπτοντος φωτός έχει λευκαύγεια ίση με 1, ενώ ένα τελείως μελανό σώμα έχει λευκαύγεια ίση με μηδέν. Η ανακλαστικότητα

εδάφους κυμαίνεται μεταξύ 20% για βλάστηση (μια τυπική τιμή για περιοχές καλυμμένες με γρασίδι) και 8% για ξηρό έδαφος [14]. Η φθαρμένη άσφαλτος παρουσιάζει ανακλαστικότητα 12%-14% (10% για νέα άσφαλτο) και 16%-18% για βρώμικο σκυρόδεμα (25% για νέο σκυρόδεμα) [15, σελ. 28]. Περιοχές καλυμμένες με χιόνι εμφανίζουν ανακλαστικότητα 20% έως και 80% ανάλογα με την κατάσταση του χιονιού (όσο πιο φρέσκο τόσο μεγαλύτερη η ανακλαστικότητά του).

1.1.4 Σύστημα Όρασης

Το ανθρώπινο σύστημα όρασης διαχωρίζεται σε τρεις ζώνες ικανότητας προσαρμογής της όρασης (ή τρία επίπεδα ευαισθησίας), οι οποίες είναι σημαντικές για την κατανόηση των επιπέδων φωτισμού και την επίδρασή τους σε αυτή. Ως φωτοπική όραση ορίζεται η όραση του ματιού κάτω από συνθήκες καλού φωτισμού (επίπεδο φωτεινότητας 10 έως 108 cd m^{-2}) όπου πραγματοποιείται κορεσμός των ραβδίων και κυριαρχεί η χρήση των κωνίων, με μέγιστη ευαισθησία στα 555 nm. Ως σκοτοπική ορίζεται η όραση του ματιού κάτω από χαμηλά επίπεδα φωτισμού όπου κυριαρχούν τα ραβδία, με μέγιστη ευαισθησία στα 507 nm. Η σκοτοπική ζώνη χρησιμοποιείται συνήθως ως το μέτρο των επιπτώσεων στις ανθρώπινες οπτικές συνθήκες. Η μεσοπική όραση είναι ένας συνδυασμός φωτοπικής και σκοτοπικής όρασης σε καταστάσεις χαμηλού αλλά όχι και αρκετά σκοτεινού φωτισμού [16]. Τα μεσοπικά επίπεδα φωτός κυμαίνονται σε φωτεινότητες περίπου 0.01-3 cd m^{-2}). Το μεγαλύτερο ποσοστό του οδοφωτισμού και γενικά του υπαίθριου φωτισμού εντοπίζεται στη μεσοπική ζώνη.



Σχήμα 1.2: Προσεγγιστικά εύρη λαμπρότητας της σκοτοπικής (ραβδία), μεσοπικής (περιοχή μετάβασης ραβδίων/κωνίων) και φωτοπικής (κωνία) απόκρισης του ανθρώπινου οφθαλμού. Απόδοση από [17, Σχ. 1].

1.1.5 Φωτομετρικά Μεγέθη

Φωτεινή ένταση είναι το μέτρο της πυκνότητας της φωτεινής ισχύος που εκπέμπεται από μια πηγή φωτός προς μια κατεύθυνση, βασισμένη στη φωτοπική φασματική καμπύλη ευαισθησίας $V(\lambda)$, ένα τυποποιημένο πρότυπο της ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού. Η μονάδα μέτρησης είναι η καντέλα $[\text{cd}] = [1 \text{ lum/sr}]$. Μια καντέλα ορίζεται ως η φωτεινή ένταση μιας μονοχρωματικής πηγής φωτός 555 nm.

Η λαμπρότητα (αγγλ. luminance), συχνά αποκαλούμενη και ως φωτεινότητα, περιγράφει την ποσότητα του φωτός που εκπέμπεται από μια επιφάνεια. Η βασική μονάδα μέτρησης της λαμπρότητας είναι το cd m^{-2} . Ένας παράγοντας που καθορίζει την λαμπρότητα είναι η συγκέντρωση του φωτός σε μια δεδομένη κατεύθυνση, η οποία μπορεί να περιγραφεί μέσω μιας στερεάς γωνίας.

Ο φωτισμός (αγγλ. illuminance) προδιαγράφεται σαν την ποσότητα του φωτός που φωτίζει μια επιφάνεια. Η βασική μονάδα μέτρησης είναι το lux. Μια επιφάνεια έχει φωτισμό 1 lux όταν λαμβάνει 1 lumen m^{-2} .

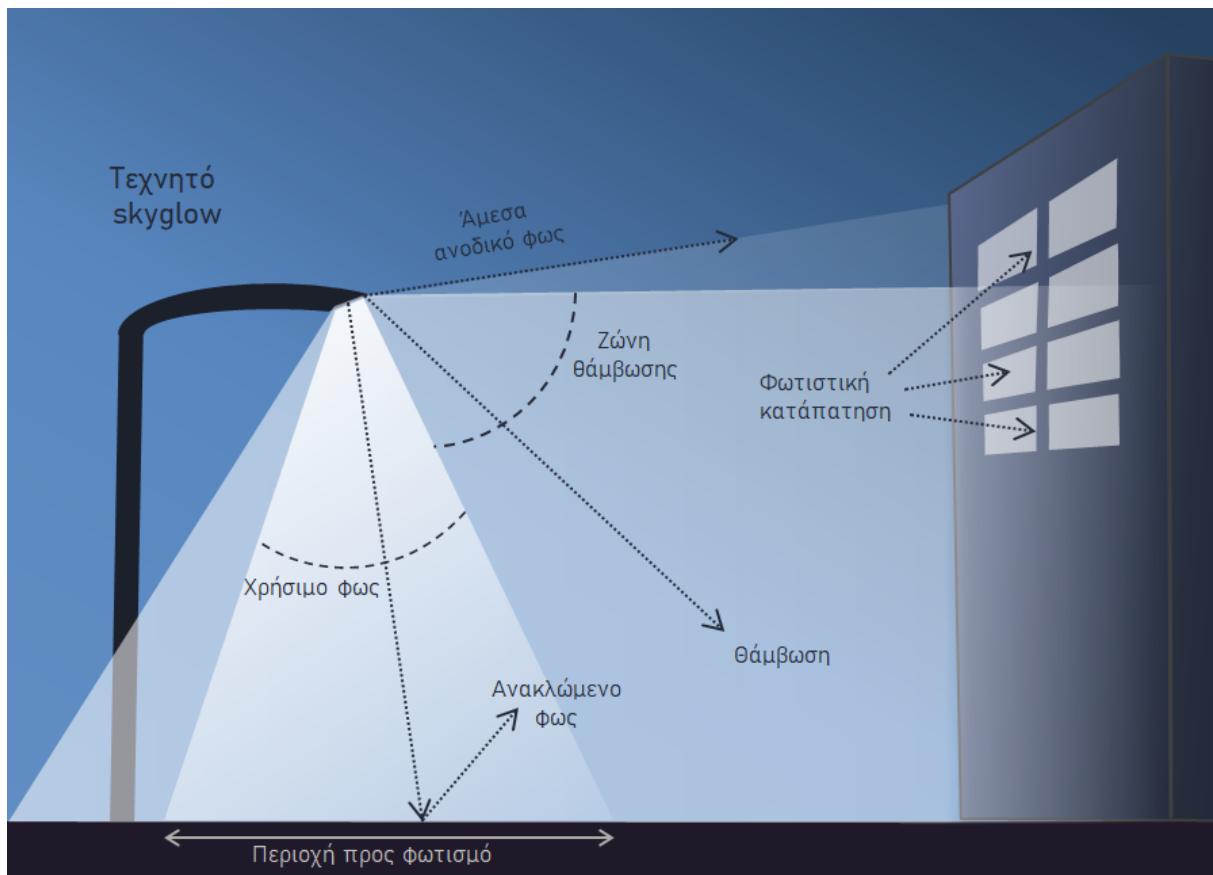
Ως φωτεινή ροή (ή ισχύς), ορίζεται το πηλίκο της φωτεινής ακτινοβολίας που εκπέμπει μια πηγή προς τη μονάδα του χρόνου, σταθμισμένη με την καμπύλη ευαισθησίας του ματιού. Αφορά την ισχύ που γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι, και υπολογίζεται σε μονάδες lm. Διαφέρει από τη ροή ακτινοβολίας, η οποία αφορά το μέτρο της συνολικής ισχύος του εκπεμπόμενου φωτός, και προκύπτει μέσω συνδυασμού αυτής και της καμπύλης ευαισθησίας φάσματος.

1.2 Φωτορύπανση

Η φωτορύπανση είναι μία ακόμη μορφή ρύπανσης που παράγεται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, και ορίζεται ως η μεταβολή των φυσικών επιπέδων φωτός στο εξωτερικό περιβάλλον λόγω της ακατάλληλης ή υπερβολικής χρήσης τεχνητού φωτισμού [18, 19]. Ενώ μπορεί να οριστεί και φωτορύπανση εσωτερικών χώρων, ως η επιρροή του τεχνητού φωτισμού ενός εσωτερικού περιβάλλοντος σε τέτοια επίπεδα που θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία, στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την φωτορύπανση των εξωτερικών χώρων και ως φωτορύπανση θα εννοούμε μόνο αυτή από εδώ και στο εξής.

Το τεχνητό φως τη νύχτα επιδρά στο φυσικό περιβάλλον με δύο μορφές: α) άμεσες εκπομπές φωτός, όπως η φωτιστική καταπάτηση (φως που είναι ορατό από τοποθεσίες εκτός εκείνης όπου είναι εγκατεστημένο), ο υπερφωτισμός (χρήση περισσότερου φωτός από το αναγκαίο για τον φωτισμό μιας περιοχής) και η θάμβωση (έντονο φως που προκαλεί οπτική δυσφορία ή μειωμένη ορατότητα), οι οποίες απεικονίζονται στο Σχ. 1.3, και β) τη λάμψη του ουρανού (αγγλ. skyglow). Ως ουράνια λάμψη ή «skyglow» ονομάζεται η επίδραση του τεχνητού φωτισμού στο νυχτερινό ουράνιο, η οποία προέρχεται από το φως που εκπέμπεται απευθείας, ανακλάται ή σκεδάζεται από ατμοσφαιρικά μόρια και αερολύματα ανοδικά προς αυτόν, ορίζοντας κατά συνέπεια έναν τεχνητό φωτεινό ουράνιο θόλο με αποτέλεσμα την πτώση της αντίθεσης ανάμεσα στα ουράνια σώματα και το σκοτεινό φόντο του ουρανού. Το κλειδί για τον προσδιορισμό της συνεισφοράς κάθε μορφής είναι η κατανόηση της χωρικής τους ταυτότητας και πως αυτή ποικίλει με τους υπόλοιπους παράγοντες των χρήσεων γης, την ανακλαστικότητα εδάφους, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και κυριότερα τα χαρακτηριστικά (θωράκιση ή η έλλειψη αυτής, ένταση, φάσμα) των φωτεινών πηγών. Το skyglow είναι μια αναπόφευκτη συνέπεια της χρήσης τεχνητού φωτός

σε εξωτερικούς χώρους, αλλά η αναλογία του χρήσιμου φωτός προς το skyglow εξαρτάται κυρίως από το σχεδιασμό του φωτιστικού σώματος. Το φως που εκπέμπεται υπό γωνία ελαφρώς πάνω από τον ορίζοντα παράγει πολύ περισσότερο skyglow από το φως που εκπέμπεται προς το έδαφος, ενώ όσον αφορά το φάσμα, το μπλε φως οδηγεί σε περισσότερο skyglow σε σχέση με το κόκκινο [17, 20].



Σχήμα 1.3: Εκπομπή φωτός και τα φαινόμενα της παραγόμενης φωτορύπανσης από ένα φωτιστικό σώμα.

Η διαταραχή των φυσικών επιπέδων φωτισμού της νύχτας που προκαλείται από τον έντονο υπαίθριο τεχνητό φωτισμό έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στα φυσικά τοπία και μελετάται εκτενώς. Χαρακτηριστικά, η ερευνητική βάση δεδομένων Artificial Light at Night (ALAN) της International Darksky Association (IDA) [21] και του χρηματοδοτούμενου από την ΕΕ Loss of the Night Network (LoNNe), έχει συμπεριλάβει από το ξεκίνημα της το 2015 περισσότερες από 600 δημοσιευμένες ερευνητικές εργασίες σχετικά με τη φωτορύπανση παγκοσμίως και τις επιπτώσεις της στη χλωρίδα, την πανίδα αλλά και τους ανθρώπους. Η φωτορύπανση είναι ένας από τους πιο εμφανείς ρύπους στο Ανθρωπόκαινο [18, 22] που μάλιστα αυξάνει ολοένα σε ένταση [6, 18, 22–24], παρά την αυξανόμενη αποτελεσματικότητα και τεχνογνωσία στην παραγωγή φωτός (ή ίσως και λόγω αυτής) [25].

1.2.1 Είδη Φωτορύπανσης

Η φωτορύπανση διαχωρίστηκε για πρώτη φορά από τους Longcore και Rich [26] σε δύο κατηγορίες: την «αστρονομική φωτορύπανση» και την «οικολογική φωτορύπανση» (Σχ. 1.4).



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα οικολογικής και αστρονομικής φωτορύπανσης. Απόδοση από [26, Σχ. 1].

Η αστρονομική φωτορύπανση αφορά την αύξηση της λαμπρότητας του ουρανού, με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση της διακριτικής ικανότητας των αστεριών και των υπόλοιπων ουράνιων σωμάτων. Για την ταξινόμηση των περιοχών με βάση τα επίπεδα αστρονομικής φωτορύπανσης χρησιμοποιείται ευρέως η κλίμακα Bortle [27]. Σύμφωνα με αυτήν, οι περιοχές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την ορατότητα των ουράνιων σωμάτων σε 9 κατηγορίες (με τιμή 1 η περιοχή με μέγιστη ορατότητα και 9 με ελάχιστη). Η απώλεια θέασης των έναστρων ουρανών έχει επιπλέον υποστηριχθεί ότι επηρεάζει σημαντικά την αίσθηση του χώρου των ανθρώπων [28], αν και τα εμπειρικά στοιχεία είναι περιορισμένα.

Η οικολογική φωτορύπανση ορίζεται ως η μεταβολή των φυσικών επιπέδων φωτισμού σε χερσαία και υδρόβια οικοσυστήματα, η οποία μπορεί να προκληθεί από χρόνιο ή περιοδικά αυξανόμενο φωτισμό, απότομες μεταβολές στο φωτισμό ή και άμεση αντανάκλαση

[26]. Οι πηγές οικολογικής φωτορύπανσης περιλαμβάνουν το skyglow, τα φωτισμένα κτίρια, τους φωτεινούς σηματοδότες, τα φώτα ασφαλείας, τα φώτα οχημάτων, τα αλιευτικά σκάφη, ακόμη και τα φώτα σε υποθαλάσσια ερευνητικά σκάφη, κάθε μία από τις οποίες μπορεί να διαταράξει τα οικοσυστήματα σε διάφορους βαθμούς. Το φαινόμενο της διατάραξης των φυσικών επιπέδων φωτισμού επομένως συνεπάγεται πιθανές επιπτώσεις σε ένα εύρος χωρικών και χρονικών κλιμάκων.

1.3 Επιπτώσεις Οικολογικής Φωτορύπανσης

1.3.1 Επιρροή σε Οργανισμούς

Ο τεχνητός νυχτερινός φωτισμός αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο ως σημαντική ανθρωπογενής πίεση στο περιβάλλον. Υπάρχει ένα αυξανόμενο πλήθος ποικίλων ερευνητών σχετικά με τις οικολογικές συνέπειες του τεχνητού φωτισμού τη νύχτα [8, 29–31] (για ανασκοπήσεις βλ. [26, 32–35]). Η διαταραχή που προκαλεί στα επίπεδα φυσικού φωτισμού έχει ένα ευρύ φάσμα επιπτώσεων, κυρίως λόγω του κεντρικού ρόλου (ως σταθερές πηγές πληροφοριών) που τα επίπεδα αυτά συνήθως διαδραματίζουν στον προσδιορισμό του χρονοδιαγράμματος της βιολογικής δραστηριότητας (κιρκάδιοι ρυθμοί) [36]. Η φωτορύπανση αναγνωρίζεται ως παγκόσμια απειλή για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση της ποιότητας των τροφοδοτικών, ρυθμιστικών και κοινωνικών υπηρεσιών των οικοσυστημάτων [29].

Μερικές από τις καταστροφικές συνέπειες του τεχνητού φωτός για ορισμένες ταξινομικές ομάδες είναι γνωστές, όπως για τα πουλιά [37–39], αμφίβια και ερπετά [40, 41], μικρά θηλαστικά [42] και έντομα [43, 44]. Για τα φυτά, η παράταση του χρόνου φωτισμού ενδέχεται να προκαλέσει βλάβη στους χρόνους ανάπτυξης βλαστών και ανθοφορίας [45, 46] και στο φωτοσυνθετικό μηχανισμό [47–49], ενώ εξαιτίας των διαφορετικών αυτών συνθηκών φωτισμού έχουν παρατηρηθεί ευρέως πολλές περιπτώσεις προσαρμογής στην επεξεργασία και τη λειτουργία του φωτοσυνθετικού συστήματος [32, 50–52]. Επιπλέον, ο οδοφωτισμός έχει αποδειχθεί ότι έχει επιπτώσεις στο χρονοδιάγραμμα της φυλλόπτωσης καθώς και στην ταχύτητα της ανάπτυξης των φύλλων, μέσω της διατάραξης της φωτοσυνθετικής αποδοτικότητας και την επιβολή μιας μορφής «στρες» [53–55]. Σαφή στοιχεία έχουν εντοπιστεί για την επιρροή της φωτορύπανσης σε οπτικά καθοδηγούμενες συμπεριφορές όπως η επικονίαση [56, 57], η αποφυγή θηρευτών ή η ανίχνευση θηραμάτων [58, 59], η πλοήγηση των οργανισμών [60–63] ή και η αναζήτηση τροφής [42, 64–69]. Ωστόσο, το μέγεθος αυτών των δυνητικών επιπτώσεων μπορεί να αποδειχθεί ότι εξαρτάται τόσο από τη δομή των οικοτόπων (π.χ. δασική περιοχή έναντι ανοικτών λιμνών) όσο και από τη χωρική διάταξη του οικοτόπου. Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού έχουν έρθει στο φως και σχετικά με την έκφραση γονιδίων [70], τους ενδοκρινικούς κύκλους των ιχθύων [71], την επικοινωνία [72, 73], τη φυσιολογία και τη συμπεριφορά λόγω διατάραξης των κιρκάδιων

ρολογιών [74, 75], τα μοτίβα δραστηριότητας (σε ψάρια, πουλιά και νυχτερίδες) [63, 76–80], την ανάπτυξη [81, 82], την επιτυχία αναπαραγωγής [83, 84], την αφθονία πληθυσμών [85, 86], τον κίνδυνο θνησιμότητας [60, 87–92], τις τροφικές αλληλεπιδράσεις [93, 94] και τα μοτίβα αποδημίας [95–98]. Φαίνεται επίσης πιθανό ότι οι επιπτώσεις του τεχνητού νυχτερινού φωτισμού αλληλεπιδρούν με εκείνες άλλων παραγόντων που επηρεάζουν τη βιοποικιλότητα, συμπεριλαμβανομένης της απώλειας οικοτόπων, της κλιματικής αλλαγής, άλλων μορφών ρύπανσης και των επιδρομικών ειδών [33].

Οι έρευνες σχετικά με τις οικολογικές επιπτώσεις της φωτορύπανσης επικεντρώνονται κυρίως στην έντασή της και λιγότερο στο φάσμα της. Ωστόσο, δεδομένων των ασυνήθιστων για το φυσικό περιβάλλον μικρών κύματος στα οποία εκπέμπεται, μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην αναζήτηση τροφής και το ζευγάρισμα νυχτόβιων ειδών [99, 100]. Εκτός από την επίτευξη εντάσεων συγκρίσιμων με το φως κατά τη διάρκεια του ναυτικού λυκόφωτος ή κατά την πανσέληνο, η φασματική ακτινοβολία κάτω από φωτορυσασμένους ουραμούς είναι σημαντικά διαφορετική από εκείνη που βρίσκεται κάτω από οποιοδήποτε φυσικό φωτισμό [101, Σχ. 3]. Ενώ τα φάσματα στα οποία εντοπίζεται φωτορύπανση χαρακτηρίζονται από πολλές κορυφές (κυρίως λόγω των εκπομπών από λαμπτήρες υδραργύρου και νατρίου υψηλής πίεσης), η κύρια φασματική διαφορά είναι μια μεγάλη αύξηση στη σχετική συμβολή του φωτός μεγάλων μικρών κύματος. Ο τεχνητός φωτισμός λοιπόν δεν μεταβάλλει απλώς τη χωρική και χρονική δομή και ένταση των φυσικών κύκλων φωτός, αλλά το κάνει και με φάσματα εξαιρετικά διαφορετικά από αυτά του ηλιακού και σεληνιακού φωτός και της αστροφεγγιάς (βλ. Σχ. 1.9). Ακόμη, ενώ ορισμένοι τύποι τεχνητού φωτισμού περιορίζονται σε στενά μέσα ζώνης (π.χ. λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης), άλλοι εκπέμπουν σε ένα ευρύ φάσμα μικρών κύματος, όπως οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης οι οποίοι εκπέμπουν ένα κίτρινο φως που επιτρέπει κάποιες διακρίσεις χρώματος στον άνθρωπο. Αντίστοιχα, τα λευκά LED που χρησιμοποιούνται στον οδοφωτισμό εκπέμπουν σε όλα τα μήκη κύματος μεταξύ περίπου 400 και 700 nm, με κορυφές στο μπλε και πράσινο. Τα χαρακτηριστικά του φωτισμού κάθε περιοχής εξαρτώνται λοιπόν από τις επικρατούσες πηγές φωτός σε αυτήν. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει η τάση προς την υιοθέτηση τεχνολογιών φωτισμού με ένα ευρύτερο φάσμα «λευκού» φωτός, γεγονός που πιθανότατα θα αυξήσει το ποσό του skyglow που είναι ορατό στους ανθρώπους και άλλους οργανισμούς.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από τις έρευνες των επιπτώσεων της φωτορύπανσης σε συγκεκριμένα είδη χλωρίδας και πανίδας, ορισμένοι ερευνητές, αποδεχόμενοι τη μακροσκοπική επιρροή της, ακολουθούν μια πιο γενική προσέγγιση και εξετάζουν την εισχώρησή της στις προστατευόμενες περιοχές και βιομάδες συνολικά μέσω χωρικής ανάλυσης [102–104].

1.3.2 Επιρροή σε Επίπεδο Οικοσυστήματος

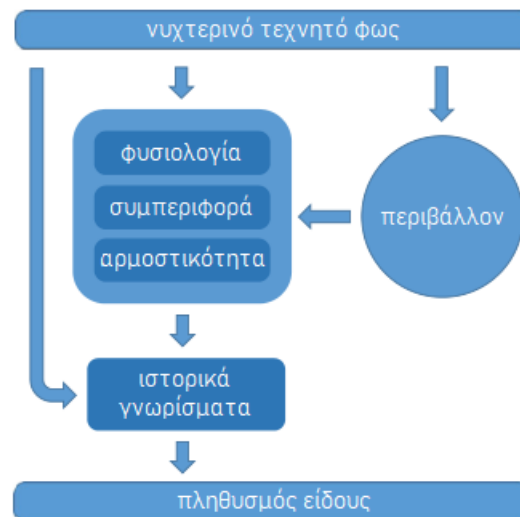
Σε γενικές γραμμές, όπως είδαμε, οι μελέτες που αξιολογούν την επίδραση του τεχνητού φωτός σε διάφορα είδη στην άγρια φύση κάνουν χρήση του υπάρχοντος φωτισμού και ως εκ τούτου είναι συσχετιζόμενες. Ωστόσο, για να γίνει αξιόπιστη πρόβλεψη των οικολογικών συνεπειών του τεχνητού φωτισμού στα φυσικά συστήματα, είναι ζωτικής σημασίας να αποκτήσουμε καλύτερη κατανόηση των μακροπρόθεσμων διεργασιών που μετριάζουν την ευαισθησία των οικοσυστημάτων και των υποσυνόλων τους σε ένα φωτισμένο περιβάλλον. Οι υπάρχουσες μελέτες επικεντρώνονται κυρίως στις βραχυπρόθεσμες συνέπειες σε επίπεδο μονάδας (φυσιολογία και συμπεριφορά των οργανισμών), παρά στις μακροπρόθεσμες συνέπειες της δυναμικής σε επίπεδο πληθυσμού και κοινότητας [33], αγνοώντας την πιθανή πρόκληση άγνωστων κρυφών επιδράσεων στις λειτουργίες και τις διαδικασίες των οικοσυστημάτων. Δεδομένου ότι η επιρροή του τεχνητού φωτισμού στην αφθονία των ειδών και των τροφικών αλληλεπιδράσεων έχει τεκμηριωθεί ευρέως, δεν φαίνεται να υπάρχει αμφιβολία ότι τέτοιες επιπτώσεις στις λειτουργίες και τις διαδικασίες ενός οικοσυστήματος είναι υπαρκτές [29, 33]. Παρ' όλα αυτά, ο βαθμός στον οποίο συμβαίνει αυτό παραμένει ελάχιστα κατανοητός, κυρίως λόγω του εξαιρετικά μικρού αριθμού μελετών που έχουν διεξαχθεί [7, 31, 105–107], όμως με σημαντικά αποτελέσματα όπως η πιθανή επιρροή διαφορετικών φασμάτων [99, 100], η αλληλεπίδραση μεταξύ ειδών [58, 108], η διατάραξη βασικών διαδικασιών όπως η επικονίαση [56, 57], αλλά και η επίδραση στη δομή των κοινοτήτων [99, 105, 109–111]. Όπως αναφέρουν οι Gaston et al. [112], μια πρόκληση στον προσδιορισμό της επίδρασης του τεχνητού φωτισμού σε επίπεδο πληθυσμού είναι ότι ενώ αυτός μπορεί δυνητικά να επηρεάσει καθεμία από τις βασικές δημογραφικές παραμέτρους (γεννήσεις-θάνατοι, μετανάστευση), είναι δύσκολο να μελετηθεί κάθε ένα από αυτά τα αποτελέσματα για ένα μόνο είδος. Αυτό συμβαίνει διότι τα είδη για τα οποία είναι εύκολο να μετρηθούν οι γεννήσεις-θάνατοι, είναι επιδημικά ή δύσκολο να μελετηθεί η μετανάστευσή τους, ενώ το αντίστροφο ισχύει για τα αποδημητικά είδη.

Οι Spoolstra et al. [100] χωρίζουν την επιρροή του νυχτερινού τεχνητού φωτισμού σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχ. 1.5: 1) άμεση επιρροή στη βιωσιμότητα του είδους, 2) έμμεση επιρροή στα χαρακτηριστικά του είδους και 3) έμμεση επιρροή στο περιβάλλον του είδους.

1. Στην πρώτη περίπτωση, ο πιο άμεσος τρόπος επιρροής του φωτισμού είναι η απευθείας επίδραση στην επιβίωση του κάθε οργανισμού ξεχωριστά, όπως περιπτώσεις μαζικής θνησιμότητας, άμεσες δηλαδή επιπτώσεις στον πληθυσμό.
2. Ο τελικός αντίκτυπος του φωτός μπορεί ωστόσο να είναι πιο έμμεσος. Στη δεύτερη περίπτωση, χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι πιθανές επιδράσεις στη συμπεριφορά και τη φυσιολογία του είδους, και ως εκ τούτου στα διάφορα ιδιαίτερα «ιστορικά» (μορφολογικά, φυσιολογικά κ.ά.) γνωρίσματα που το διακρίνουν (αγγλ.

life-history traits). Για παράδειγμα, εάν το φως οδηγεί σε πρόωρη αναπαραγωγή προκαλώντας μετέπειτα υψηλή νεανική θνησιμότητα, μπορεί κατά συνέπεια να επηρεαστεί αρνητικά η αρμοστικότητα (αγγλ. fitness) και ως εκ τούτου το μέγεθος του πληθυσμού να μειωθεί (μεσαία στήλη του Σχ. 1.5). Συνεπώς, οι επιδράσεις αυτές είναι δυσδιάκριτες αρχικά και μπορεί να προκύψουν μόνο μετά από μια παρατεταμένη περίοδο έκθεσης στο φως.

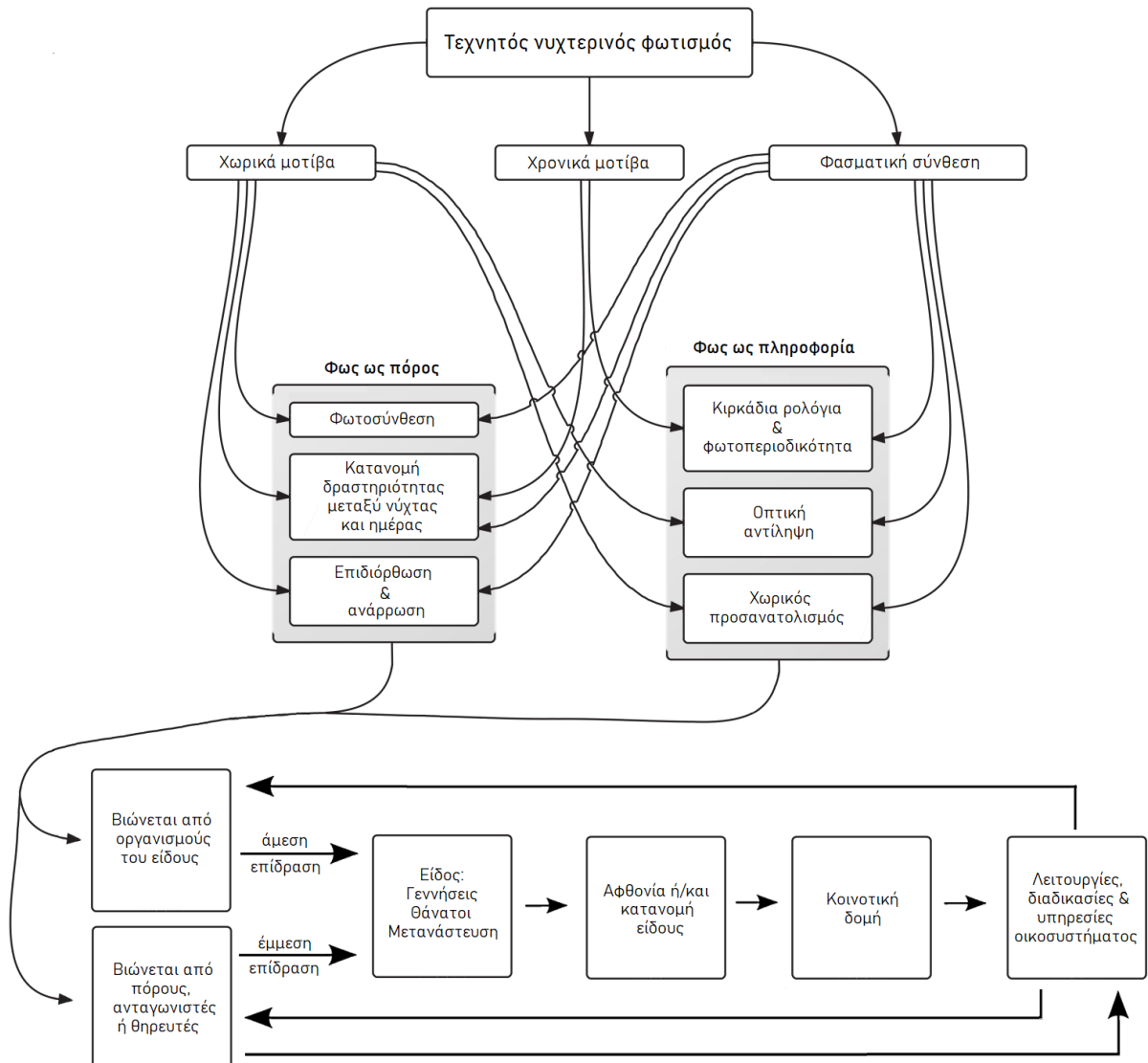
3. Όσον αφορά την τρίτη περίπτωση, επιδράσεις (τόσο άμεσες όσο και υποβόσκουσες) του φωτός στο περιβάλλον ενός είδους μπορεί να προκαλέσουν ακόμη πιο έμμεσες επιπτώσεις στην αρμοστικότητά του. Οι επιδράσεις αυτές περιλαμβάνουν γενικές μεταβολές στα ενδιαιτήματα αλλά και αλυσιδωτές επιπτώσεις, για παράδειγμα τη διαθεσιμότητα θηράματος ή θηρευτή οι οποίοι μπορούν να επηρεαστούν από όλους τους πιθανούς τρόπους που απεικονίζονται στο Σχ. 1.5.



Σχήμα 1.5: Διάγραμμα των τρόπων με τους οποίους το τεχνητό φως μπορεί να επηρεάσει τα είδη σε επίπεδο πληθυσμού. Απόδοση από [100, Σχ. 1].

Η μελέτη των παραπάνω επιπτώσεων απαιτεί μια ολοκληρωμένη και μακροπρόθεσμη προσέγγιση ολόκληρου του οικοσυστήματος, και σε ελεγχόμενες συνθήκες στις οποίες ρυθμίζονται όλοι οι υπόλοιποι ανθρωπογενείς παράγοντες [113]. Μεγάλο μέρος των διαθέσιμων γνώσεων βασίζεται σε βραχυπρόθεσμα πειράματα χρονικού διαστήματος μίας γενιάς (συνήθως ημέρες έως εβδομάδες) που δεν επιτρέπουν την εξέταση των μηχανισμών απόκρισης, όπως ο εγκληματισμός, η προσαρμογή, οι φυσιολογικοί, συμπεριφορικοί ή και ακόμη οι εξελικτικοί αντισταθμιστικοί μηχανισμοί που συνδέονται με το περιβάλλον και το εποχιακό χρονοδιάγραμμα. Για παράδειγμα, μια περίοδος φωτισμού άνω του ενός έτους ήταν απαραίτητη για να προκληθεί μια σαφής αλλαγή σε μια μικροβιακή κοινότητα γλυκού νερού που δεν είχε δεχτεί ξανά τεχνητό φως [106].

Συνοψίζοντας την παραπάνω ανάλυση, μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τις επιπτώσεις του τεχνητού φωτός στους οργανισμούς και τα οικοσυστήματα που αποτελούν απεικονίζεται στο Σχ. 1.6.



Σχήμα 1.6: Διασταύρωση των επιπτώσεων του νυκτερινού φωτισμού στα χωρικά, χρονικά και φασματικά συστατικά των επιπέδων φωτός, καθώς και των επιπτώσεων του φωτός ως πόρος και ως πηγή πληροφοριών, σε συνδυασμό με τους τρόπους που οι επιπτώσεις αυτές μπορούν να επηρεάσουν τη δομή της κοινότητας και τη λειτουργία, τις διαδικασίες και τις υπηρεσίες του οικοσυστήματος, μέσω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ειδών. Απόδοση από [8, Σχ. 3] και [33, Σχ. 7].

1.3.3 Επίδραση του Skyglow

Ενώ οι οικολογικές και βιολογικές επιπτώσεις του πιο άμεσου φωτισμού γίνονται όλο και πιο κατανοητές, η επιρροή του διάχυτου φωτός που ονομάζεται «skyglow» παραμένει ελάχιστα εξερευνημένη. Η διεκπεραίωση τέτοιων ερευνών είναι αρκετά δύσκολη, αν και έχουν γίνει προτάσεις για το πως αυτές μπορεί να οικοδομηθούν [20]. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν κάποιες ενδείξεις ότι το τεχνητό φως διαταράσσει τα φυσικά μοτίβα φωτός τόσο μέσω άμεσων επιδράσεων φωτισμού από αυτές τις πηγές όσο και μέσω του skyglow [5, 114, 115].

1.4 Μέθοδοι Ποσοτικοποίησης Τεχνητού Skyglow

Οι συνηθέστερες μετρήσεις της νυχτερινής φωτεινότητας του ουρανού προέρχονται από τηλεσκόπια μεγάλης διαμέτρου, οι οποίες πραγματοποιούνται κυρίως στο ζενίθ ή το σκοτεινότερο τμήμα του ουρανού. Η ζενιθιακή φωτεινότητα του ουρανού ή ζενιθιακή λαμπρότητα (zenith luminance - ZL) είναι ένας καλός δείκτης της καθαρότητας του νυχτερινού ουρανού, ιδιαίτερα σε περιοχές με αρκετή φωτορύπανση. Ένα πιο ευαίσθητο μέτρο του skyglow εντοπίζεται στη μέση ουράνια λαμπρότητα (average sky luminance - ASL), μέσω της οποίας λαμβάνεται υπόψη και ο φωτισμός κοντά στον ορίζοντα, όπου είναι και πιο έντονος σε σχέση με το ζενίθ. Προκύπτουν κατ' αυτόν τον τρόπο τα επίπεδα φωτεινότητας ολόκληρου του ημισφαιρικού ουράνιου θόλου, μέτρο πολύ πιο αντιπροσωπευτικό της συνολικής καθαρότητας του ουρανού, διότι οι επισκέπτες της υπαίθρου, αλλά και οι οργανισμοί που ζουν σε αυτή, είναι πιο πιθανό να έχουν στο οπτικό τους πεδίο τον ορίζοντα από ότι το ζενίθ.

Για την ακριβή μέτρηση του skyglow σε περιοχές μακριά από τις φωτεινές πηγές, πρέπει πρώτα να αφαιρεθεί το φυσικό φωτεινό υπόβαθρο από τις μετρήσεις λαμπρότητας. Οι τιμές των $171 \mu\text{cd m}^{-2}$ και $250 \mu\text{cd m}^{-2}$ έχουν προταθεί ως τιμές αναφοράς για τα ZL και ASL αντίστοιχα, απουσία τεχνητού φωτισμού [116]. Οι δείκτες αναλογίας που χρησιμοποιούνται από τους [117] αφορούν τις τιμές των ZL και ASL προς τις τιμές αναφοράς, και ονομάζονται λόγος ολικής μέσης φωτορύπανσης ουρανού (all-sky average light pollution ratio - ALR) και λόγος ζενιθιακής φωτορύπανσης (zenith light pollution ratio - ZLR).

Προτού προχωρήσουμε στη μοντελοποίηση της κατανομής του τεχνητού φωτός, πρέπει πρώτα να ορίσουμε μερικά βασικά μεγέθη. Αν ϕ η αζιμουθιακή γωνία, z η ζενιθιακή γωνία και $B_{\phi,z}$ η λαμπρότητα του ημισφαιρικού ουράνιου θόλου σε $\mu\text{cd m}^{-2}$, τότε

Ζενιθιακή λαμπρότητα:

$$ZL = B_{\phi,0} \quad (1.1)$$

Ανθρωπογενής ζενιθιακή λαμπρότητα:

$$ZL_{\alpha} = ZL - ZL_n \quad (1.2)$$

όπου $ZL_n = 171 \mu\text{cd m}^{-2}$ η φυσική φωτεινότητα υποβάθρου του ουρανού στο ζενίθ.

Λόγος ζενιθιακής φωτορύπανσης:

$$ZLR = ZL_{\alpha}/171 \quad (1.3)$$

Μέση ουράνια λαμπρότητα:

$$ASL = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} B_{\phi,z} \sin(z) d\phi dz \quad (1.4)$$

Ανθρωπογενής μέση ουράνια λαμπρότητα:

$$ASL_{\alpha} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} (B - B_n)_{\phi,z} \sin(z) d\phi dz \quad (1.5)$$

όπου B_n η φυσική φωτεινότητα υποβάθρου ουρανού στο ϕ, z . Αν η τιμή αναφοράς για την μέση λαμπρότητα του ουράνιου θόλου σε φυσικές συνθήκες είναι $250 \mu\text{cd m}^{-2}$, τότε ο λόγος ολικής φωτορύπανσης ουρανού θα είναι:

$$ALR = ASL_{\alpha}/250 \quad (1.6)$$

Ο ALR είναι ένας ενδιαφέρων δείκτης φωτορύπανσης διότι μας ενημερώνει για την τεχνητή φωτεινότητα του νυχτερινού ουρανού κατά μέσο όρο σε όλο το ημισφαίριο πάνω από τον παρατηρητή. Στο πλαίσιο οικολογικών μελετών και μελετών της ποιότητας του νυχτερινού ουρανού είναι το πλέον κατάλληλο φωτομετρικό μέγεθος, διότι παρέχει πληροφορίες για τη συνολική κατάσταση των επιπέδων φωτισμού του νυχτερινού ουράνιου θόλου μιας περιοχής, πέρα από την απλή ζενιθιακή του τιμή.

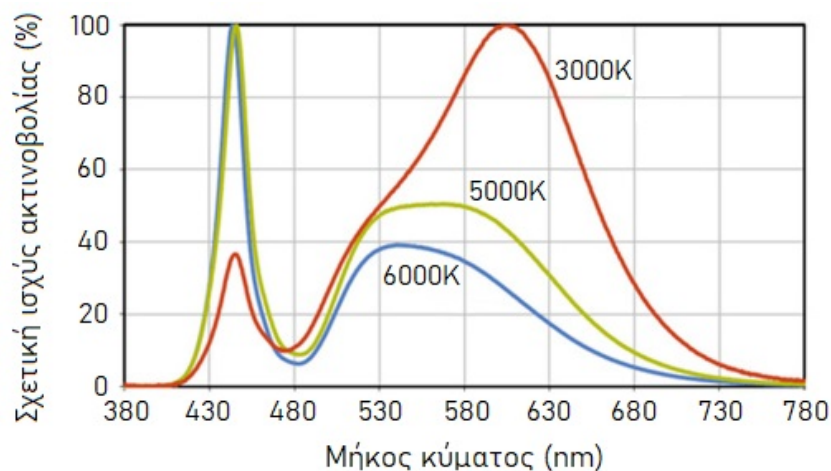
1.5 LED Φωτισμός

1.5.1 Ορισμός και Είδη LED

Μία δίοδος φωτοεκπομπής LED (αγγλ. Light Emitting Diode) αποκαλείται ένας ημιαγωγός, και συγκεκριμένα δίοδος pn, ο οποίος εκπέμπει φως στενού φάσματος όταν του παρέχεται μία ηλεκτρική τάση κατά τη φορά ορθής πόλωσης. Το χρώμα του φωτός (που αντιστοιχεί στην ενέργεια των φωτονίων) καθορίζεται από την ενέργεια που απαιτείται για να διασχίσουν τα ηλεκτρόνια το διάκενο του ημιαγωγού [118].

Λευκός Φωτισμός LED

Ένα τυπικό LED που χρησιμοποιείται για εξωτερικό φωτισμό είναι το φωσφορούχο LED ή λευκό LED μετατροπής φωσφόρου (αγγλ. Phosphor-converted white LED). Ένα λευκό φωσφορούχο LED αποτελείται από τον επονομαζόμενο «φωσφόρο», μια φθορίζουσα σκόνη που εναποτίθεται μαζί με σιλικόνη πάνω σε ένα μπλε LED από νιτρίδιο ίνδιου-γαλλίου [119]. Συνήθως εκπέμπει ακτινοβολία μήκους κύματος 450 nm, αλλά και σε 460, 440 ή και λιγότερο από 400 nm (υπεριώδες LED). Τα «ζεστά» LED λευκού χρώματος (αγγλ. warm-white LED) αποτελούνται από μια πιο κίτρινη, πορτοκαλί φθορίζουσα σκόνη που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του μπλε φωτός από το τσιπ του LED. Τα LED χαρακτηρίζονται συνήθως από τη συσχετισμένη θερμοκρασία χρώματος (αγγλ. Correlated Colour Temperature - CCT), δηλαδή τη θερμοκρασία εκπομπής ενός μελανού σώματος που μοιάζει περισσότερο με το χρώμα του LED [119]. Στο Σχ. 1.7 απεικονίζονται τα φάσματα εκπομπής για λευκά LED διάφορων θερμοκρασιών χρώματος. Το φάσμα του ουδέτερου λευκού LED παρουσιάζει ισχυρότερη εκπομπή στο κόκκινο σε σύγκριση με το ψυχρό λευκό LED, ενώ η εκπομπή στο μπλε μειώνεται καθώς μειώνεται η CCT, αλλά μόνο ελαφρώς έως και πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 1.7: Σχετική φασματική εκπομπή λευκών φωσφορούχων LED διαφορετικών CCT. Οι εκπομπές στο μπλε μένουν σχεδόν αναλλοίωτες εκτός από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες χρώματος. Απόδοση από [120].

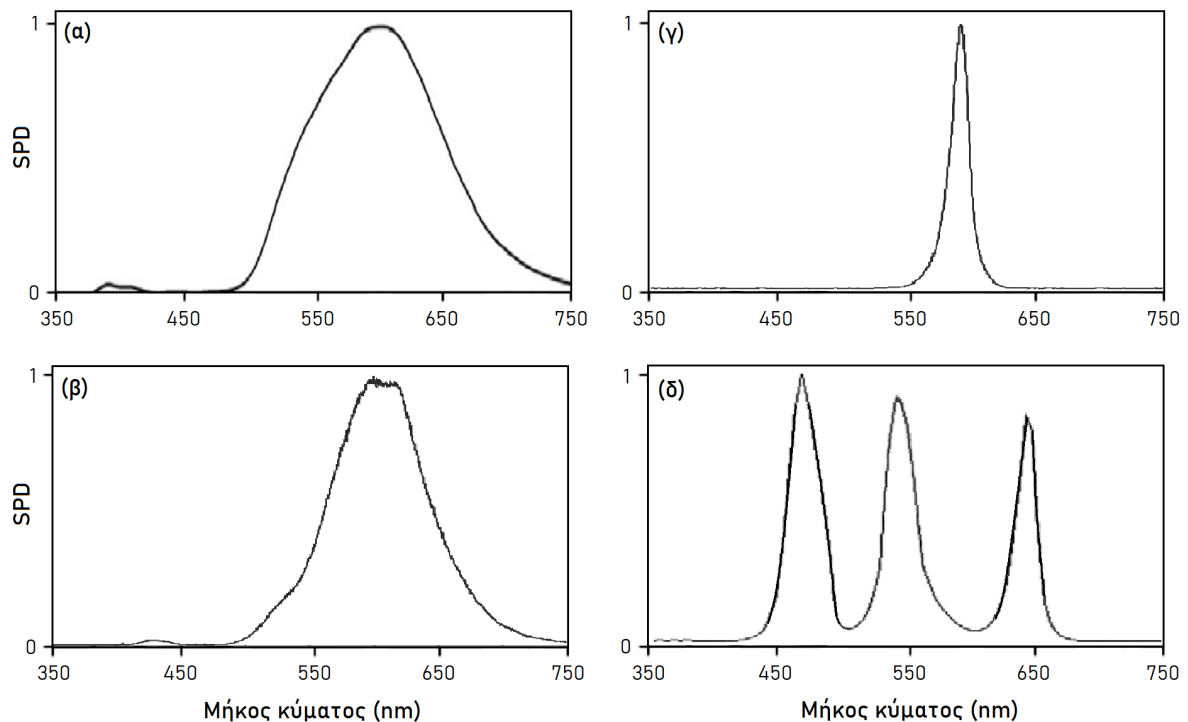
LED Χωρίς Μπλε Εκπομπές

Άλλοι τύποι λυχνιών LED με λιγότερες εκπομπές στο μπλε εύρος του φάσματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εξωτερικό φωτισμό είναι οι εξής:

- FLED (Filter LED): λευκό φωσφορούχο LED συνδυασμένο με φίλτρο αποκοπής στο κοντινό εύρος του φάσματος (αποκοπή μηκών κύματος < 500 nm).

- Phosphor-converted Amber (PCA) LED: παρόμοια κατασκευή με τα λευκά φωσφορούχα LED, όμως με πλήρη μετατροπή σε κίτρινη εκπομπή μέσω χρήσης φωσφόρου σε κεραμική μορφή. Προσφέρει 2-5 φορές μεγαλύτερη φωτεινή απόδοση σε σχέση με ένα amber LED άμεσης εκπομπής [121].
- Άμεσης εκπομπής κίτρινου (amber) LED: ένα LED περιορισμένου εύρους εκπομπής που αποτελείται από φωσφίδιο αργιλίου-ίνδιου-γαλλίου (AlInGaP). Εφαρμόζεται σε περιοχές που μέχρι πρότινος γινόταν χρήση λαμπτήρων LPS, όπως σε περιοχές φωλιάσματος θαλάσσιων χελωνών και κοντά σε αστρονομικά παρατηρητήρια.
- RGB LED: αποτελείται από τρία LED, κόκκινου, πράσινου και μπλε χρώματος. Με την ανάλογη αυξομείωση της έντασης του κάθε LED μπορεί να επιτευχθεί ένα μεγάλο φάσμα χρωμάτων, ενώ με τον συνδυασμό και των τριών παράγεται λευκό χρώμα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι λευκών πολυ-χρωματικών LED: δι-χρωματικά, τρι-χρωματικά και τετρα-χρωματικά. Είναι τα πιο κοστοβόρα όσον αφορά την κατασκευή και την ενεργειακή κατανάλωση διότι σε σχέση με τους άλλους τύπους απαιτείται η χρήση δύο ή παραπάνω LED, ενώ η απόδοση του λευκού χρώματος είναι η χειρότερη όλων των ειδών LED.

Στο Σχ. 1.8 απεικονίζονται τα φάσματα εκπομπής από τυπικά παραδείγματα των παραπάνω τύπων LED.



Σχήμα 1.8: Φασματική πυκνότητα ροής ακτινοβολίας (SPD) διάφορων τύπων LED: (α) FLED, (β) PCA LED, (γ) Amber LED και (δ) RGB LED. Πηγή: volt.org και [114].

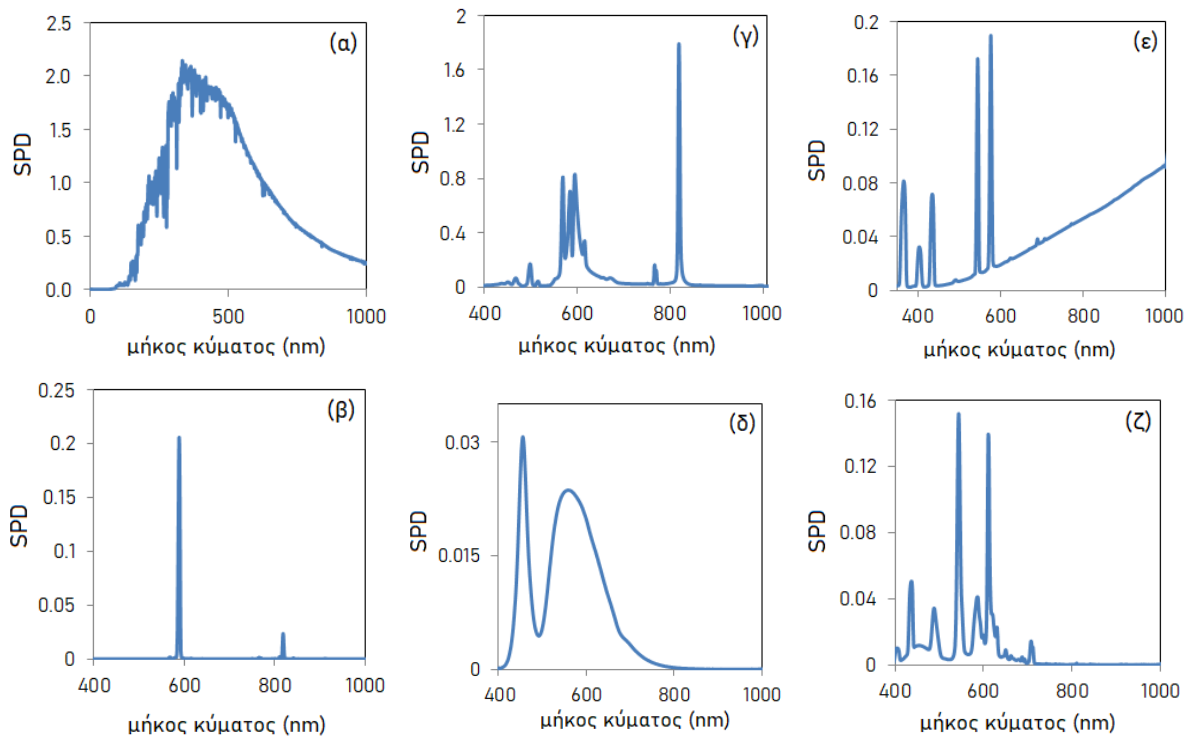
1.5.2 Σύγκριση με Άλλους Τύπους Λαμπτήρων

Τα LED υπερεισχύουν των άλλων τύπων λαμπτήρων λόγω της υψηλής απόδοσής και ενεργειακής αποδοτικότητας τους, καθώς και εξαιτίας της ευελιξίας τους: προσφέρουν δυνατότητα ρύθμισης του εκπεμπόμενου φάσματος, της μείωσης έντασης έως και της απενεργοποίησής τους (σε πιθανές περιόδους χαμηλής ζήτησης).

Άλλοι βασικοί λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται στον εξωτερικό φωτισμό είναι οι εξής:

- Οι λαμπτήρες ατμών υδραργύρου (αγγλ. Mercury-Vapour), ή λαμπτήρες υψηλής πίεσης υδραργύρου, ήταν οι πρώτοι ευρέως χρησιμοποιούμενοι λαμπτήρες μεγάλης έντασης. Χαρακτηρίζονται από χαμηλή απόδοση, ενώ λόγω της περιεκτικότητάς τους σε υδράργυρο τείνουν να απαγορευτούν πλήρως και να αντικατασταθούν από αποδοτικότερους λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων και λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης.
- Οι λαμπτήρες μεταλλικών αλογονιδίων (αγγλ. Metal-Halide), είναι παρόμοιοι κατασκευαστικά με τους λαμπτήρες ατμών υδραργύρου, με την επιπλέον προσθήκη ποσοτήτων μεταλλικών αλογονιδίων. Προσφέρουν υψηλή φωτεινότητα με καλή απόδοση χρώματος, και υψηλή φωτεινή απόδοση έναντι των λαμπτήρων πυρακτώσεως και ατμών υδραργύρου. Ταυτόχρονα έχουν χαμηλή διατήρηση της φωτεινής απόδοσης σε σχέση με τους λαμπτήρες χαμηλής και υψηλής πίεσης νατρίου, με εκπομπές υψηλού περιεχόμενου UV ακτινοβολίας.
- Οι λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης ή λαμπτήρες LPS (αγγλ. Low Pressure Sodium) χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ευρώπη, και κυρίως σε περιπτώσεις που η φωτορύπανση πρέπει να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα, λόγω του σχεδόν μονοχρωματικού παραγόμενου φωτός (περίπου 589 nm). Προσφέρουν υψηλή φωτεινή απόδοση και σχετικά χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, αλλά σε συνδυασμό με έλλειψη απόδοσης χρώματος και πιο σύντομη διάρκεια ζωής.
- Οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης ή λαμπτήρες HPS (αγγλ. High Pressure Sodium) είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι λαμπτήρες για τον οδοφωτισμό, αφού προσφέρουν μακροχρόνια διάρκεια ζωής και υψηλή απόδοση με χαμηλή πτώση (αν και χειρότερη συγκριτικά με τους λαμπτήρες LPS). Ένας τυπικός λαμπτήρας HPS 100 W παράγει 9500 lm, ενώ ένας 150 W παράγει 16000 lm.

Στο Σχ. 1.9 απεικονίζονται τα φάσματα εκπομπής διάφορων λαμπτήρων μαζί με το φυσικό λευκό ηλιακό φως της ημέρας, όπου διαφαίνεται το εξαιρετικά διαφορετικό φάσμα των λευκών LED συγκριτικά με τους υπόλοιπους λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται στη φωταγώγηση οδών και πόλεων.



Σχήμα 1.9: Φασματική πυκνότητα ροής ακτινοβολίας (SPD) για (α) ηλιακό (λευκό) φως ημέρας, (β) λαμπτήρα νατρίου χαμηλής πίεσης (LPS), (γ) λαμπτήρα νατρίου υψηλής πίεσης (HPS), δ) λευκό LED 6000K, (ε) λαμπτήρα ατμών υδραργύρου υψηλής πίεσης, και (ζ) λαμπτήρα φθορισμού. Το φάσμα φωτός ημέρας λήφθηκε από <https://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra> ενώ τα φάσματα τεχνητού φωτός από https://ngdc.noaa.gov/eog/night_sat/spectra.html. Απόδοση από [33, Σχ. 4].

1.5.3 Οικολογικές Επιπτώσεις των Λευκών LED

Οι «λευκές» λυχνίες LED αντικαθιστούν γρήγορα τις συμβατικές τεχνολογίες εξωτερικού φωτισμού σε όλο τον κόσμο. Παρά τις αυξανόμενες ανησυχίες για τον αντίκτυπό τους στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, η ευελιξία των LED θεωρείται μέσο άμβλυνσης των οικολογικών επιπτώσεων του νυχτερινού φωτισμού, αν και αυτό δεν φαίνεται να ισχύει. Οι περιβαλλοντικές συνέπειες της χρήσης εναλλακτικών τεχνολογιών φωτισμού αποδεικνύονται ολοένα και περισσότερο. Η ευρεία διάδοση των λευκών LED υψηλής έντασης, πέρα από την υψηλή αποδοτικότητά τους, στην πραγματικότητα επιδεινώνει τις αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας με κόστος για τη βιοποικιλότητα. Ο λόγος για το γεγονός αυτό είναι οι ισχυρές εκπομπές σε πιο ρυπογόνα (πιο μπλε) φάσματα φωτός έναντι των εκπομπών κίτρινου φωτός από τις παλαιότερες τεχνολογίες φωτισμού, όπως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως και οι LPS [122] (βλ. Σχ. 1.9). Η εκπομπή στο μπλε είναι ιδιαίτερα επιβλαβής στα επίπεδα φωτός εξαιτίας της σκέδασης Rayleigh, η οποία εξαρτάται από το

μήκος κύματος με τον όρο λ^{-4} : μία εκπομπή φωτός στα 450-500 nm σκεδάζεται περίπου τρεις φορές περισσότερο σε σχέση με μια εκπομπή στα 589 nm από μία λάμπα LPS. Υποθέτοντας ότι η φωτοπική ροή και οι άμεσα ανοδικές εκπομπές παραμένουν ίδιες, μια λευκή λυχνία LED 4000K είναι κατά μέσο όρο περίπου 2.5 φορές πιο ρυθμογόννη για τη σκοτοπική ζώνη του φάσματος από ότι ένας λαμπτήρας νατρίου υψηλής πίεσης HPS ή περίπου 17 φορές από λαμπτήρα νατρίου χαμηλής πίεσης LPS [17, 114, 122]. Αυτό ισχύει είτε για εκπομπές σε μικρές γωνίες προς το ζενίθ είτε σε μεγαλύτερες γωνίες προς το οριζόντιο επίπεδο, με μικρές διαφορές στην εξασθένιση λόγω της απόστασης στη δεύτερη περίπτωση [17]. Επιπλέον, στην ίδια έρευνα προβλέπεται ακόμη εντονότερη διάδοση της ακτινοβολίας κάτω από καθαρές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Κατά συνέπεια, φως μικρότερων μηκών κύματος εισάγεται στο νυχτερινό περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα, δεδομένου ότι πολλά βιολογικά συστήματα έχουν συναρτήσεις απόκρισης πιο ευαίσθητες στο μπλε [32], αναμένονται αυξημένες επιπτώσεις στους αντίστοιχους οργανισμούς και πιθανή διατάραξη των ισορροπιών στα οικοσυστήματα που αποτελούν [44, 123].

Επιρροή Θερμοκρασίας Χρώματος

Είναι πλέον γνωστό ότι όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία χρώματος ενός λευκού LED, τόσο πιο έντονα σκεδάζεται το φως και συνεπώς τόσο περισσότερο θα διαταράσσονται τα βιολογικά συστήματα [119]. Αν και συνήθως προτιμώνται εξαιτίας του μεγαλύτερου ενεργειακού τους οφέλους, σε κάποιες χώρες έχουν καθοριστεί όρια στη θερμοκρασία χρώματος. Συγκεκριμένα, το CCT δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή του φεγγαρόφωτος (4200 K), αλλά ακόμη και αυτή η προσέγγιση δεν λαμβάνει υπ' όψιν την μπλε εκπομπή φωτός των LED ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία χρώματος, η οποία δεν εντοπίζεται στο φάσμα του φεγγαρόφωτος. Τα λευκά LED χαμηλού CCT (3000 K ή χαμηλότερα, δηλαδή το χρώμα των τυπικών λαμπτήρων πυρακτώσεως) είναι τα λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον και την αστρονομική παρατήρηση.

Προοπτικές

Στην έρευνα των Davies et al. [99] παρατηρήθηκε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα μείωσης των οικολογικών επιπτώσεων των LED προήλθαν από ένα συνδυασμό μείωσης της έντασης κατά 50% και πλήρους απενεργοποίησης, αν και ακόμη και τότε οι πληθυσμοί δύο κατά τα άλλα κοινά είδη επηρεάστηκαν. Αναφέρουν πως ενώ αυτές οι στρατηγικές διαχείρισης των LED μπορούν είναι ένα αποτελεσματικό μέσο μείωσης του αριθμού των επηρεαζόμενων ταξινομικών ομάδων, η πλήρης αποτροπή της οικολογικής επίδρασης του νυχτερινού φωτισμού πιθανώς να απαιτεί την αποφυγή της χρήσης τους. Αντίστοιχα, η επιλογή PC-White LED με χαμηλότερη θερμοκρασία χρώματος δεν φαίνεται πολλά υποσχόμενη. Οι Pawson et al. [124] δεν βρήκαν στοιχεία που να αποδεικνύουν ότι η ρύθμιση της θερμοκρασίας χρώματος των λευκών LED ελαχιστοποιεί ή έστω επηρεάζει τις οι-

κολογικές επιπτώσεις από την υιοθέτησή τους, διότι οι εκπομπές στα μικρότερα μήκη κύματος παραμένουν ίδιες. Ως εκ τούτου, η μεγάλης κλίμακας (κοινοτική και βιομηχανική) χρήση ενεργειακά αποδοτικού λευκού φωτισμού LED μπορεί ενδεχομένως να επιδεινώσει τις προσβολές από παράσιτα, μειώνοντας κατά συνέπεια την φυτούγειονομική προστασία. Οι Longcore et al. [125] υπολόγισαν ορισμένους δείκτες σχετικής απόκρισης για μια σειρά τύπων λαμπτήρων και πηγών φωτός, και ανέπτυξαν έναν δείκτη μέσω του οποίου εντοπίζονται λαμπτήρες που ελαχιστοποιούν τις προβλεπόμενες επιδράσεις όπως εκείνες μετρώνται από οικολογικούς, φυσιολογικούς και αστρονομικούς δείκτες. Μέσω αυτής της αξιολόγησης, κατέληξαν ότι τα κίτρινα-πράσινα και πορτοκαλί LED με φίλτρο αναμένεται να έχουν μικρότερη επιρροή στην άγρια φύση από ότι οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης, ενώ ο πλούσιος σε μπλε φωτισμός (θερμοκρασίας χρώματος ≥ 2200 K) θα έχει μεγαλύτερη επίδραση.

1.5.4 LED στην Περιφέρεια Ηπείρου

Η αρχή για τη μετάβαση του εθνικού και επαρχιακού οδικού δικτύου φωτισμού σε λαμπτήρες LED στην Περιφέρεια Ηπείρου έχει γίνει από το 2019 στο πλαίσιο προκήρυξης για Σύμπραξη Δημοσίου – Ιδιωτικού Τομέα (ΣΔΙΤ), μέσω του προγράμματος «ELENA» (ΕΕ-ΕΤΕπ), με προϋπολογισμό περίπου 10 εκατ. ευρώ (με ΦΠΑ) [126]. Το έργο αυτό αφορά την αντικατάσταση 8.500 υπάρχοντων λαμπτήρων με χαμηλής κατανάλωσης λευκά LED φωσφόρου των 3000K και 4000K, καθώς και την εγκατάσταση συστήματος παρακολούθησης και τηλεδιαχείρισης της λειτουργίας του φωτισμού. Κατά την περίοδο γραφής της παρούσας εργασίας, το έργο της αναβάθμισης του οδοφωτισμού στην Περιφέρεια Ηπείρου βρισκόταν στο στάδιο της εξέλιξης του διαγωνισμού ΣΔΙΤ, μέσω του οποίου οι ενδιαφερόμενες εταιρείες καταθέτουν τις προτάσεις τους. Μέσω του ίδιου μηχανισμού, στο πλαίσιο του έργου «Αποδοτικά και Φιλικά προς το Περιβάλλον Μέσα Μαζικής Μεταφοράς, δημόσιος Οδοφωτισμός και Κτίρια στην Περιφέρεια Ηπείρου», σε εξέλιξη βρίσκονται οι διαγωνιστικές διαδικασίες με τη μορφή Σύμβασης Ενεργειακής Απόδοσης (ΣΕΑ) για την παροχή υπηρεσιών αναβάθμισης της ενεργειακής απόδοσης των υποδομών του οδοφωτισμού του Δήμου Ιωαννιτών και του Δήμου Πρέβεζας [127, 128], αντικαθιστώντας 17.624 και 8.170 φωτιστικά σώματα αντίστοιχα. Η προγραμματική σύμβαση μεταξύ της Περιφέρειας Ηπείρου και των δύο δήμων θα φέρει εκείνους ως κύριους των έργων, και την Περιφέρεια ως φορέα ωρίμανσης και δημοπράτησης, με συνολικό προϋπολογισμό 28 εκατ. ευρώ (με ΦΠΑ).

Ταυτόχρονα, σε εξέλιξη βρίσκεται και η αλλαγή των δημοτικών δικτύων ηλεκτροφωτισμού, με τυπικά παραδείγματα για τους Δήμους Ιωαννιτών [129], Αρταίων [130], Ηγουμενίτσας [131] και Πρέβεζας [132].

Κεφάλαιο 2

Οικοσυστήματα Περιφέρειας Ηπείρου

Η Ήπειρος θα μπορούσε να παρομοιαστεί με έναν φυσικό παράδεισο, ένα μοναδικό μωσαϊκό από δάση, πεδιάδες, ποτάμια, θάλασσες, λίμνες, νησιά και ορεινούς όγκους, που την καθιστούν μία από τις γεωγραφικά και γεωλογικά πλουσιότερες περιφέρειες της χώρας. Η ορειογραφική διαμόρφωση και η τοπογραφική ετερογένειά της μαζί με το μεγάλο πλήθος βιοτόπων έχουν ως αποτέλεσμα έναν μεγάλο χλωριδικό πλούτο και υψηλό ποσοστό ενδημισμού. Η Ήπειρος φιλοξενεί μια εξαιρετικά μεγάλη ποικιλία οικοσυστημάτων: οικοσυστήματα δασών, αλπικών και υποαλπικών λιβαδιών, βραχώδων πλαγιών, φαραγγιών, πολύτιμα υδάτινα οικοσυστήματα και οικοσυστήματα παραποτάμιας βλάστησης, σε καθένα από τα οποία επιβιώνουν πολλά ενδημικά και προστατευόμενα είδη. Στις περιοχές αυτές ευδοκμούν μοναδικά στοιχεία φυσικού πλούτου, εξαιρετικά ευαίσθητα και πολύτιμα. Αποτελούν στολίδια της ελληνικής φύσης και ταυτόχρονα λειτουργούν ως ασπίδα προστασίας και καταφύγιο για τη βιοποικιλότητα της χώρας.

Το Γεωγραφικό Διαμέρισμα Ηπείρου καταλαμβάνει το 7% της συνολικής έκτασης της χώρας με έκταση περίπου 916547 ha. Το ΓΔ Ηπείρου οριοθετείται φυσικά από την οροσειρά της Πίνδου στα ανατολικά – βορειοανατολικά, μια σειρά σημαντικών ορεινών όγκων στα βόρεια (όπου και συνορεύει με την Αλβανία), το Ιόνιο Πέλαγος στα δυτικά και τον Αμβρακικό κόλπο στα νότια. Η γεωμορφολογία της Ηπείρου χαρακτηρίζεται από σημαντικούς ορεινούς όγκους, οι οποίοι καλύπτουν πάνω από το 70% της συνολικής έκτασης του ΓΔ, αλλά και από ένα πλούσιο δίκτυο επιφανειακών υδάτων. Η ποικιλία και η εναλλαγή των χερσαίων, θαλάσσιων και υδάτινων φυσικών οικοσυστημάτων που συνθέτουν την εικόνα του ΓΔ της Ηπείρου είναι ιδιαίτερης σημασίας, καθώς περιλαμβάνει μεγάλο τμήμα του φάσματος τύπων βλάστησης και οικοτόπων που απαντάται συνολικά στην Ελλάδα.

2.1 Προστατευόμενες Περιοχές

Στην Ελλάδα, φυσικές περιοχές αναγνωρίζονται ως προστατευόμενες είτε μέσω του χαρακτηρισμού τους με βάση την ισχύουσα εθνική νομοθεσία είτε με την κατοχύρωσή τους στο πλαίσιο διεθνών συμβάσεων, τις οποίες έχει κυρώσει η χώρα, όπως και διεθνών ή ευρωπαϊκών πρωτοβουλιών. Μία από αυτές είναι το Δίκτυο «Natura 2000», ένα δίκτυο τοποθεσιών που έχουν επιλεγεί με στόχο την προστασία όλων των βασικών τύπων των ευρωπαϊκών οικοτόπων και την εξασφάλιση της μακροπρόθεσμης επιβίωσης των απειλούμενων ειδών. Οι περιοχές αυτές στην Ελλάδα έχουν αποκτήσει και θεσμική υπόσταση μετά το Ν. 3937/2011.

Στην Περιφέρεια Ηπείρου υπάρχει σημαντικός αριθμός καταγεγραμμένων ευαίσθητων ή/και προστατευόμενων περιοχών, καταλαμβάνοντας περίπου το 50% της έκτασής της, μέσα στις οποίες περιλαμβάνονται [133, 134]:

- Ένα μνημείο της φύσης,
- Δύο εθνικοί δρυμοί,
- Δύο προστατευόμενα τοπία (αισθητικά δάση),
- Μία περιοχή RAMSAR,
- 30 περιοχές CORINE,
- 34 Καταφύγια Άγριας Ζωής,
- 2 Ειδικά Προστατευόμενες Περιοχές σύμφωνα με το Πρωτόκολλο 4 της Σύμβασης της Βαρκελώνης,
- 1 περιοχή οικοανάπτυξης (λίμνη Παμβώτιδας),
- 3 Εθνικά Πάρκα,
- Τοπία ιδιαίτερου φυσικού κάλλους, τα οποία συγκεντρώνονται κυρίως στην παράκτια περιοχή που εκτείνεται από τις εκβολές του Αχέροντα ως τη Σαγιάδα και στον κεντρικό ορεινό όγκο,
- 27 καταχωρημένες περιοχές στο υπό κατάρτιση Πανευρωπαϊκό Δίκτυο Προστατευόμενων Περιοχών NATURA 2000, ενώ είκοσι δύο περιοχές είναι υποψήφιες για ένταξη.

Πολλές από τις προστατευόμενες περιοχές ανήκουν σε περισσότερες από μία από τις παραπάνω κατηγορίες, ή επικαλύπτονται με άλλες. Για παράδειγμα ο Αμβρακικός Κόλπος είναι περιοχή Ramsar, περιοχή Natura 2000 αλλά και μέρος Εθνικού Πάρκου. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται εν συντομία οι βασικότερες προστατευόμενες περιοχές της Περιφέρειας Ηπείρου και η βιοποικιλότητά τους.

Γεωχωρικά Δεδομένα

Τα γεωχωρικά δεδομένα για την ψηφιοποίηση των προστατευόμενων περιοχών σε περιβάλλον GIS λήφθηκαν από την Παγκόσμια Βάση Δεδομένων για τις Προστατευόμενες Περιοχές «WDPA» (World Database on Protected Areas) [134]. Οι πηγές των δεδομένων αναφέρονται αναλυτικά στον Πίνακα 2.1. Τα γεωχωρικά δεδομένα για τα γεωγραφικά όρια της Περιφέρειας Ηπείρου και της ακτογραμμής της Ελλάδας λήφθηκαν από την ιστοσελίδα geodata.gov.gr.

Πηγή	Παρέχεται από	Ανανέωση
Κοινή Βάση Δεδομένων για τις Καθορισμένες Περιοχές (CDDA)	Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (ΕΟΠ)	2020
Παγκόσμιος Κατάλογος της Ελληνικής Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού	Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού Ελλάδας	1985
Μνημεία Παγκόσμιας Κληρονομιάς UNESCO	Πρόγραμμα Παγκόσμιας Κληρονομιάς της Διεθνούς Ένωσης Προστασίας της Φύσης (IUCN)	2020
Υγροβιότοποι Διεθνούς Σημασίας (Σύμβαση RAMSAR)	Γραμματεία Ramsar, εκ μέρους των συμβαλλόμενων μερών	2020
Natura 2000	Γενική Διεύθυνση Περιβάλλοντος μέσω του ΕΟΠ	2020

Πίνακας 2.1: Πηγές των γεωχωρικών δεδομένων που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων WDPA.

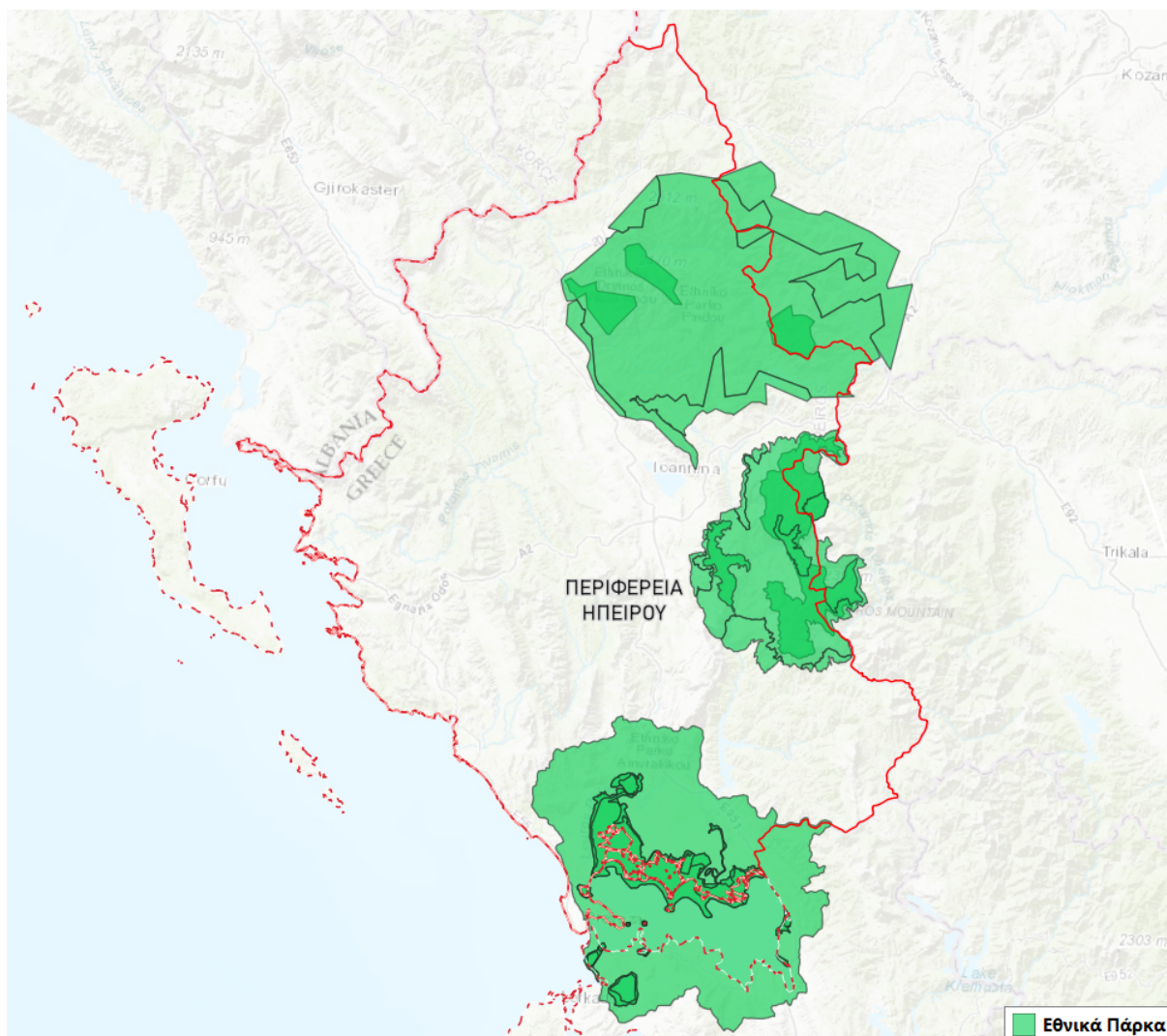
2.1.1 Εθνικά Πάρκα

Ως Εθνικά Πάρκα χαρακτηρίζονται περιοχές μεγάλης έκτασης που είτε λόγω της θέσης τους, όπως διασυνοριακές, είτε λόγω της εξέχουσας οικολογικής ή άλλης φυσικής σπουδαιότητάς τους θεωρούνται ως σημαντικές σε εθνικό επίπεδο. Μέχρι και τον Αύγουστο 2019 έχουν κηρυχθεί με Προεδρικό Διάταγμα 3 Εθνικά Πάρκα. Ένα από αυτά, το «Εθνικό Πάρκο Τζουμέρκων, Περιστερίου, χαράδρας Αράχθου», ανήκει στην Περιφέρεια Ηπείρου.

Αναλυτικά τα Εθνικά Πάρκα της Περιφέρειας Ηπείρου καταγράφονται κατά φθίνουσα έκταση στον Πίνακα 2.2 και απεικονίζονται στο Σχ. 2.1.

Εθνικά Πάρκα Περιφέρειας Ηπείρου	Έκταση [ha]
Εθνικό Πάρκο Υγρότοπων Αμβρακικού (Ζώνη Περιβαλλοντικού Ελέγχου)	209894.7 (152340.3)
Εθνικό Πάρκο Βόρειας Πίνδου	208579.9
Εθνικό Πάρκο Τζουμέρκων - Περιστερίου και χαράδρας Αράχθου	115471.7

Πίνακας 2.2: Εθνικά Πάρκα Περιφέρειας Ηπείρου κατά φθίνουσα έκταση.



Σχήμα 2.1: Τα τρία Εθνικά Πάρκα της Περιφέρειας Ηπείρου. Διακρίνονται οι πυρήνες και οι ζώνες του κάθε Πάρκου.

Βιοποικιλότητα Εθνικών Πάρκων

- Εθνικό Πάρκο Υγρότοπων Αμβρακικού

Ένας από τους μεγαλύτερους υγροβιότοπους σε όλη την Ελλάδα, ο Αμβρακικός κόλπος και οι πέριξ σε αυτόν περιοχές αποτελούν ένα μωσαϊκό οικοτόπων με 17 τύπους φυσικών ενδιαιτημάτων, όπως λιμνοθάλασσες, καλαμιώνες, βάλτους και παραποτάμια δάση, και συνεπώς έναν θησαυρό βιοποικιλότητας στον οποίο έως σήμερα έχουν καταγραφεί 8 σημαντικά είδη χλωρίδας [135]. Στον υγρότοπο του πάρκου έχουν παρατηρηθεί 296 είδη πτηνών, το 65% των ειδών της Ελληνικής ορνιθοπανίδας και το 59% των προστατευόμενων ειδών της Ευρώπης [136]. Από τα είδη αυτά, 126 αναφέρονται ως απειλούμενα και προστατευόμενα είδη στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ενώ 5 είδη απειλούνται σε παγκόσμιο επίπεδο. Το μεγαλύτερο πλήθος της ορνιθοπανίδας αφορά αποδημητικά είδη.

- Εθνικό Πάρκο Βόρειας Πίνδου

Με κύρια φυσικά όρια να αποτελούν οι ποταμοί Αώος και Βοϊδομάτης, όπου στο εσωτερικό τους εντοπίζονται μεγάλοι ορεινοί όγκοι και πλούσιες δασικές εκτάσεις, στο Εθνικό Πάρκο Βόρειας Πίνδου δημιουργείται ένα πολυσχιδές ανάγλυφο με ποικιλία οικοτόπων και ειδών [137]. Ο χλωριδικός πλούτος του πάρκου αναφέρεται σε περίπου 1500 διαφορετικά φυτικά taxa (είδη και υποείδη φυτών), ενώ υπάρχει μεγάλη ποικιλία σε σπάνια είδη καθώς στην περιοχή φιλοξενούνται σχεδόν όλα τα μεγάλα θηλαστικά της ηπειρωτικής Ελλάδας. Συνολικά στο πάρκο βρίσκουν καταφύγιο 60 είδη θηλαστικών, 180 ειδών πουλιών, 30 είδη ερπετών, 14 είδη αμφιβίων και 17 είδη ψαριών.

- Εθνικό Πάρκο Τζουμέρκων - Περιστερίου και χαράδρας Αράχθου

Η πανίδα στο Εθνικό Πάρκο Τζουμέρκων - Περιστερίου και Χαράδρας Αράχθου, περιλαμβάνει σημαντικό αριθμό χερσαίων, υδρόβιων και ιπτάμενων ασπονδύλων, αμφιβίων, ερπετών, πουλιών και θηλαστικών [138]. Όσον αφορά στα σπονδυλόζωα έχουν καταγραφεί συνολικά 197 είδη, με 7 είδη ψαριών, 6 είδη αμφιβίων, 19 είδη της ερπετοπανίδας, αλλά και σημαντικό αριθμό στρουθιόμορφων και αρπακτικών πτηνών (περίπου 150 είδη). Οι υπάρχουσες μελέτες που αφορούν τα ασπόνδυλα είναι περιορισμένες και ως σήμερα παραμένει άγνωστος ο αριθμός των ειδών που ζουν στα ενδιαιτήματα της περιοχής. Ενώ το πάρκο δεν έχει μελετηθεί εξονυχιστικά όσον αφορά τα είδη της χλωρίδας, έως τώρα έχει αναγνωριστεί ότι φύονται περίπου 700 είδη φυτών, με τον αριθμό σημαντικών ή ενδημικών φυτικών ειδών να ανέρχεται σε 79 είδη. Από αυτά τα 20 είναι ενδημικά taxa της Ελλάδας και τα 59 φυτικά taxa φύονται μόνο στην ευρύτερη περιοχή των Βαλκανίων [138].

2.1.2 Natura 2000

Το Δίκτυο Natura 2000 αποτελεί ένα Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο περιοχών, οι οποίες φιλοξενούν φυσικούς τύπους οικοτόπων και οικοτόπους ειδών που είναι σημαντικοί σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Αποτελείται από δύο κατηγορίες περιοχών:

- **Τόποι Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ) - Sites of Community Importance (SCI)**
για τους οικοτόπους, όπως ορίζονται στην Οδηγία 92/43/ΕΟΚ «για την προστασία της βιοποικιλότητας μέσω της διατήρησης των φυσικών τύπων οικοτόπων και των ειδών φυτών και ζώων».
- **Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) - Special Protection Areas (SPA)**
για την ορνιθοπανίδα, όπως ορίζονται στην Οδηγία 79/409/ΕΚ «για τη διατήρηση των άγριων πτηνών».

Οι δύο κατηγορίες περιοχών παρουσιάζουν μεταξύ τους επικαλύψεις όσον αφορά τις εκτάσεις τους, συνεπώς το άθροισμα των περιοχών δεν είναι ακριβές, καθώς ορισμένες περιοχές έχουν χαρακτηριστεί τόσο ΤΚΣ όσο και ΖΕΠ. Ως Ειδικές Ζώνες Διατήρησης (ΕΖΔ) ορίζονται οι ΤΚΣ που έχουν μετέπειτα χαρακτηριστεί από τα κράτη μέλη.

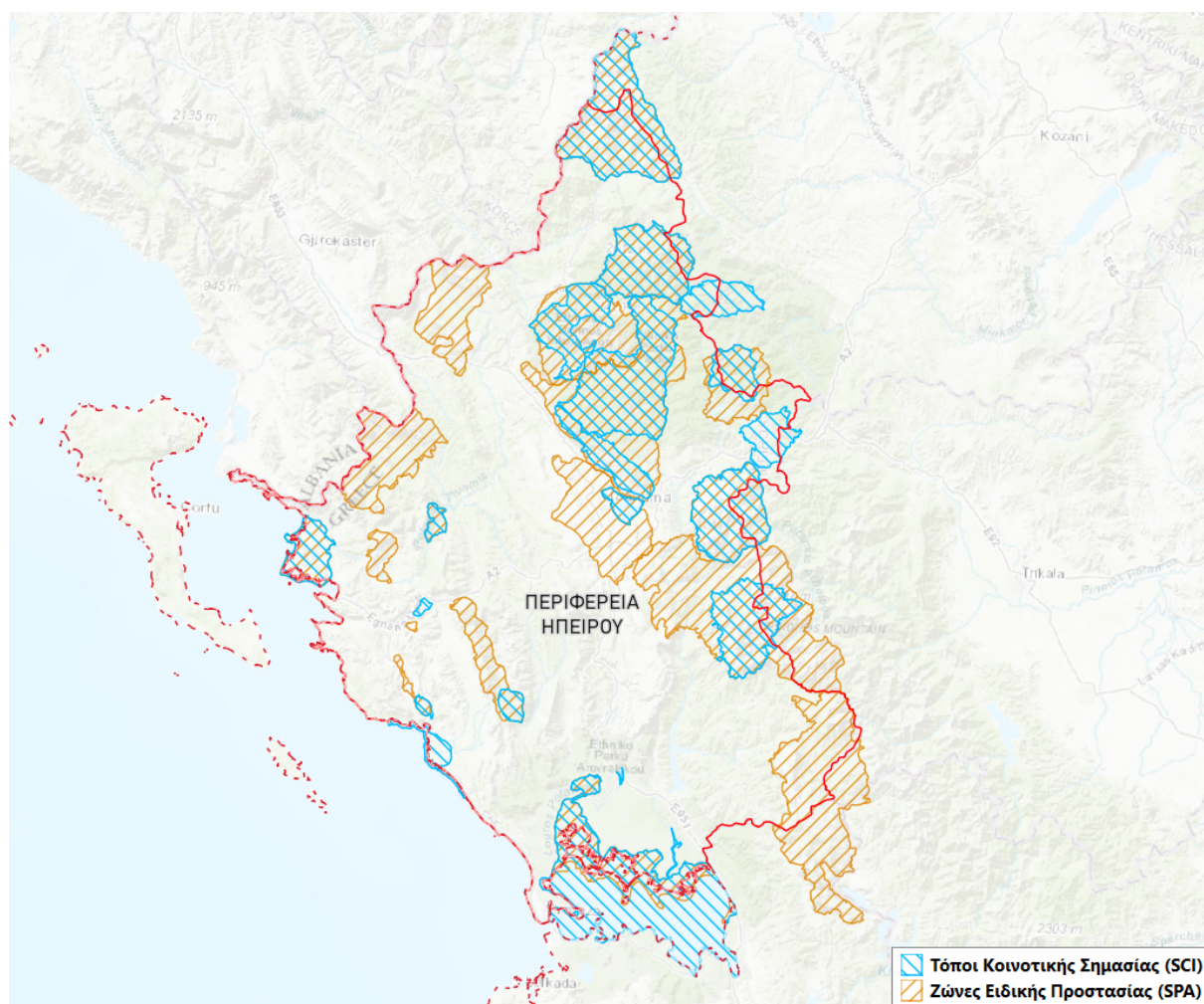
Οι περιοχές Natura 2000 της Περιφέρειας Ηπείρου χαρακτηρίζονται με τον κωδικό «GR21». Καταγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα 2.3 και απεικονίζονται στο Σχ. 2.2. Ως περιοχές Natura χαρακτηρίζονται και οι δύο γνωστοί Εθνικοί Δρυμοί: ο Εθνικός Δρυμός Βίκου-Αώου και ο Εθνικός Δρυμός Πίνδου (Βάλια Κάλντα). Ορισμένες περιοχές Natura ενώ ανήκουν διοικητικά στους Νομούς Καστοριάς και Γρεβενών (Περιφέρεια Δυτ. Μακεδονίας), ένα μεγάλο μέρος τους βρίσκεται γεωγραφικά και εντός της Περιφέρειας Ηπείρου (Σχ. 2.2). Για το λόγο αυτό, θα συμπεριληφθούν στη μελέτη μας. Οι περιοχές αυτές συγκεκριμένα αφορούν τις «Κορυφές Όρους Γράμμος» (SPASCI), «Βασιλίτσα» (SCI), «Εθνικός Δρυμός Πίνδου (Βάλια Κάλντα) - Ευρύτερη Περιοχή» (SCI) και «Βάλια Κάλντα και Τεχνητή Λίμνη Αώου» (SPA), οι οποίες χαρακτηρίζονται με τον κωδικό «GR13».

Όνομασία περιοχής Natura	Κωδικός GR#	Έκταση [ha]
SCI		
Αμβρακικός Κόλπος, Δέλτα Λούρου και Αράχθου (Πέτρα, Μύτικας, Ευρύτερη Περιοχή, Κάτω Ρους Αράχθου, Καμπή Φιλιππιάδας)	2110001	60183.58
Κεντρικό Τμήμα Ζαγορίου	2130004	32949.84
Όρη Αθαμάνων (Νεράιδα)	2110002	18924.71
Εθνικός Δρυμός Βίκου - Αώου	2130001	12964.97

Εκβολές (Δέλτα) Καλαμά	2120001	8626.84
Όρος Μιτσικέλι	2130008	8586.72
Βασιλίτσα	1310001	8046.24
Περιοχή Μετσόβου (Ανίλιο-Κατάρρα)	2130006	7260.76
Εθνικός Δρυμός Πίνδου (Βάλια Κάλντα) - Ευρύτερη Περιοχή	1310003	6728.06
Εκβολές Αχέρωντα (από Γλώσσα έως Αλωνάκι) και Στενά Αχέρωντα	2140001	4527.56
Στενά Καλαμά	2120004	1833.81
Παράκτια Θαλάσσια Ζώνη από Πάργα έως Ακρωτήριο Άγιος Θωμάς (Πρέβεζα), Ακρ. Κελάδιο - Αγ. Θωμάς	2140003	1561.12
Έλος Καλοδίκι	2120002	823.45
Λίμνη Λιμνοπούλα	2120003	564.82
<hr/>		
SPA		
<hr/>		
Ευρύτερη Περιοχή Αθαμανικών Όρεων	2130013	64642.53
Κεντρικό Ζαγόρι και Ανατολικό Τμήμα Όρους Μιτσικέλι	2130011	53421.67
Κοιλάδα Αχελώου και Όρη Βάλτου	2110006	47196.74
Όρος Τύμφη (Γκαμύλα)	2130009	27767.69
Αμβρακικός Κόλπος, Λιμνοθάλασσα Κατάφουρκο και Κορακονήσια	2110004	23195.42
Ευρύτερη Περιοχή Πόλης Ιωαννίνων	2130012	22451.36
Όρη Τσαμαντά, Φιλατών, Φαρμακοβούνι, Μεγάλη Ράχη	2120009	19886.46
Όρος Δούσκων, Ωραιόκαστρο, Δάσος Μερόπης, Κοιλάδα Γκόρμου, Λίμνη Δελβινακίου	2130010	17335.80
Βάλια Κάλντα και Τεχνητή Λίμνη Αώου	1310002	14467.24
Όρη Παραμυθιάς, Στενά Καλαμά και Στενά Αχέρωντα	2120008	11709.90
Υγρότοπος Εκβολών Καλαμά και Νήσος Πρασούδι	2120005	8638.19
Στενά Παρακαλάμου	2120007	3535.17

Έλη Καλοδίκι, Μαργαρίτι, Καρτέρι και Λίμνη Προντάνη	2120006	1797.93
SPASCI		
Κορυφές Όρους Γράμμος	1320002	34039.65
Όρος Λάκμος (Περιστέρι)	2130007	20356.08
Κορυφές Όρους Σμόλικας	2130002	19710.95
Λίμνη Ιωαννίνων (Παμβώτιδα)	2130005	2616.49

Πίνακας 2.3: Περιοχές Natura 2000 που εντοπίζονται γεωγραφικά εντός της Περιφέρειας Ηπείρου, κατά φθίνουσα έκταση.



Σχήμα 2.2: Οι περιοχές Natura 2000 που εντοπίζονται γεωγραφικά εντός της Περιφέρειας Ηπείρου. Στο βορειότερο τμήμα της φαίνεται και η περιοχή «Κορυφές Όρους Γράμμος» (SPASCI).

Βιοποικιλότητα Περιοχών Natura

Οι Τόποι Κοινοτικής Σημασίας (SCI) που δεν επικαλύπτονται από Εθνικά Πάρκα, αφορούν 9 περιοχές οι οποίες περιλαμβάνουν 41 τύπους οικοτόπων της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ και 3 είδη χλωρίδας με βάση το Παράρτημα II της ίδιας οδηγίας, ενώ σε αυτές έχουν καταγραφεί και επιπλέον 75 άλλα σημαντικά είδη χλωρίδας [139]. Οι 12 Ζώνες Ειδικής Προστασίας (SPA) που δεν επικαλύπτονται από Εθνικά Πάρκα, αποτελούν σημαντικές περιοχές για επιδημιακά αρπακτικά πτηνά, υδροβία πουλιά και είδη των αλπικών οικοτόπων, με καταγεγραμμένα 34 μοναδικά είδη ορνιθοπανίδας [140].

2.1.3 Καταφύγια Άγριας Ζωής

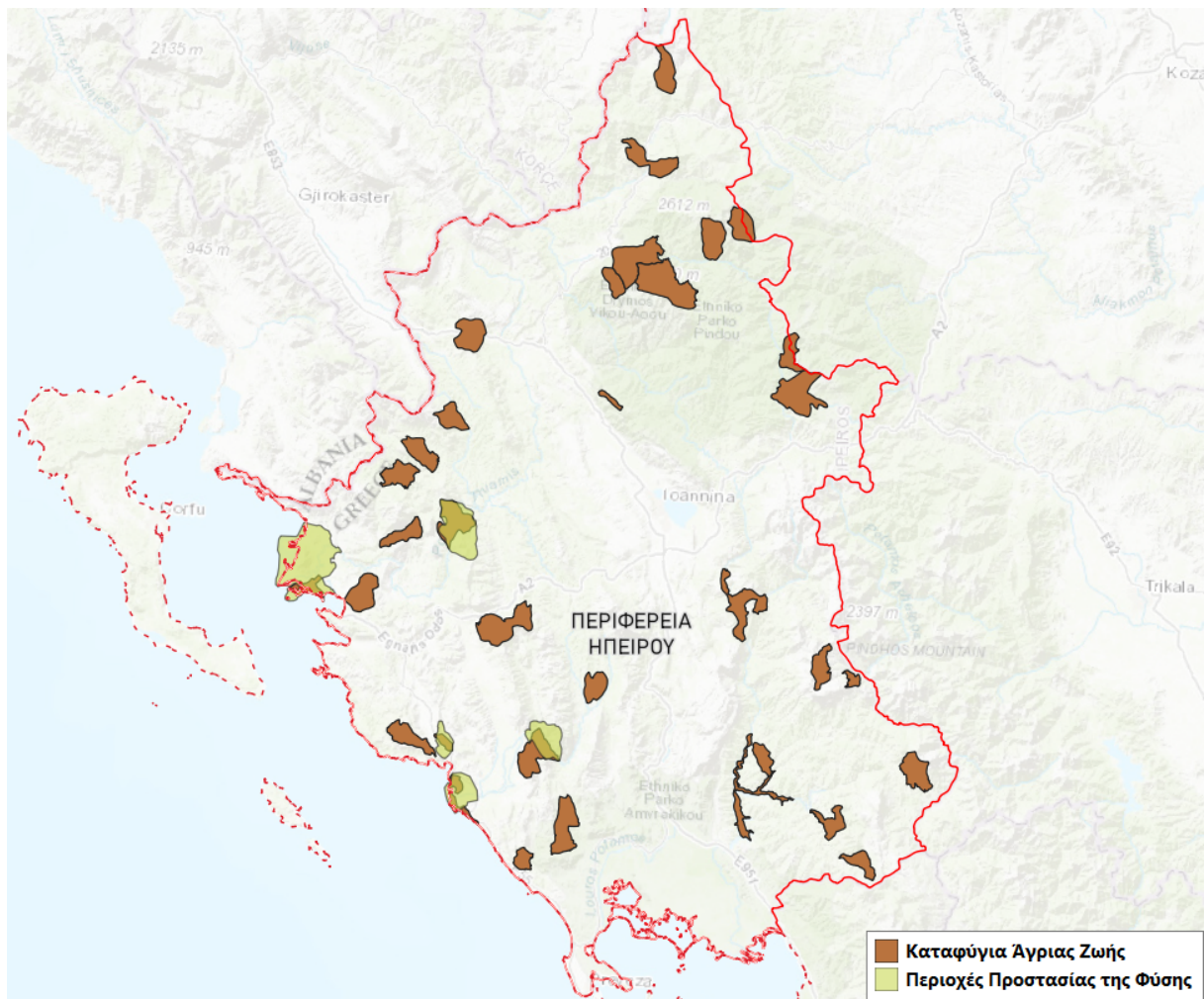
Ως Καταφύγια Άγριας Ζωής (αγγλ. Wildlife refuges) χαρακτηρίζονται σύμφωνα με το Άρθρο 5 του Ν. 3937/2011 «οι φυσικές περιοχές (χερσαίες, υγροτοπικές ή θαλάσσιες), που έχουν ιδιαίτερη σημασία ως σημαντικοί τόποι ανάπτυξης της άγριας χλωρίδας ή ως βιότοποι αναπαραγωγής, διατροφής, διαχείμασης ειδών της άγριας πανίδας, ή ως περιοχές αναπαραγωγής ψαριών και συγκέντρωσης γόνου, ή, τέλος, ως σημαντικοί θαλάσσιοι οικοτόποι». Στις προστατευόμενες περιοχές ΚΑΖ απαγορεύεται η θήρα, η αλιεία, η συλλογή άγριας χλωρίδας και η ρύπανση με κάθε τρόπο, μεταξύ άλλων δραστηριοτήτων. Η εκτέλεση λατομικών ή μεταλλευτικών δραστηριοτήτων και δρόμων επιτρέπεται μόνο ύστερα από τη διάθεση περιβαλλοντικής αδειοδότησης.

Η Περιφέρεια Ηπείρου περιλαμβάνει 34 Καταφύγια Άγριας Ζωής, τα οποία απεικονίζονται στο Σχ. 2.3 και καταγράφονται κατά φθίνουσα έκταση στον Πίνακα 2.4.

Καταφύγια Άγριας Ζωής Περιφέρειας Ηπείρου	Έκταση [ha]
Ηλιοχωρίου - Βρυσοχωρίου Δήμου Τύμφης	4479.37
Χαράδρα Αώου (Κόνιτσας - Ελεύθερου - Πάπιγκου)	3523.53
Μέτσοβο - Χρυσοβίτσα - Γρεβενίτιο	3491.86
Παραμυθιά - Πετούση - Αγία Κυριακή	3321.39
Ευρύτερη Περιοχή Χαράδρας Ποταμού Αράχθου	2722.25
Ζαλόγγου - Αβάσσου Δήμων Λούρου - Ζαλόγγου - Φαναριού	2611.26
Τούρλα - Μουγγίλα - Βορίλλα Δήμων Λούρου Και Φαναριών	2574.74
Ραβενί - Μαλούνι - Πέντε Εκκλησίες	2505.20
Βουρκοπόταμος - Γαναδιό - Πύργος - Πυρσόγιαννης	2202.63
Βαράθι (Μαυρουδίου - Νέας Σελευκείας - Ηγουμενίτσας)	2131.35

Προσίλιο - Ρόνιτσα (Δελβινακίου)	2089.53
Πάδες	2076.23
Μεσούντας - Πηγών Ελάτης	2001.38
Ζυγός (Μακρυσιάδας - Κάτω Καλεντίνης)	1937.91
Αετομπλίτσα	1800.97
Κρασιά - Μετζεβελιός Δήμου Πάργας	1766.35
Βάλια Κύρνα (Σαμαρίνας)	1710.36
Αγίων Πάντων, Πλατάνου, Κοκκινολιθαιού, Αγίου Νικολάου, Κάτω Ξέ- χωρου, Κεραμίτσας, Κρυονερίου Δήμου Φιλιατών	1709.71
Αμπελώνας, Βαβουρίου, Μπλέας Δήμου Φιλιατών	1673.78
Ανατολικά Τζουμέρκα Κοινότητας Θεοδωριάνων Δήμου Αθαμανίας	1449.34
Κουπάκια (Ελάφου - Άρδοσης - Ρωμανού - Δερβιζιάνων)	1403.34
Παναγιά Κουρούζα - Μακραλέξη (Λάβδανης - Αγίας Μαρίνας)	1377.15
Προφήτης Ηλίας, Βρυσούλες, Στεφάνωμα Δάφνης Δήμου Φιλιατών	1376.08
Φλαμπουράριο - Βοβούσα	1324.49
Ιερά Μονή Ροβέλιστας Δήμου Γεωργίου Καραϊσκάκη	1303.52
Κλειδιού - Σκουληκκαριάς Γαβρόγου και Τσουμένου Δήμου Γεωργίου Κα- ραϊσκάκη	1127.74
Πάπιγκο	1059.15
Ανεμοράχη - Διστράτου Δήμου Αθαμανίας	1016.13
Βάτατσα - Διβάρι - Όρμος Βάλτου - Δρέπανο Δήμου Ηγουμενίτσας	959.27
Αμμουδιά - Βαλανιδοράχη - Λούτσα (πρώην Δήμου Φαναρίου)	898.64
Λεκατσά Δήμου Ζαλόγγου	793.71
Αθαμάνιου - Θεοδώριανων	439.46
Βάλτος Καλοδικίου	397.08
Άγιος Αθανάσιος - Σιπίτουρα (Ασπραγγέλων - Ελάτης)	333.35

Πίνακας 2.4: Καταφύγια Άγριας Ζωής Περιφέρειας Ηπείρου κατά φθίνουσα έκταση.



Σχήμα 2.3: Τα Καταφύγια Άγριας Ζωής και οι Περιοχές Προστασίας της Φύσης της Περιφέρειας Ηπείρου. Διακρίνονται οι μερικές επικαλύψεις.

Βιοποικιλότητα Καταφύγιων Άγριας Ζωής

Πέρα από τα πολλά κοινά είδη θηλαστικών και πτηνών που φιλοξενούνται στα Καταφύγια Άγριας Ζωής (όπως αγριογούρουνο, αλεπού, αρκούδα, λύκος, ζαρκάδι, φάσα, κότσυφας, ορεινή πέρδικα, γερακίνα και κίσσα), εντοπίζεται και μοναδική βιοποικιλότητα. Χαρακτηριστικά, σύμφωνα με τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στα γεωχωρικά δεδομένα, μόνο στην περιοχή «Βάτασα - Διβάρι - Όρμος Βάλτου - Δρέπανο Δήμου Ηγουμενίτσας» δραστηριοποιούνται 60 είδη πτηνών, 80 είδη μεταναστευτικών πτηνών, 1 είδος θηλαστικών, 6 είδη ερπετών, 1 είδος αμφιβίων ερπετών, 6 είδη ψαριών, 6 είδη ασπόνδυλων αλλά και εντοπίζονται 35 σημαντικά είδη χλωρίδας.

2.1.4 Περιοχές Προστασίας της Φύσης

Σύμφωνα με το Άρθρο 5 Ν. 3937/2011, ως «Περιοχές Προστασίας της Φύσης» (αγγλ. Nature Reserves) χαρακτηρίζονται εκτάσεις μεγάλης οικολογικής ή βιολογικής αξίας, στις οποίες «προστατεύεται το φυσικό περιβάλλον από κάθε δραστηριότητα ή επέμβαση που μπορεί να μεταβάλει ή να αλλοιώσει τη φυσική κατάσταση, σύνθεση ή εξέλιξή του». Στην Περιφέρεια Ηπείρου εντοπίζεται ένα σύνολο από Περιοχές Προστασίας της Φύσης με κοινή ονομασία «Στενά και Εκβολές Αχέρωντα και Καλαμά και Έλους Καλοδικίου και Περιφερειακή Ζώνη», συνολικής έκτασης 19030 ha, η οποία επικαλύπτεται σημαντικά με τις περιοχές Natura αντίστοιχων ονομασιών (Σχ. 2.3).

Βιοποικιλότητα Περιοχών Προστασίας της Φύσης

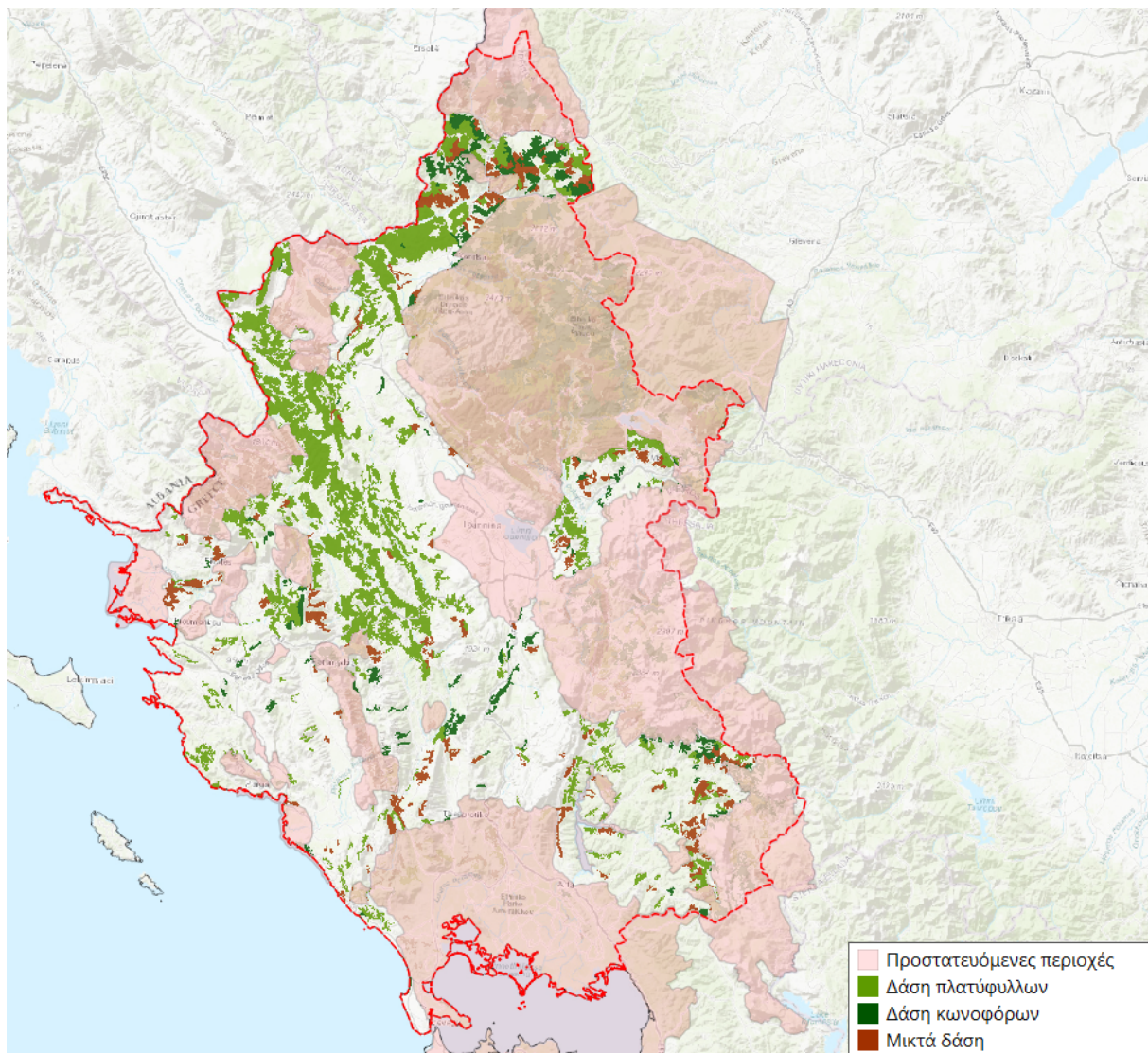
Η συγκεκριμένη περιοχή αποτελεί ένα από τα πλουσιότερα ευρωπαϊκά συμπλέγματα υγρότοπων διεθνούς σημασίας, στο οποίο ενδημούν και αναπαράγονται πολλά και σημαντικά είδη χλωρίδας και πανίδας. Η περιοχή είναι παγκόσμιας ορνιθολογικής σημασίας, διότι αποτελεί σημαντικό χώρο διαχείμασης για αρκετά πτηνά ενώ βρίσκεται στο Κεντρικό Μεσογειακό μεταναστευτικό διάδρομο της παγκόσμιας ορνιθοπανίδας. Στην άμεση και ευρύτερη περιοχή απαντώνται περίπου 390 είδη πτηνών και σημαντικά είδη θηλαστικών, όπως ο μυοκάστορας, η βίδα, ο λαγόγυρος, ο λύκος κ.ά.

2.2 Λοιπές Περιοχές Βλάστησης

Υποθέτουμε, για τους σκοπούς της παρούσας ανάλυσης, ότι το μεγαλύτερο μέρος της σημαντικότερης βιοποικιλότητας σε μια χώρα βρίσκεται στις προστατευόμενες περιοχές, αν και κατανοούμε ότι αυτό δεν συμβαίνει πάντα. Εξετάζουμε επομένως και λοιπές περιοχές βλάστησης που μπορεί να επηρεάζονται από την οικολογική φωτορύπανση.

Για τον εντοπισμό περαιτέρω περιοχών βλάστησης στην Περιφέρεια Ηπείρου χρησιμοποιούμε τη βάση δεδομένων χρήσεων γης «Corine Land Cover 2018», η οποία παρέχεται από την υπηρεσία Land Monitoring Service στο πλαίσιο του προγράμματος Copernicus του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος. Περιλαμβάνει κατηγοριοποιημένα γεωχωρικά δεδομένα χρήσεων γης σε μορφή raster χωρικής ανάλυσης 100×100 m, ανάλυση επαρκής για τα δεδομένα που θα εξάγουμε στο Κεφ. 4. Θεωρώντας ότι η εντονότερη βιοποικιλότητα εντοπίζεται σε ένα δάσος, επιλέξαμε πέρα από τις προστατευόμενες περιοχές τις λοιπές δασικές εκτάσεις της περιφέρειας, οι οποίες αντιπροσωπεύονται με τις κατηγορίες:

- 311: Δάση πλατύφυλλων
- 312: Δάση κωνοφόρων
- 313: Μικτά δάση



Σχήμα 2.4: Οι χρήσεις γης του Corine Land Cover στην Περιφέρεια Ηπείρου για το έτος 2018, μόνο για τις κατηγορίες 311, 312, 313 (δασικές εκτάσεις) που δε συμπίπτουν με προστατευόμενες περιοχές.

Παρατηρούμε ότι στην περιφέρεια πράγματι υπάρχει μεγάλη έκταση δασών (περίπου 111369 ha) η οποία δεν περιλαμβάνεται σε κάποια προστατευόμενη περιοχή (Σχ. 2.4). Συνεπώς, είναι αναγκαίο να ληφθεί υπ' όψιν στην καταγραφή των οικοσυστημάτων της περιφέρειας για την εκτίμηση της επιρροής της οικολογικής φωτορύπανσης.

Κεφάλαιο 3

Μοντελοποίηση Ανθρωπογενούς Φωτεινότητας Ουρανού

Ένα αρχικό απλοποιημένο μοντέλο διάδοσης και σκέδασης του φωτός στην ατμόσφαιρα είχε αναπτυχθεί από τον Treanor [141]. Λίγα χρόνια αργότερα ο Walker [142] ανέπτυξε μια σχέση μεταξύ της φωτεινότητας και της απόστασης, κάνοντας χρήση μιας ελεγχόμενης πηγής φωτός και λαμβάνοντας μετρήσεις της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού σε ολοένα αυξανόμενες αποστάσεις. Η καλύτερη συσχέτιση με τα δεδομένα προέκυψε υψώνοντας την απόσταση στον εκθέτη -2.5 , σχέση η οποία αποτελεί το «νόμο του Walker».

Οι Cinzano και Falchi [143] πρότειναν έναν «γενικευμένο νόμο του Walker», όπου B_0 είναι η λαμπρότητα του νυχτερινού ουρανού κοντά στην πηγή και d είναι η απόσταση σε km του παρατηρητή από την πηγή:

$$B = B_0 d^{-\alpha} \quad (3.1)$$

με τον εκθέτη α να δίνεται μέσω μιας αλγεβρικής έκφρασης ως συνάρτηση της απόστασης σε km (Εξ. (3.2)), δίνοντας τιμές μεταξύ 2.3 και 3.0 για αποστάσεις από 3 έως 100 km αντίστοιχα, και θεωρώντας ατμοσφαιρική καθαρότητα $K=1.0$ (παράμετρος που θα αναλυθεί στην παράγραφο 3.1).

$$\alpha = 2.3 \left(1 + \frac{d}{1000} \right) \quad (3.2)$$

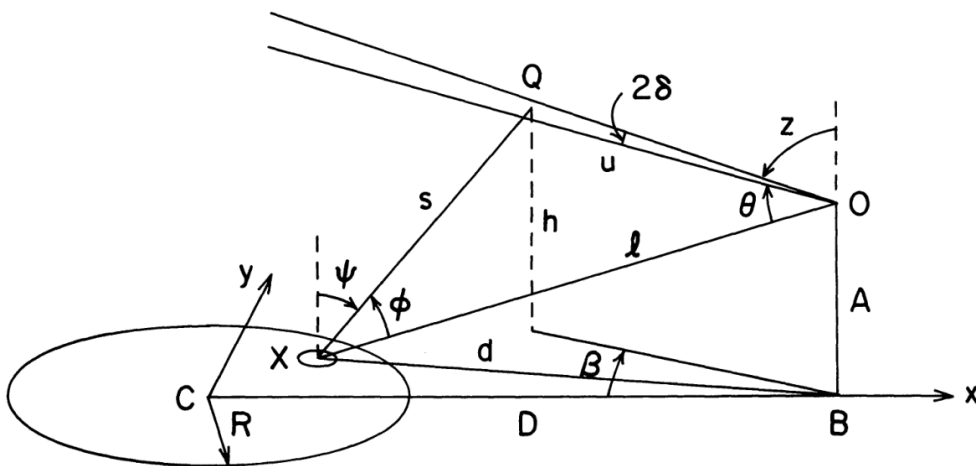
Διάφορα αναλυτικά μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσουν την εκθετική εξάρτηση της φωτεινότητας από την απόσταση στο νόμο του Walker. Ο Garstang στο μοντέλο που λαμβάνει υπ' όψιν και την καμπυλότητα της Γης [144], προβλέπει μια εκθετική εξάρτηση από την απόσταση, η οποία λαμβάνει τιμές από -1.9 έως -4.5 για τις ίδιες αποστάσεις με προηγουμένως. Οι μελέτες αυτές έβαλαν τα θεμέλια για την κατασκευή του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

3.1 Αναλυτικό Μοντέλο Garstang

Ένα από τα πρώτα μοντέλα για την ποσοτικοποίηση του ανθρωπογενούς φωτισμού του νυχτερινού ουρανού κατασκευάστηκε από τον Roy Garstang [144–146]. Το μονοχρωματικό μοντέλο του Garstang προβλέπει την ακριβή φωτεινότητα για οποιοδήποτε σημείο του ουρανού από οποιονδήποτε αριθμό πηγών φωτός, όπως φαίνεται σε έναν παρατηρητή στη Γη, υπολογίζοντας την ποσότητα της φωτεινής ακτινοβολίας που αφαιρείται λόγω εξασθένισης και που προστίθεται λόγω σκέδασης κατά μήκος μιας διεύθυνσης.

3.1.1 Διάδοση Φωτεινών Ακτίνων

Στο μοντέλο Garstang λαμβάνεται υπ' όψιν η σκέδαση πρώτου και δεύτερου βαθμού, μέσω τροποποίησης του απλουστευμένου μοντέλου του Treanor [141] για τη διάδοση και σκέδαση του φωτός στην ατμόσφαιρα, ενώ σκεδάσεις μεγαλύτερων βαθμών παραλείπονται. Επιπλέον γίνεται η υπόθεση ότι οι καθοδικές ακτίνες φωτός δεν αλληλεπιδρούν με την ατμόσφαιρα είτε μέσω σκέδασης είτε απορρόφησης, ενώ το ίδιο ισχύει και ύστερα από την ανάκλασή τους από το έδαφος.



Σχήμα 3.1: Σκέδαση φωτός από μια πόλη στο μοντέλο του Garstang. Το φως εκπέμπεται από μια μικρή περιοχή X, σκεδάζεται στο σημείο Q και λαμβάνεται από τον παρατηρητή O. Το Q βρίσκεται σε ύψος h από το επίπεδο της πόλης και έχει αζιμούθιο β, ενώ z είναι η ζενιθιακή γωνία της παρατήρησης. Ο παρατηρητής λαμβάνει φως από έναν κώνο στερεάς γωνίας 2δ γύρω από το QO. Απόδοση από [145, Σχ. 1].

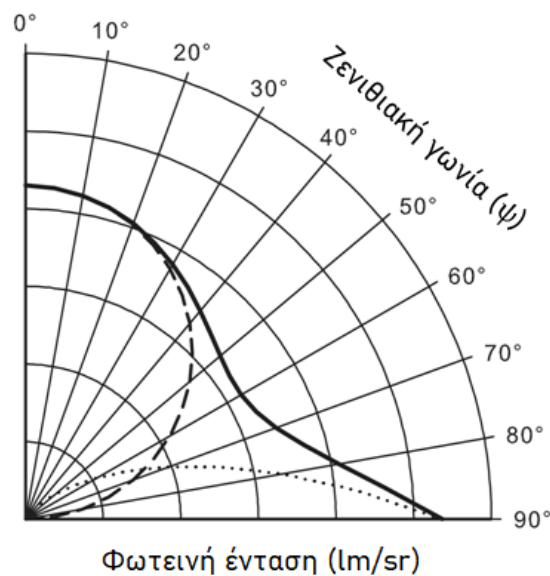
3.1.2 Σύνθεση Ατμόσφαιρας

Στο μοντέλο η ατμόσφαιρα αφορά σύνθεση δύο συστατικών: αερολύματα και μόρια. Το καθένα από αυτά τα συστατικά ορίζεται από μια πυκνότητα N σε ύψος h πάνω από το έδαφος και μια ενεργό διατομή σκέδασης σ . Η συνεισφορά των αερολυμάτων εκφράζεται στο μοντέλο του Garstang μέσω της παραμέτρου K που ορίζεται από τη σχέση [145,

Εξ. (4)], η οποία αφορά την αναλογία του γινομένου $N_{\alpha}\sigma_{\alpha}$ των αερολυμάτων προς το $N_m\sigma_R$ των μορίων στο έδαφος και στο κέντρο του αστρονομικού V καναλιού (550 nm) του φωτομετρικού συστήματος UBVR_I (Johnson-Cousins). Η παράμετρος K εκφράζει λοιπόν την αναλογία της σκέδασης του φωτός λόγω αερολυμάτων (σκέδαση Mie) προς τη μοριακή σκέδαση (σκέδαση Rayleigh), δηλαδή την ατμοσφαιρική εξασθένιση και επομένως την ατμοσφαιρική διαφάνεια. Η τιμή K=1 αντιστοιχεί σε αναλογία αερολυμάτων προς μορίων 11:1, δηλαδή σε σκέδαση λόγω αερολυμάτων από σχετικά καθαρό αέρα [14, Πίν. 6, σελ. 14-14], ενώ το K=0.5 αντιπροσωπεύει σχετικά καθαρούς ουρανούς.

3.1.3 Ανοδικές Εκπομπές Φωτός

Γίνεται η υπόθεση ότι ένα ποσοστό του φωτός που παράγεται από την πόλη εκπέμπεται απευθείας προς τον ουρανό σε γωνίες άνω του οριζώντιου επιπέδου ($\psi > 90^\circ$), ενώ το υπόλοιπο εκπέμπεται προς το έδαφος. Το φως λοιπόν που τελικά διαδίδεται προς τα πάνω αποτελείται από δύο συνιστώσες: ανοδικό φως που διαδίδεται απευθείας από ελλειπώς θωρακισμένα φωτιστικά σώματα (εστιγμένη γραμμή στο Σχ. 3.2), και φως που ανακλάται προς τα πάνω από φωτιζόμενες επιφάνειες (διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 3.2).



Σχήμα 3.2: Η γωνιακή κατανομή έντασης της ανοδικά εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του μοντέλου Garstang. Αποτελείται από μια Λαμπερτιανή συνιστώσα που παράγεται από σχετική ροή 0.90 ανακλώμενη από οριζόντια επιφάνεια ανακλαστικότητας 15% (διακεκομμένη γραμμή), και μια άμεση ανοδική συνιστώσα με σχετική ροή 0.10 και ένταση ανάλογη του ψ^4 (εστιγμένη γραμμή). Η συμπαγής γραμμή είναι το άθροισμα των δύο. Απόδοση από [119, Σχ. 5].

Οι γωνιακές κατανομές των συνιστωσών αυτών ορίζονται από τον Garstang στην [145, Εξ. (1)], υποθέτοντας ότι η έμμεσα ανοδική συνιστώσα ανακλάται από μια ομαλή επίπεδη (Λαμπερτιανή) επιφάνεια μέσης ανακλαστικότητας $G=0.15$, ενώ η άμεσα ανοδική συνιστώσα $F=0.10$. Ερευνητές της φωτορύπανσης ξεκινώντας με τον Garstang, βρήκαν την τιμή 0.10 ως αντιπροσωπευτική μιας μέσης τιμής για το ποσοστό φως που διαδίδεται απευθείας προς τα πάνω από φωτιστικά που χρησιμοποιούνται για υπαίθριο φωτισμό [119]. Σε ένα ιδανικά θωρακισμένο φωτιστικό σώμα χωρίς απευθείας ανοδικές εκπομπές η παράμετρος $F=0$.

3.1.4 Βασική Σχέση Μοντέλου

Η παραπάνω ανάλυση συνθέτει τη βασική σχέση υπολογισμού φωτεινότητας του μοντέλου [145, Εξ. (17)]:

$$\begin{aligned}
 b = & \pi N_m \sigma_R \exp(-cH) \iint (dxdy/\pi R^2) \int_0^\infty du \\
 & \times I_{up} s^{-2} (EF)_{XQ} (EF)_{QO} (DS) \\
 & \times \{ \exp(-ch) 3(1 + \cos^2[\theta + \phi]) / (16\pi) \\
 & + \exp(-\alpha h) 11.11 K f(\theta + \phi) \}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

όπου

I_{up} η ολική ανοδική ένταση ακτινοβολίας από έναν πληθυσμό στην κατεύθυνση ψ σε lm sr^{-1} [145, Εξ. (1)] που ολοκληρώνεται στην έκταση $dxdy$ της πόλης,

$c = 0.104 \text{ km}^{-2}$ ο εκθέτης που ορίζει την εκθετική κατανομή των μορίων,

α ο εκθέτης που ορίζει την εκθετική κατανομή των αερολυμάτων ως παραμετροποίηση του K [145, Εξ. (2)],

$N_m = 2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ η πυκνότητα των μορίων στην επιφάνεια της θάλασσας ($H=0$),

$\sigma_R = 4.6 \times 10^{-27} \text{ cm}^2$ η ενεργός διατομή των μορίων στα 550 nm,

$f(\theta + \phi)$ η συνάρτηση που ορίζει τη σκέδαση λόγω αερολυμάτων [145, Εξ. (3)],

K η παράμετρος που ορίζει τη συνεισφορά των αερολυμάτων [145, Εξ. (4)],

(DS) ο παράγοντας διπλής σκέδασης [145, Εξ. (5)],

$(EF)_{XQ}$ και $(EF)_{QO}$ οι παράγοντες ατμοσφαιρικής εξασθένισης για τις διευθύνσεις XQ και QO αντίστοιχα [145, Εξ. (6)],

h, u, s και θ, ϕ ορίζονται όπως στο Σχ. 3.1 [145, Εξ. (8)-(14)].

Μία βελτιωμένη έκδοση του μοντέλου Garstang χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του «The New World Atlas of Artificial Night Sky Brightness» [22], ενός παγκόσμιου χάρτη που απεικονίζει την τεχνητή φωτεινότητα ουρανού ως λόγο στο φυσικό υπόβαθρο των $174 \mu\text{cd m}^{-2}$, ο οποίος βαθμονομήθηκε με χιλιάδες επίγειες παρατηρήσεις αρκετών ετών.

3.1.5 Τροποποίηση για Ανώμαλη Επιφάνεια

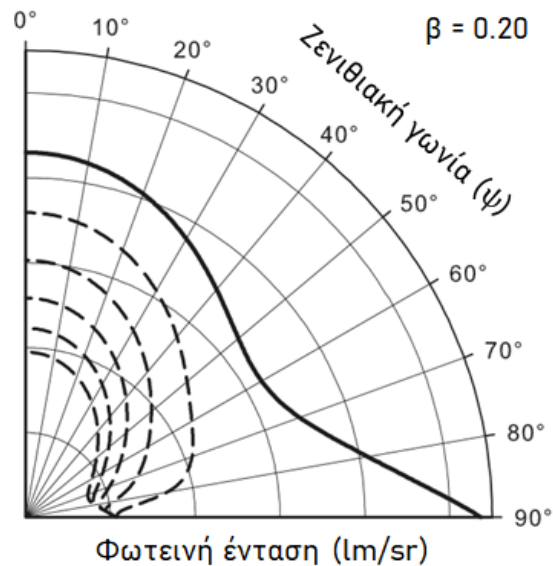
Όπως αναφέρουν οι Luginbuhl et al. [119], στο μοντέλο που ανέπτυξε ο Garstang πραγματοποιείται η υπόθεση μιας τοπικά ομαλής Γης: οι ακτίνες φωτός που προσπίπτουν σε μη οριζόντιες επιφάνειες οδηγούν σε ένα αποτέλεσμα που μειώνει αποτελεσματικά τη μέση λευκαύγεια, ανεξάρτητα από την πραγματική μέση ανακλαστικότητα των επιφανειών και συνεπώς μεταβάλλοντας τη γωνιακή κατανομή των ακτίνων που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα. Για μια επίπεδη οριζόντια επιφάνεια μέσης ανακλαστικότητας 15% όπως υποθέτει ο Garstang, τότε 15% της φωτεινής ροής που προσπίπτει στην επιφάνεια θα ανακλάται προς τα πάνω στον ουρανό. Στην περίπτωση όμως που ένα μέρος του εκπεμπόμενου φωτός προσπίπτει σε μια κάθετη προς το έδαφος επιφάνεια (όπως η πλευρά ενός κτιρίου), τότε (υποθέτοντας πως η επιφάνεια είναι Λαμπερτιανή) μόνο το 50% της ακτινοβολίας θα ανακλαστεί προς τα πάνω, ενώ το υπόλοιπο 50% θα υποστεί τουλάχιστον άλλη μία σκέδαση πριν ανακλαστεί προς τα πάνω, μειώνοντας εξαιρετικά την έντασή της. Σε περιβάλλοντα έντονης δόμησης ή πυκνής βλάστησης, το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε περαιτέρω ουσιαστική μείωση της λευκαύγειας και επηρεάζει περισσότερο τις ακτίνες με πιο οριζόντιες κατευθύνσεις ($67.5^\circ < \psi < 90^\circ$).

Το μοντέλο του Garstang τροποποιήθηκε από τους Luginbuhl et al. [119] ώστε σε αυτό να εισάγεται η επιρροή των αντικειμένων κοντά στο έδαφος (βλάστηση, κτίρια) στην παρεμπόδιση των ακτίνων φωτός, εξελίσσοντας την αρχική παραδοχή του Garstang για μια ομαλή Γη. Η τροποποίηση αυτή αφορά ουσιαστικά τη διόρθωση της Λαμπερτιανής συνιστώσας του απλού μοντέλου Garstang (βλ. Σχ. 3.3) μέσω των παραμέτρων E_b και β :

$$I_{ge} = \frac{I_{up}}{LP} \{ \beta + (1 - \beta) 10^{-\{0.4E_b \sec(\psi)\}} \} \quad (3.4)$$

όπου LP η ολική εκπομπή φωτός ενός πληθυσμού σε lumens.

Η παράμετρος E_b εκφράζει σε magnitudes την εξασθένιση της ακτινοβολίας στο ζενίθ λόγω «παρεμπόδισης» (μη λαμβάνοντας υπ' όψιν την υψομετρική διαφορά μεταξύ εδάφους και φωτεινής πηγής, θεωρώντας μια καθολική τιμή E_b για όλες τις φωτεινές ακτίνες). Η παράμετρος β εκφράζει ένα «ανεμπόδιστο» κλάσμα της φωτεινής ροής που δεν υφίσταται εξασθένιση. Θεωρώντας $E_b = \beta = 0$ το μοντέλο συμπίπτει με το μη τροποποιημένο μοντέλο Garstang.



Σχήμα 3.3: Η επιρροή της παρεμπόδισης στη γωνιακή κατανομή έντασης των ανοδικών εκπομπών φωτός. Οι διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν τη Λαμπερτιανή συνιστώσα για $\beta = 0.20$ και διάφορες τιμές E_b : 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 και 1.25. Η συμπαγής γραμμή αφορά την ολική ένταση του απλού μοντέλου Garstang. Απόδοση από [119, Σχ. 8].

3.2 Μοντέλο SALR

Το μοντέλο SALR (Simplified All-sky Average Light Pollution Ratio) αναπτύχθηκε από τους Duriscoe et al. [117] για την ευκολότερη εκτίμηση της συνολικής ποιότητας του ουρανού σε μια περιοχή, με στόχο την ενδεχόμενη χρήση της ως μέτρο της οικολογικής φωτορύπανσης. Αφορά ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει την ολική τεχνητή λαμπρότητα ουρανού θόλου μέσω της παραμέτρου ALR, η οποία είναι η καταλληλότερη για την εκτίμηση «επίγειας» φωτορύπανσης διότι λαμβάνει υπ' όψιν τη συνεισφορά όλου του ημισφαιρικού ουρανού θόλου, και όχι μόνο μιας μικρής περιοχής στο ζενίθ. Το μοντέλο αποτελείται από μια απλή αναλυτική σχέση και έχει επιβεβαιωθεί από τους συγγραφείς για ένα μεγάλο εύρος αποστάσεων, κάνοντας χρήση επιτόπιων μετρήσεων της τεχνητής φωτεινότητας ουρανού κάτω από καθαρή ατμόσφαιρα. Γίνεται χρήση δορυφορικών απεικονίσεων για την απόκτηση δεδομένων ροής ανοδικών εκπομπών ακτινοβολίας, και μιας εμπειρικής συνάρτησης διασποράς σημείου (Point Spread Function - PSF) για την εύρεση των περιοχών που έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη φωτορύπανση της μελετούμενης περιοχής. Στο μοντέλο δεν λαμβάνονται υπ' όψιν φαινόμενα σκίασης λόγω ανώμαλου εδάφους και των εγγενών σε αυτό υπομετρικών διαφορών, ένας περιορισμός που ενδέχεται να έχει μη αμελητέα επίδραση στη ζενιθιακή φωτεινότητα του ουρανού ιδιαίτερα σε ορεινές περιοχές [4, 147], η οποία αναμένεται να είναι μικρότερη της προβλεπόμενης από μοντέλα διάδοσης φωτός ομοιόμορφης ανύψωσης σαν το παρόν. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει ορισμένες επιπλέον παραδοχές (οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο 3.2.3) και αποτελεί μια ημι-εμπειρική προσέγγιση.

3.2.1 Αναλυτική Διαδικασία

Για μια δεδομένη ανοδική ακτινοβολία r_i κάθε περιοχής που αναπαρίσταται από ένα κελί του raster, με d_i η απόσταση του παρατηρητή από το κέντρο του κελιού, με n κελιά εντός μιας περιοχής επιρροής, και ο εκθέτης α συνάρτηση της απόστασης d , τότε η σχέση για το ALR ορίζεται ως:

$$ALR = c \sum_{i=1}^n r_i d_i^{-\alpha}, \quad (3.5)$$

όπου c η σταθερά που βαθμονομεί τα σταθμισμένα αθροίσματα της ανοδικής ακτινοβολίας με τις επιτόπιες μετρήσεις του ALR.

Παραθέτονται αναλυτικά τα βήματα για την εξαγωγή του χάρτη ALR:

A. Εξαγωγή σχέσης φωτεινότητας-απόστασης

1. Πραγματοποιήθηκε εισαγωγή τηλεπισκοπικών δορυφορικών δεδομένων του αισθητήρα VIIRS-DNB (μηνιαίο σύνθετο χωρίς νεφοκάλυψη) στο τροποποιημένο αναλυτικό μοντέλο Garstang για την πρόβλεψη της ολικής λαμπρότητας του ουράνιου θόλου σε αποστάσεις μεταξύ 20 και 300 km από το κέντρο του Las Vegas.
2. Τα παραγόμενα δεδομένα συσχετίστηκαν με υπάρχουσες επιτόπιες μετρήσεις CCD της U.S. National Park Service, οδηγώντας μετά από πολλές προσαρμογές στην εξαγωγή μιας αλγεβρικής έκφρασης $\alpha = \alpha(d)$ για την PSF.

B. Έλεγχος εγκυρότητας σχέσης φωτεινότητας-απόστασης

1. Η παραγόμενη σχέση $\alpha = \alpha(d)$ (Εξ. (3.6)) στη συνέχεια εισήχθη σε περιβάλλον GIS για τον υπολογισμό του ALR σε 24 τοποθεσίες των νοτιοδυτικών ΗΠΑ, μέσω της Εξ. (3.5), αθροίζοντας τη συνεισφορά κάθε γειτονικού pixel ξεχωριστά.
2. Οι εξαχθείσες τιμές του ALR συσχετίστηκαν γραμμικά με in-situ μετρήσεις των 24 τοποθεσιών (κάτω από καθαρή ατμόσφαιρα, τα μεσάνυχτα), μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, δίνοντας συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.9889$.

Γ. Κατασκευή χάρτη ALR

Η σταθερά βαθμονόμησης c που προέκυψε χρησιμοποιήθηκε τελικώς για τη βαθμονόμηση των τιμών του ALR που συνθέτουν τον χάρτη ολικής τεχνητής λαμπρότητας του ουράνιου θόλου των ΗΠΑ. Λόγω του μεγέθους του χάρτη η συνεισφορά των γειτονικών περιοχών παράχθηκε ανά περιοχές από έναν αλγόριθμο άθροισης γειτονικών δακτυλίων στο λογισμικό ESRI™ ArcGIS.

Η δισδιάστατη συνάρτηση PSF του ALR για μια καθαρή ατμόσφαιρα (με οριζόντια ορατότητα 65 km [145, Εξ. (22)]) που υπολογίζεται από τους συγγραφείς στο βήμα A είναι περιστροφικά συμμετρική και εξαρτάται μόνο από την απόσταση. Από το μοντέλο εξάγεται η τεχνητή φωτεινότητα νυχτερινού ουρανού, αθροισμένη κατά μέσο όρο στο ημισφαίριο θέασης πάνω από τον παρατηρητή, σε μονάδες της τιμής αναφοράς τυπικής φωτεινότητας υποβάθρου $250 \mu\text{cd m}^{-2}$.

Η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των υπολογιστικών και in-situ τιμών του ALR για τις 24 τοποθεσίες χαρακτηρίστηκε από κλίση $c = 562.72$ (συντελεστής βαθμονόμησης), ενώ η καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα του μοντέλου Garstang και των μετρήσεων CCD της NPS δόθηκε από τη συνάρτηση ([117, Εξ. (11)]):

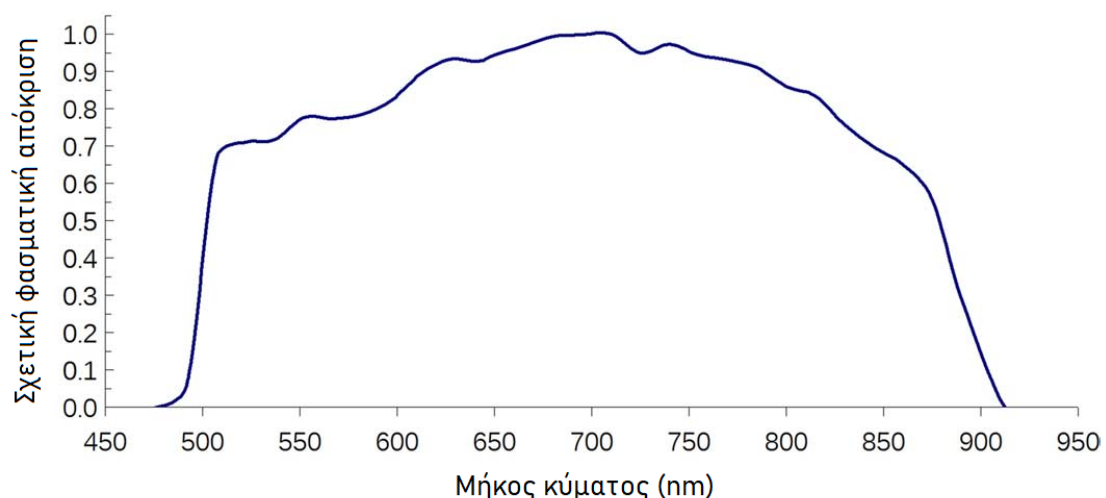
$$\alpha = 2.3((d/350)^{0.28}) \quad (3.6)$$

Οι σχέσεις αυτές μπορούν να εισαχθούν σε περιβάλλον GIS για τον υπολογισμό των τιμών ALR είτε για μεμονωμένες τοποθεσίες είτε για περιοχές μεγάλων εκτάσεων.

3.2.2 Πηγή Δεδομένων

Για τη χρήση του μοντέλου SALR απαιτούνται δεδομένα ανοδικής ακτινοβολίας. Τα πλέον κατάλληλα είναι τα δεδομένα χαμηλού φωτισμού VIIRS Nighttime Lights [148] από τον αισθητήρα VIIRS-DNB (Infrared Imaging Radiometer Suite Day-Night Band) του δορυφόρου Suomi National Polar-orbiting Partnership (NPP) της NASA.

Ο DNB παρέχει τις πρώτες παγκόσμιες βαθμονομημένες νυχτερινές μετρήσεις ακτινοβολίας σε φασματικό εύρος 500 έως 900 nm, δηλαδή στο ορατό φάσμα αλλά και στη φασματική περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας πέρα από το εύρος του ανθρώπινου ματιού (Σχ. 3.4).



Σχήμα 3.4: Φασματική απόκριση αισθητήρα VIIRS-DNB. Απόδοση από [22, Σχ. 15].

Ο αισθητήρας DNB επιτυγχάνει παγκόσμια νυχτερινή κάλυψη με πλάτος σάρωσης περίπου 3000 km και χωρική ανάλυση 742 m [149], έχοντας πολύ καλύτερη ραδιομετρική ευαισθησία σε σχέση με τους αισθητήρες Defense Meteorological Satellite Program Operational Linescan System (DMSP-OLS) [150]. Η βελτιωμένη αυτή χωρική ανάλυση επιτρέπει τη μελέτη των μεταβολών φωτισμού σε τοπικό επίπεδο, δηλαδή σε μικρότερες κλίμακες από την κλίμακα μεγάλων πόλεων ή χωρών [151]. Τα δεδομένα ανοδικής ακτινοβολίας του DNB δίνονται σε μονάδες $W\ cm^{-2}\ sr^{-1}$.

Με τη συλλογή των απεικονίσεων VIIRS-DNB παρέχονται ελεύθερα προς χρήση βαθμονομημένα δεδομένα για όλη την υδρόγειο από το 2013 μέχρι σήμερα, σε μηνιαία ή ετήσια σύνθετα. Πριν τη σύνθεσή τους, όλα τα δεδομένα του αισθητήρα DNB υπόκεινται σε επεξεργασία για την αφαίρεση δεδομένων που προέρχονται από εκτρεπόμενο φως, αστραπές, σεληνιακό φωτισμό και νεφοκάλυψη. Η νεφοκάλυψη καθορίζεται μέσω του προϊόντος VIIRS Cloud Mask (VCM). Η έκδοση 1 των μηνιαίων σύνθετων δεν έχει φιλτραριστεί για την διαλογή των φωτών που προέρχονται από σέλας, φωτιές, σκάφη, ή άλλων παροδικών φώτα. Ωστόσο, τα ετήσια σύνθετα έχουν υποβληθεί σε επιπλέον επεξεργασία, επιτυγχάνοντας την αφαίρεση των παροδικών φωτών και τιμών υποβάθρου (περιοχές χωρίς φως). Δεδομένα κοντά στα όρια της σάρωσης δεν συμπεριλαμβάνονται στα σύνθετα. Τα δεδομένα δίνονται στο σύστημα αναφοράς WGS 84 έχοντας διαστάσεις pixel περίπου 0.00417 deg.

3.2.3 Έλεγχος Παραμέτρων Αναλυτικού Μοντέλου

Ενώ ο συνδυασμός τηλεπισκοπικών δεδομένων και επιτόπιων μετρήσεων ελαχιστοποιεί τα σφάλματα και ίσως απαιτείται για ένα αποδεκτό επίπεδο ακρίβειας στη ξεχωριστή μελέτη κάθε πόλης, δεν υπήρχε η δυνατότητα επιτόπιων μετρήσεων εξαιτίας της απαγόρευσης κυκλοφορίας εν μέσω της πανδημίας της νόσου του COVID-19. Για τον λόγο αυτό ελέγξαμε αν οι παραδοχές που πραγματοποιούνται για τις εκάστοτε παραμέτρους στο αναλυτικό μοντέλο του Garstang [145] και την τροποποίησή των Luginbuhl et al. [119] -τις οποίες έκαναν και οι Duriscoe et al. για το απλοποιημένο υπολογιστικό μοντέλο τους [117]- μπορούν να επιβεβαιωθούν και στην Περιφέρεια Ηπείρου.

Αρχικά, για την κατασκευή ενός «προφίλ παρεμπόδισης» της υπό μελέτη περιοχής με βάση την μέθοδο των Luginbuhl et al. [119], οι Duriscoe et al. [117] επέλεξαν τις τιμές $E_b = 0.3$ mag και $\beta = 0.1$, προκαλώντας μείωση των ανοδικών φωτεινών εκπομπών κατά περίπου 30% σε σχέση με το μη τροποποιημένο μοντέλο Garstang. Οι τιμές αυτές είναι τυπικές για περιοχές όπως προάστια με αρκετή βλάστηση, μια υπόθεση σχετικά αντιπροσωπευτική για το σύνολο της Περιφέρειας.

Αντιστοίχως και για τις υπόλοιπες παραμέτρους που υπεισέρχονται στο αναλυτικό μοντέλο Garstang, καταλήγουμε πως οι επιλεγθείσες τιμές για το μοντέλο των Duriscoe et al. είναι παρόμοιες με εκείνες στην περίπτωση της Περιφέρειας Ηπείρου. Συνεπώς μπορεί να γίνει μια στοιχειώδης χρήση της εξαχθείσας σχέσης του $\alpha = \alpha(d)$ (Εξ. (3.6)). Αναλυτικά:

Χαρακτηριστικά Φωτισμού

Για τη χρήση του μοντέλου Garstang πρέπει να εισαχθούν δεδομένα φωτεινής ροής σε lumens. Οι Duriscoe et al. για τη χρήση του raster δορυφορικών δεδομένων ανοδικής ακτινοβολίας VIIRS-DNB, μετέτρεψαν τις τιμές του κάθε pixel σε εγκατεστημένα στην αντίστοιχη περιοχή lumens μέσω της σχέσης $3698 \text{ lm} = 1 \text{ W}^{-1} \text{ sr}$ [117]. Ο συντελεστής μετατροπής υπολογίστηκε από τους Duriscoe et al. [152] για την πόλη Flagstaff της Arizona. Η ακρίβεια της μεθόδου εναποτίθεται λοιπόν στην ομοιότητα της εκάστοτε υπό μελέτη περιοχής με το Flagstaff, όσον αφορά την ομαλότητα και την ανακλαστικότητα του εδάφους και το φάσμα των φωτεινών πηγών (Πίνακας 3.1).

Τύπος λαμπτήρα	Ποσοστό χρήσης (%)
HPS	36
LPS	26
Πυρακτώσεως 2500K	23
MV, MH, Φθορισμού, LED 4000K, Άλλοι	15

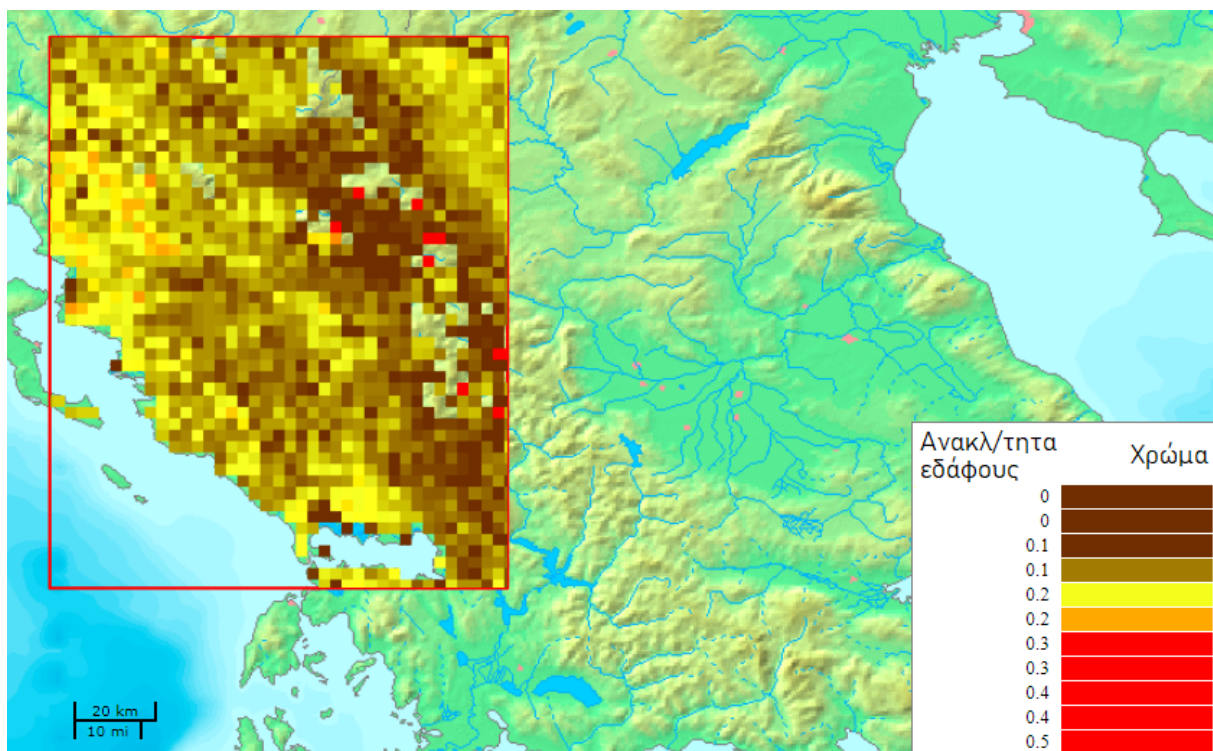
Πίνακας 3.1: Αναλογίες εγκατεστημένων φωτιστικών σωμάτων για την πόλη Flagstaff βάσει απογραφής φωτισμού το 2003 [119].

Στην Περιφέρεια Ηπείρου πράγματι χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο φωτιστικά σώματα λαμπτήρων Νατρίου Υψηλής Πίεσης (HPS) και Χαμηλής Πίεσης (LPS) 250W/400W, ή Ατμών Υδραργύρου Υψηλής Πίεσης (Mercury Vapor) 125W [129]. Μία ακόμη σημαντική ομοιότητα με το Flagstaff είναι η μερική φωταγώγηση του οδικού δικτύου. Στις περισσότερες περιοχές τα μέσα επίπεδα οδοφωτισμού πέφτουν σημαντικά κάτω από τα επίπεδα που παρατηρούνται συνήθως στις μεγαλύτερες κοινότητες, γεγονός που ισχύει και για την Περιφέρεια Ηπείρου. Επιπλέον, σε μικρό βαθμό έχει προχωρήσει και η εγκατάσταση λευκών LED σε κτίρια της Περιφέρειας ή τμήματα οδών των Δήμων.

Μία ακόμη υπόθεση του μοντέλου SALR είναι ότι η φασματική κατανομή ισχύος, δηλαδή το είδος και η τοπική κατανομή των φωτιστικών σωμάτων, είναι παρόμοια ή ίδια για όλες τις επιμέρους κοινότητες. Εάν παραβιάζεται αυτή η υπόθεση, τότε η προβλεπόμενη φωτεινότητα του ουρανού μπορεί να αποκλίνει σημαντικά από τη βαθμονόμηση. Η παραδοχή αυτή δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα της Περιφέρειας Ηπείρου, για την οποία υποθέτουμε ότι στο σύνολό της ισχύουν περίπου οι παραπάνω αναλογίες.

Ανακλαστικότητα (Λευκαύγεια) Εδάφους

Μια εκτίμηση της ανακλαστικότητας εδάφους για την Περιφέρεια Ηπείρου λήφθηκε μέσω της συλλογής «Surface Albedo Collection 1km Version 1» από τον δορυφόρο PROBA-V της Copernicus Global Land Service (CGLS) για την περίοδο 05/04-05/05 του έτους 2020. Τα προϊόντα «Surface Albedo» είναι σύνθετα 30 ημερών, τα οποία ανανεώνονται κάθε 10 ημέρες, χωρικής ανάλυσης 1 km. Στο σχήμα Σχ. 3.5 αφορά μια «γρήγορη απεικόνιση» των δεδομένων, ένα γεωαναφερμένο αρχείο GeoTIFF που απεικονίζει την ευρυζωνική «black-sky» λευκαύγεια σε όλο του φάσμα του αισθητήρα (0.3-4μm). Η χωρική ανάλυση έχει μειωθεί στο 1/4 της αρχικής και για τους δύο άξονες, συνεπώς η τελική απεικόνιση είναι το 1/16 των αρχικών δεδομένων.



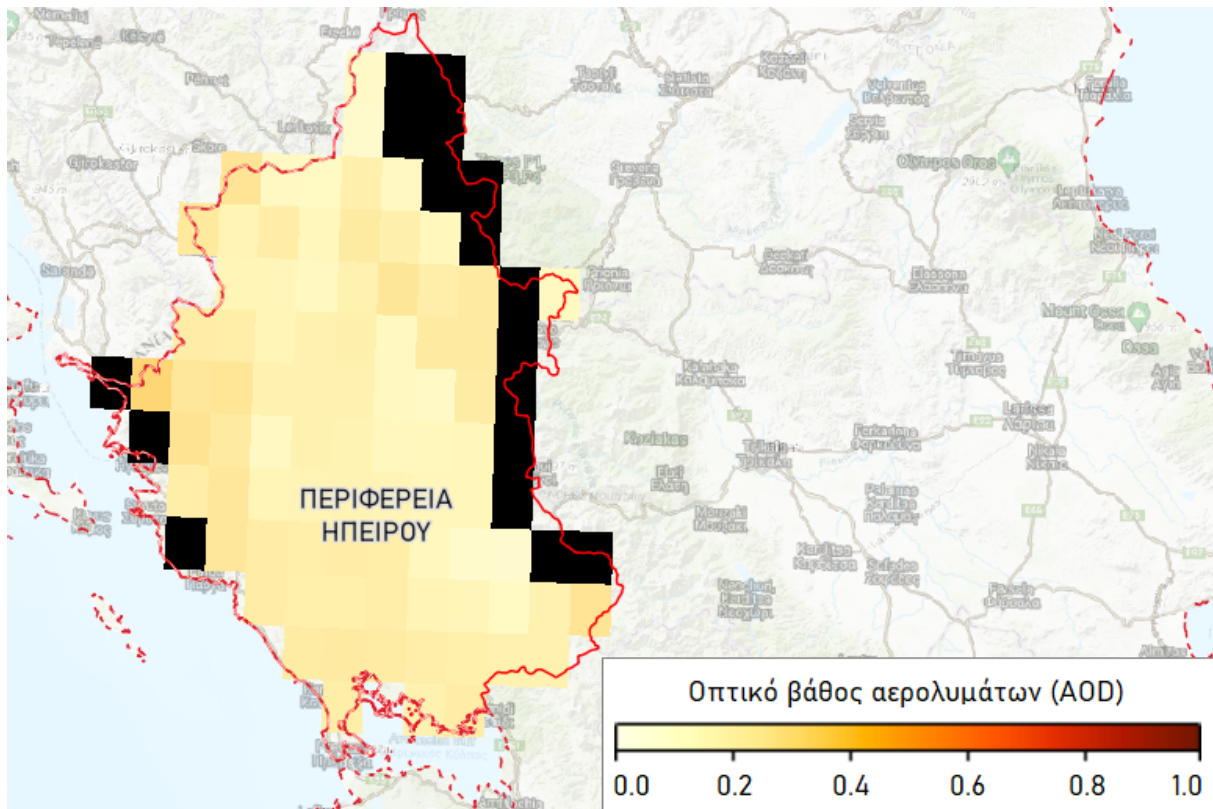
Σχήμα 3.5: Τιμές λευκαύγειας (directional albedo) της Περιφέρειας Ηπείρου για τον Απρίλιο του 2020 από τον δορυφόρο PROBA-V της ESA. Πηγή: land.copernicus.vgt.vito.be

Από το Σχ. 3.5 φαίνεται ότι οι τιμές της λευκαύγειας για την Περιφέρεια Ηπείρου κυμαίνονται μεταξύ 0.1 και 0.2. Συνεπώς η τιμή 0.15 που εισήχθη στο αναλυτικό μοντέλο των [117] συναντάται και στην υπό μελέτη περιοχή.

Συγκέντρωση Αερολυμάτων

Η συγκέντρωση των αερολυμάτων στο μοντέλο Garstang εκφράζεται μέσω της παραμέτρου K, όπως αναφέραμε στην παράγραφο 3.1. Μια εκτίμηση για την παράμετρο K

στην Περιφέρεια Ηπείρου λήφθηκε έμμεσα από τιμές του οπτικού βάθους αερολυμάτων (Aerosol Optical Depth - AOD) μέσω της συλλογής «MODIS Collection 6.1» από το φασματοραδιόμετρο MODIS του δορυφόρου Terra της NASA.



Σχήμα 3.6: Τιμές οπτικού βάθους αερολυμάτων (AOD) της Περιφέρειας Ηπείρου για την 01/04/2020, με μέση τιμή $\tau = 0.16$. Τα μαύρα pixel αντιστοιχούν σε περιοχές «no data» όπου ο δορυφόρος δεν έλαβε τιμές. Πηγή: neo.sci.gsfc.nasa.gov

Το οπτικό βάθος αερολυμάτων $\tau = 0.16$ αντιστοιχεί σε κατακόρυφη εξασθένιση 0.17 mag από τη σχέση $\Delta m = 1.0857\tau$, ενώ σύμφωνα με την [145, Εξ. (21)] του μοντέλου Garstang αντιστοιχεί σε $K=0.23$.

Οι Falchi et al. [22] θεώρησαν μια καθολική τιμή $K=1$ για όλη την υδρόγειο, ενώ οι Duriscoe et al. [117] επέλεξαν $K=0.35$, θεωρώντας πως αντικατοπτρίζει ορθότερα τις χαμηλές συγκεντρώσεις αερολυμάτων που είναι τυπικές για τις δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες. Τέτοιες συνθήκες θεωρούμε πως εντοπίζονται και στην Περιφέρεια Ηπείρου (Σχ. 3.6), η οποία αποτελείται κυρίως από ορεινές περιοχές υψηλών υψομέτρων και λίγες πόλεις, ενώ γεωγραφικά τοποθετείται και σε παρόμοιο γεωγραφικό πλάτος με τις νοτιότερες πολιτείες των ΗΠΑ που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο SALR. Συνεπώς, μπορούμε να αποδεχθούμε την τιμή $K=0.35$, η οποία αντιστοιχεί σε κατακόρυφη εξασθένιση $\Delta m = 0.19$ mag ($\tau = 0.17$) και οπτική εμβέλεια 65 km στην επιφάνεια της θάλασσας.

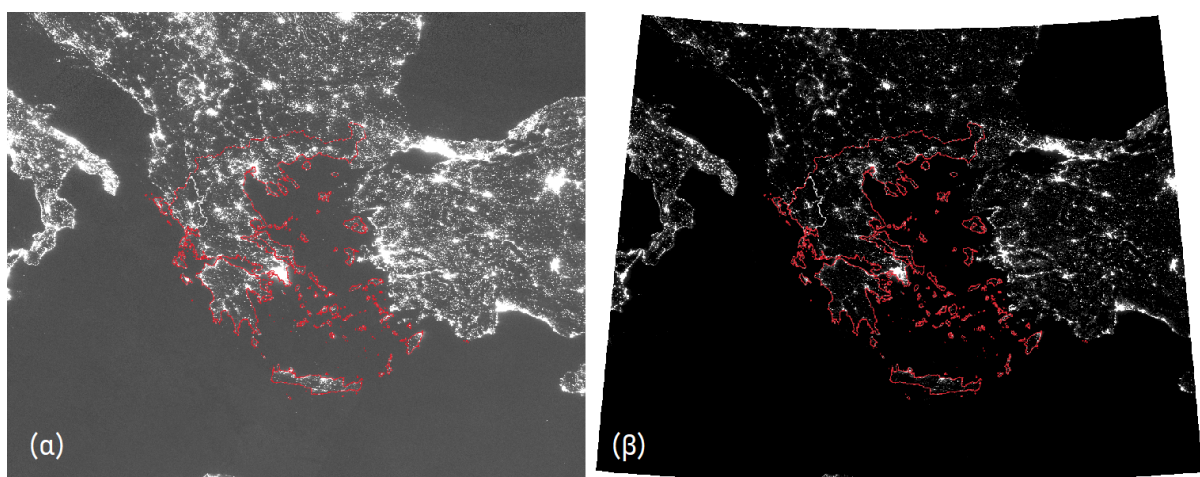
Κεφάλαιο 4

Οικολογική Φωτορύπανση Περιφέρειας Ηπείρου

4.1 Εφαρμογή Μοντέλου SALR

4.1.1 Προεπεξεργασία Δεδομένων

Για την εφαρμογή του μοντέλου SALR χρησιμοποιήθηκε το μηνιαίο σύνθετο της Ευρώπης (Tile 2 - 75N060W) για τον Απρίλιο του 2020, με κατάληξη `.avg_grade9h`, το οποίο εμπεριέχει δεδομένα πραγματικών τιμών ακτινοβολίας σε $nW\ cm^{-2}\ sr^{-1}$. Επιλέχθηκε ο μήνας Απρίλιος ώστε να υπάρχει ελάχιστη νεφοκάλυψη αλλά και χιονοκάλυψη, η οποία μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στη φασματική κατανομή της ανοδικής ακτινοβολίας. Η επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε εξ' ολοκλήρου στο περιβάλλον QGIS 3.10.2.



Σχήμα 4.1: (α) Μηνιαίο σύνθετο VIIRS-DNB για τον Απρίλιο του 2020. (β) Το ίδιο σύνθετο μετά την εκκαθάριση του θορύβου (pixel με τιμές < 0.5), την αποκοπή σε αποστάσεις 300 km και την προβολή στο σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ87.

Τα δεδομένα VIIRS DNB εμφανίζουν διάφορα επίπεδα υποβάθρου σε τιμές περίπου $0.3 \text{ nW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$. Για την αποτελεσματική αποκοπή της ακτινοβολίας που δεν σχετίζεται με τον εξωτερικό τεχνητό φωτισμό, αφού εξετάσαμε την περιοχή ενδιαφέροντος, ορίσαμε ως μηδενική τιμή το $0.5 \text{ nW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ (Σχ. 4.1). Ο μηδενισμός των τιμών < 0.5 έγινε μέσω της πράξης $(\text{dnb_data} \geq 0.5) \times \text{dnb_data}$. Η εικόνα στη συνέχεια αποκόπηκε έτσι ώστε τα συνοριακά pixel της εικόνας να απέχουν τουλάχιστον 300 km από την ακτογραμμή της Ελλάδας. Τέλος, προβλήθηκε στο σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ87 (EPSG:2100), και επαναπροσαρμόστηκε μέσω της μεθόδου «Nearest Neighbour Resampling» ώστε τα pixel να έχουν ίσες διαστάσεις $350 \times 350 \text{ m}$, κάτι αναγκαίο για τον κώδικα σε Python που αναφέρουμε αμέσως μετά.

4.1.2 Κατασκευή Αλγόριθμου Υπολογισμού ALR

Η μεγάλη έκταση της περιοχής των ΗΠΑ στη μελέτη των Duriscoe et al. απαιτούσε μεγάλη υπολογιστική ισχύ, ωθώντας τους στον προσδιορισμό περιοχών συνεισφοράς και στην παραδοχή ότι τα κελιά εντός των περιοχών αυτών έχουν την ίδια απόσταση από το κελί επεξεργασίας (μέθοδος άθροισης γειτονικών δακτυλίων - neighbourhood annulus method). Στην περίπτωση της Περιφέρειας Ηπείρου, αλλά και συνολικά της Ελλάδας, ο αριθμός των pixel που επεξεργαστήκαμε είναι πολύ μικρότερος, συνεπώς ήταν προτιμότερος ο υπολογισμός της συνεισφοράς του κάθε γειτονικού pixel ξεχωριστά. Για την εξαγωγή του raster τιμών ALR κατασκευάσαμε έναν «αλγόριθμο άθροισης γειτονικών κελιών» στο πλαίσιο ενός Python script, μέσω του οποίου για κάθε κελί επεξεργασίας του VIIRS-DNB raster αθροίζονται οι συνεισφορές όλων των υπόλοιπων κελιών εντός απόστασης 300 km. Ο αλγόριθμος ουσιαστικά αφορά την εφαρμογή ενός φίλτρου συνέλιξης (αγγλ. convolution filter), με τις τιμές των κελιών του φίλτρου να προκύπτουν από τη συνάρτηση $\alpha(d)$.

Αναλυτικά, αν m το πλήθος των συνολικών pixel του raster και n το πλήθος των κελιών επεξεργασίας (με $m > n$), i ένα γειτονικό κελί (πλήθους $m - 1$) ενός κελιού επεξεργασίας j , r_i η ανοδική φωτεινή ροή σε κάθε κελί i και d_i η απόσταση μεταξύ ενός γειτονικού κελιού i και του κελιού επεξεργασίας j , τότε

$$ALR_j = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^{m-1} r_i d_i^{-\alpha_i}, \quad (4.1)$$

$$\alpha_i = 2.3((d_i/350)^{0.28}), \quad (4.2)$$

όπου

$$j = 1, \dots, n,$$

$$d_i \leq 300 \text{ και}$$

$$c = 562.72.$$

Η αναλυτική προσέγγιση της συνάρτησης $\alpha(d)$ παρουσιάζει μία πολύ καλή συμπεριφορά για όλες τις αποστάσεις από την πηγή, εκτός από τις εξαιρετικά μικρές, και ιδίως για $d = 0$. Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος, ορίσαμε την τιμή του $\alpha(0) = \alpha(0.4)$, με βάση τις διαστάσεις των pixel του επεξεργαζόμενου raster. Η προσεγγιστική αυτή τιμή επιλέγεται διότι η ακριβής τιμή του ALR για τόσο μικρές αποστάσεις δεν έχει επικυρωθεί πειραματικά σε αυτό το μοντέλο. Στην πραγματικότητα ωστόσο αναμένεται ότι η τιμή του ALR θα μεταβάλλεται πολύ αργά σε εξαιρετικά μικρές αποστάσεις γύρω από την πηγή.

Ο χρόνος υπολογισμού σε 4πύρηννο επεξεργαστή Intel i5 7ης γενιάς ήταν περίπου 6 ώρες για τον πλήρη χάρτη του ελλαδικού χώρου. Ο κώδικας επισυνάπτεται στο Παράρτημα Α'. Η μετέπειτα εισαγωγή του raster τιμών ALR σε λογισμικό GIS για την κατασκευή θεματικού χάρτη της οικολογικής φωτορύπανσης, απεικονίζεται στο Σχ. 4.2.

4.2 Χάρτης Ολικής Τεχνητής Λαμπρότητας Ουράνιου Θόλου

Πρέπει να σημειωθεί πως στο μοντέλο δεν λαμβάνονται υπ' όψιν το ανάγλυφο του εδάφους και υψομετρικές διαφορές, και επομένως ούτε πιθανά φαινόμενα σκίασης όπως από την παρεμπόδιση τους φωτός λόγω βουνών. Μολονότι έχουν προταθεί τρόποι μοντελοποίησης τέτοιων φαινομένων [147], αυτοί αφορούν κυρίως στον υπολογισμό της ζενιθιακής φωτεινότητας. Η ενσώματώσή τους συνεπώς είναι μη τετρωμένη, ενώ παράλληλα θα απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Παρ' όλα αυτά η συνεισφορά τους δεν είναι διόλου αμελητέα, διότι η Ήπειρος αποτελείται κυρίως από ορεινές περιοχές. Χαρακτηριστικά, παρατηρούμε ότι βουνά όπως ο Τόμαρος, το Ξηροβούνι και τα Θεσπρωτικά Όρη στα νότια, ή ο Λάκμος και τα Αθαμανικά Όρη στα ανατολικά, μπορεί να έχουν μεγάλη συνεισφορά στην παρεμπόδιση του εκπεμπόμενου φωτός από τον Δήμο Ιωαννιτών, και συνεπώς το μοντέλο να υπερεκτιμά τις τιμές του ALR για τις προστατευόμενες περιοχές που σκιάζονται από τα βουνά αυτά. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας για μια πρώτη εκτίμηση της οικολογικής φωτορύπανσης στην Περιφέρεια Ηπείρου θεωρήσαμε ότι μια τέτοια ανάλυση δεν ήταν απαραίτητη.

4.2.1 Ερμηνεία των Προϊόντων του Μοντέλου

Με βάση τους Moore et al. [153], τα προτεινόμενα πρότυπα για την οπτική ποιότητα του ουρανού σε προστατευόμενες περιοχές μπορούν να δοθούν σε μονάδες του δείκτη ALR. Η αντιστοιχία τους και με άλλους βασικούς δείκτες όπως η κλίμακα Bortle και το NELM (αγγλ. «naked eye limiting magnitude», το αμυδρότερο παρατηρήσιμο άστρο), παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Ένας επιπλέον διαχωρισμός έγινε από τους Duriscoe et al. [117] με βάση την αξιολόγηση της ποιότητας του νυχτερινού ουρανού στον «Παγκόσμιο Άτλα Ζενιθιακής Φωτεινότητας» [22, Σχ. 10], όταν ο Milky Way γίνεται μη ορατός σε ZLR=4.0, ή περίπου ALR=10.0.

Ποιότητα ουρανού	ALR	ZLR	NELM	Κλίμακα Bortle
Καλή	0-0.33	0-0.1	6.8-7.6	1-3
Μέτρια (απειλούμενη)	0.33-2.0	0.1-0.7	6.3-6.7	4
Κακή (για ευαίσθητες προστατευόμενες περιοχές)	2.0-10.0	0.7-4.0	5.7-6.2	5
Μη ορατός Milky Way	> 10.0	> 4.0	< 5.7	6-9

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες οπτικής ποιότητας ουρανού με βάση την τιμή του δείκτη ALR και η συσχέτισή τους με άλλους δείκτες. Λήψη από [117, 153] και την Υπηρεσία Εθνικών Πάρκων των ΗΠΑ.

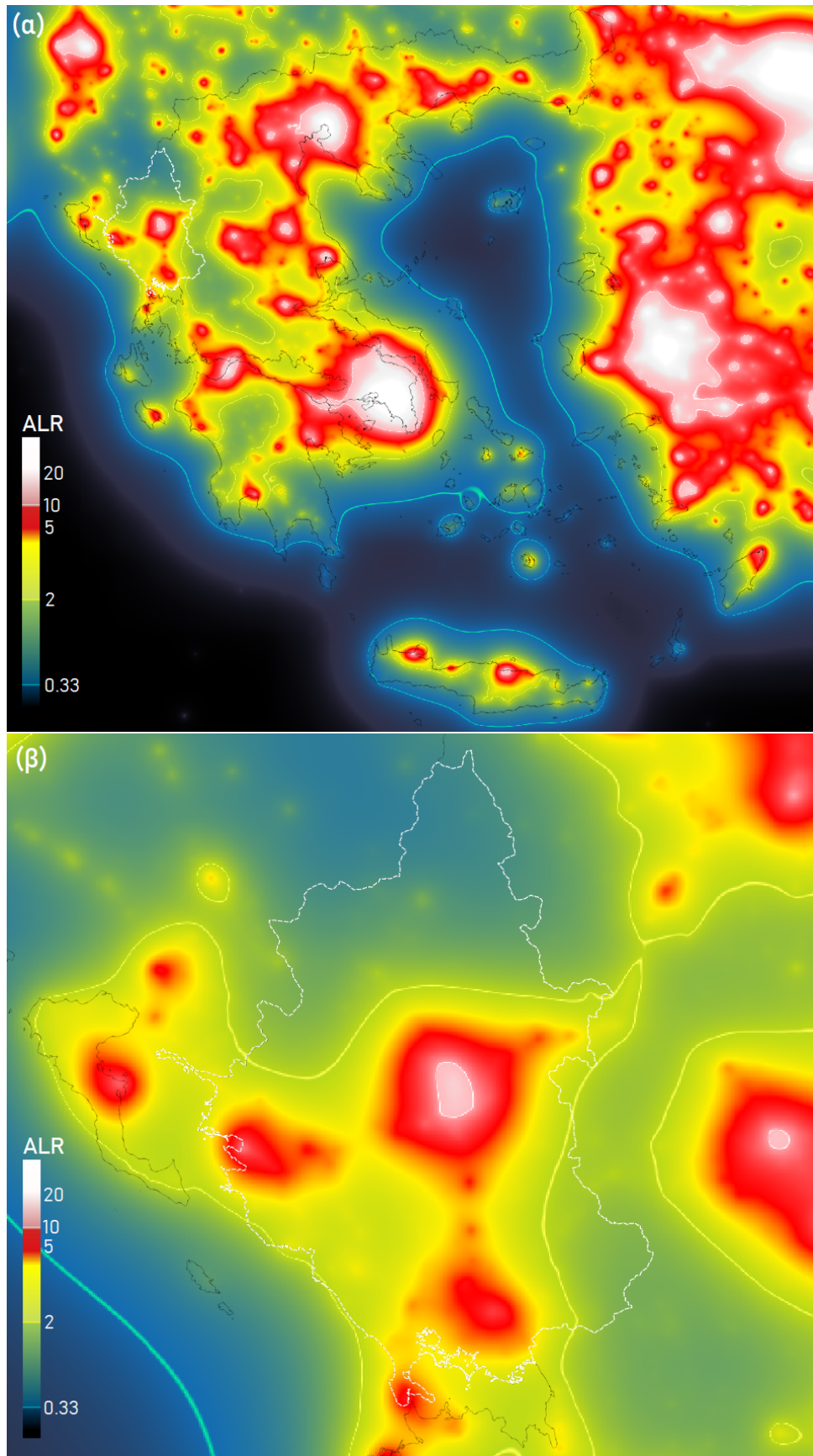
Αναλυτικότερα:

- 1η κατηγορία: Οι περισσότεροι παρατηρητές έχουν την αίσθηση ότι βρίσκονται σε ένα φυσικό περιβάλλον, με τα φυσικά χαρακτηριστικά του νυχτερινού ουρανού να είναι άμεσα ορατά, ενώ ειδικά μέσα σε ένα δομημένο περιβάλλον ο ουρανός φαίνεται σε μεγάλο βαθμό ανέπαφος.
- 2η κατηγορία: Το ανθρωπογενές φως κυριαρχεί των φυσικών χαρακτηριστικών του ουρανού, μερικές σκιές από μακρινά φώτα ίσως φαίνονται και η προσαρμογή στο σκοτάδι είναι δυνατή σε μερικές κατευθύνσεις τουλάχιστον.
- 3η και 4η κατηγορία: Ο ουρανός έχει χάσει όλες τις πτυχές της φυσικότητας εκτός από μερικές εκατοντάδες ορατά αστέρια (ή και λιγότερα) με φωτισμένο ορίζοντα και η σκίαση ή ο φωτισμός του τοπίου είναι διακριτά. Η πλήρης προσαρμογή στο σκοτάδι δεν είναι δυνατή, ενώ μπορεί να υπάρχει σημαντική θάμβωση και οι κηκιάδιοι ρυθμοί μπορεί να διαταραχθούν.

Για τον καλύτερο εντοπισμό των κατωφλίων 0.33, 2 και 10.0 του ALR στα παρακάτω σχήματα, αυτά απεικονίζονται με πιο έντονα χρωματισμένες ζώνες.

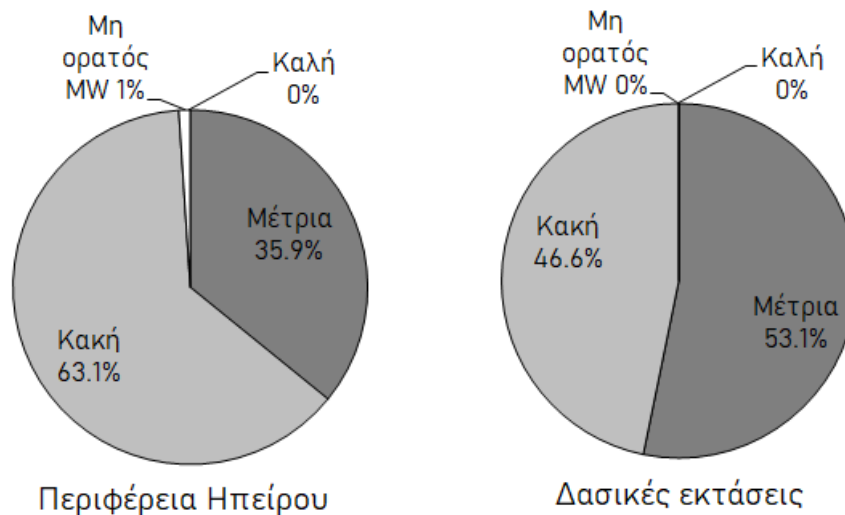
4.2.2 Οικολογική Φωτορύπανση στην Περιφέρεια Ηπείρου

Στο Σχ. 4.2 απεικονίζεται ο θεματικός χάρτης ολικής τεχνητής φωτεινότητας ουρανού θόλου με βάση τον δείκτη ALR για το σύνολο του ελλαδικού χώρου.



Σχήμα 4.2: (α) Χάρτης ολικής τεχνητής φωτεινότητας ουράνιου θόλου ως προς την τιμή υποβάθρου $250 \mu\text{cd m}^{-2}$ για την Ελλάδα και (β) για την Περιφέρεια Ηπείρου.

Στο Σχ. 4.3 παραθέτονται τα αποτελέσματα για την οπτική ποιότητα ουρανού της Περιφέρειας Ηπείρου και τις δασικές εκτάσεις που δεν εμπεριέχονται σε κάποια προστατευόμενη περιοχή.



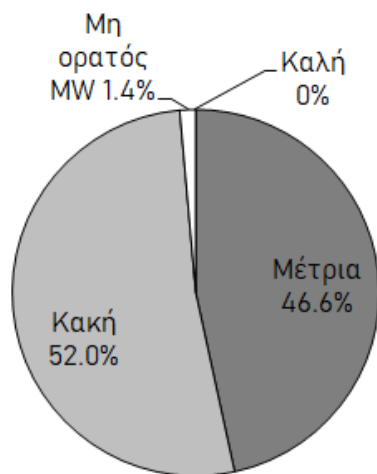
Σχήμα 4.3: Ποσοστιαία (%) κατανομή της ποιότητας ουρανού κατά έκταση για την Περιφέρεια Ηπείρου και τις λοιπές δασικές περιοχές.

Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο κομμάτι της Περιφέρειας Ηπείρου εμφανίζει κακή ποιότητα ουρανού, ενώ δεν υπάρχει ούτε μία περιοχή με καλή ποιότητα. Μάλιστα η κατηγορία αυτή εντοπίζεται μόνο σε θαλάσσιες περιοχές, συνεπώς από εδώ και στο εξής θα αναφερόμαστε μόνο στις τρεις υπόλοιπες κατηγορίες. Τα ποσοστά αυτά πιθανώς είναι λίγο διαφορετικά εξαιτίας της παρεμπόδισης του φωτός από τους ορεινούς όγκους, με ένα ποσοστό της έκτασης στην πραγματικότητα να ανήκει στην δεύτερη κατηγορία, αλλά το ποσοστό αυτό αναμένεται να μην είναι πολύ μεγάλο.

Τα δάση που δεν υπάγονται σε προστατευόμενες περιοχές επηρεάζονται και αυτά από τη φωτορύπανση, με λίγο λιγότερο από τη μισή τους έκταση να βρίσκεται κάτω από ουρανό κακής ποιότητας. Το ποσοστό αυτό προκαλείται κυρίως από εκπομπές της πόλης των Ιωαννίνων, ενώ το υπόλοιπο κομμάτι των δασικών εκτάσεων που βρίσκεται βορειότερα και περιμετρικά του Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου είναι περισσότερο προστατευμένο.

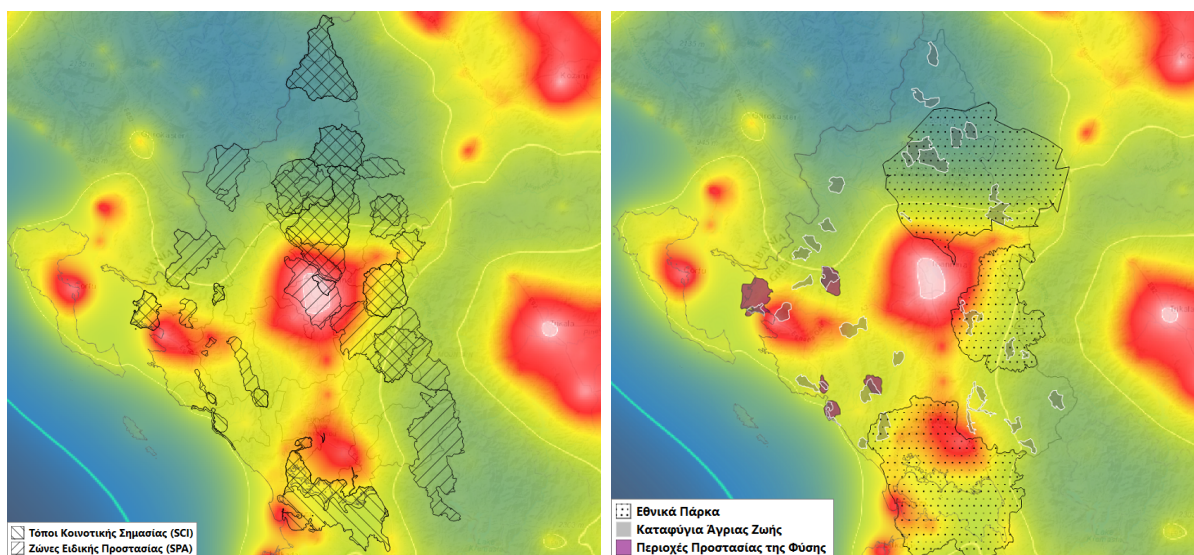
4.2.3 Οικολογική Φωτορύπανση στις Προστατευόμενες Περιοχές

Το σύνολο των προστατευόμενων περιοχών της Περιφέρειας Ηπείρου βρίσκεται κάτω από τουλάχιστον μέτριο ουρανό, με περίπου τις μισές από αυτές να έχουν κακή ποιότητα ουρανού ενώ σε ένα μικρό ποσοστό η ζώνη του Milky Way δεν είναι ορατή (Σχ. 4.4). Αυτό σημαίνει ότι σε περισσότερες από τις μισές προστατευόμενες περιοχές η βιοποικιλότητα τίθεται σε κίνδυνο.



Προστατευόμενες περιοχές

Σχήμα 4.4: Ποσοστιαία (%) κατανομή της ποιότητας ουρανού κατά έκταση για το σύνολο των προστατευόμενων περιοχών.



Σχήμα 4.5: Οικολογική φωτορύπανση στις προστατευόμενες περιοχές της Περιφέρειας Ηπείρου.

Αναλυτικά τα στοιχεία της ποιότητας ουρανού και της μέσης τιμής του δείκτη ALR για κάθε προστατευόμενη περιοχή της Περιφέρειας Ηπείρου παραθέτονται στον Πίνακα 4.2, κατά φθίνουσα έκταση των περιοχών. Για το Εθνικό Πάρκο Υγρότοπων Αμβρακικού επισυνάπτουμε τα στοιχεία μόνο για την Ζώνη Περιβαλλοντικού Ελέγχου διότι τα στοιχεία για τον πυρήνα του δίνονται από την αντίστοιχη περιοχή Natura.

Προστατευόμενη Περιοχή	Ποιότητα ουρανού (Έκταση %)	ALR (Μ.Ο.)
Natura 2000	Μέτρια (42.3) & Κακή (51.9) & Μη Ορατ. ΜW (5.8)	
SCI	Μέτρια (33.3) & Κακή (66.7)	
Αμβρακικός Κόλπος, Δέλτα Λούρου και Αράχθου (Πέτρα, Μύτικας, Ευρύτερη Περιοχή, Κάτω Ρους Αράχθου, Καμπή Φιλιππιάδας)	Κακή	2.83
Κεντρικό Τμήμα Ζαγορίου	Μέτρια (57.8) & Κακή (42.2)	1.94
Όρη Αθαμάνων (Νεραίδα)	Μέτρια (70.1) & Κακή (29.9)	1.95
Εθνικός Δρυμός Βίκου - Αώου	Μέτρια	1.22
Εκβολές (Δέλτα) Καλαμά	Κακή	3.09
Όρος Μιτσικέλι	Κακή	5.31
Βασιλίτσα	Μέτρια	1.08
Περιοχή Μετσόβου (Ανίλιο-Κατάρα)	Κακή	2.61
Εθνικός Δρυμός Πίνδου (Βάλια Κάλντα) - Ευρύτερη Περιοχή	Μέτρια	1.52
Εκβολές Αχέρωντα (από Γλώσσα έως Αλωνάκι) και Στενά Αχέρωντα	Μέτρια (6.4) & Κακή (93.6)	2.24
Στενά Καλαμά	Μέτρια (2.5) & Κακή (97.5)	2.21
Παράκτια Θαλάσσια Ζώνη από Πάργα έως Ακρωτήριο Άγιος Θωμάς (Πρέβεζα), Ακρ. Κελάδιο - Αγ. Θωμάς	Μέτρια (29.4) & Κακή (70.6)	2.13
Έλος Καλοδίκη	Κακή	2.46
Λίμνη Λιμνοπούλα	Κακή	4.46
SPA	Μέτρια (43.3) & Κακή (54.0) & Μη Ορατ. ΜW (2.7)	
Ευρύτερη Περιοχή Αθαμανικών Όρεων	Μέτρια (50.4) & Κακή (49.6)	2.52
Κεντρικό Ζαγόρι και Ανατολικό Τμήμα Όρους Μιτσικέλι	Μέτρια (41.7) & Κακή (58.3)	2.82
Κοιλάδα Αχελώου και Όρη Βάλτου	Μέτρια	1.41
Όρος Τύμφη (Γκαμίλα)	Μέτρια	1.28
Αμβρακικός Κόλπος, Λιμνοθάλασσα Κατάφουρκο και Κορακονήσια	Κακή	3.01

Ευρύτερη Περιοχή Πόλης Ιωαννίνων	Κακή (64.6) & Μη Ορατός MW (35.4)	9.37
Όρη Τσαμαντά, Φιλιατών, Φαρμακοβούνι, Μεγάλη Ράχη	Μέτρια (88.4) & Κακή (11.6)	1.66
Όρος Δούσκων, Ωραιόκαστρο, Δάσος Μερόπης, Κοιλάδα Γκόρμου, Λίμνη Δελβινάκιου	Μέτρια	1.00
Βάλια Κάλντα και Τεχνητή Λίμνη Αώου	Μέτρια (81.4) & Κακή (18.6)	1.70
Όρη Παραμυθιάς, Στενά Καλαμά και Στενά Αχέρωντα	Μέτρια (0.3) & Κακή (99.7)	2.57
Υγρότοπος Εκβολών Καλαμά και Νήσος Πρασούδι	Κακή	3.09
Στενά Παρακαλάμου	Κακή	3.38
Έλη Καλοδίκι, Μαργαρίτι, Καρτέρι και Λίμνη Προντάνη	Κακή	2.82
<hr/>		
SPASCI	Μέτρια (50.4) & Κακή (35) & Μη Ορατ. MW (14.6)	
<hr/>		
Κορυφές Όρους Γράμμος	Μέτρια	0.82
Όρος Λάκμος (Περιστέρι)	Μέτρια (1.6) & Κακή (98.4)	2.83
Κορυφές Όρους Σμόλικας	Μέτρια	0.88
Λίμνη Ιωαννίνων (Παμβώτιδα)	Κακή (41.6) & Μη Ορατός MW (58.4)	10.24
<hr/>		
Εθνικά Πάρκα	Μέτρια (35.1) & Κακή (64.9)	
<hr/>		
Βόρειας Πίνδου	Μέτρια (80.7) & Κακή (19.3)	1.57
Ζώνη Περιβαλλοντικού Ελέγχου Υγρότοπων Αμβρακικού	Μέτρια (4.0) & Κακή (96.0)	3.14
Τζουμέρκων - Περιστερίου και χαράδρας Αράχθου	Μέτρια (20.5) & Κακή (79.5)	2.69
<hr/>		
Καταφύγια Άγριας Ζωής	Μέτρια (51.7) & Κακή (48.3)	
<hr/>		
Ηλιοχωρίου - Βρυσοχωρίου Δήμου Τύμφης	Μέτρια	1.09
Χαράδρα Αώου (Κόνιτσας - Ελεύθερου - Πάπιγκου)	Μέτρια	1.08
Μέτσοβο - Χρυσοβίτσα - Γρεβενίτιο	Μέτρια (32.7) & Κακή (67.3)	2.13
Παραμυθιά - Πετούσι - Αγία Κυριακή	Κακή	3.24
Ευρύτερη Περιοχή Χαράδρας Ποταμού Αράχθου	Κακή	3.60

Ζαλόγγου - Αβάσσου Δήμων Λούρου - Ζαλόγγου - Φαναριού	Κακή	2.61
Τούρλα - Μουγγίλα - Βορίλλα Δήμων Λούρου Και Φαναριών	Κακή	2.41
Ραβενί - Μαλούνι - Πέντε Εκκλησίες	Μέτρια (9.7) & Κακή (90.3)	2.16
Βουρκοπόταμος - Γαναδιό - Πύργος - Πυρσόγιαννης	Μέτρια	0.73
Βαράθι (Μαυρουδίου - Νέας Σελευκείας - Ηγουμενίτσας)	Κακή	5.51
Προσπίλιο - Ρόνιτσα (Δελβινακίου)	Μέτρια	1.22
Πάδες	Μέτρια	0.90
Μεσσούντας - Πηγών Ελάτης	Μέτρια	1.40
Ζυγός (Μακρυνιάδας - Κάτω Καλεντίνης)	Κακή	3.10
Αετομπλίτσα	Μέτρια	0.75
Κρασιά - Μετζεβελιός Δήμου Πάργας	Κακή	2.38
Βάλια Κύρνα (Σαμαρίνας)	Μέτρια	0.90
Αγίων Πάντων, Πλατάνου, Κοκκινολιθαριού, Αγίου Νικολάου, Κάτω Ξέχωρου, Κεραμίτσας, Κρουνερίου Δήμου Φιλιατών	Μέτρια	1.76
Αμπελώνας, Βαβουρίου, Μπλέας Δήμου Φιλιατών	Μέτρια	1.59
Ανατολικά Τζουμέρκα Κοινότητας Θεοδοριάνων Δήμου Αθαμανίας	Μέτρια	1.88
Κουπάκια (Ελάφου - Άρδοσης - Ρωμανού - Δερβιζιάνων)	Κακή	2.66
Παναγιά Κουρούζα - Μακραλέξη (Λάβδανης - Αγίας Μαρίνας)	Μέτρια	1.46
Προφίτης Ηλίας, Βρυσούλες, Στεφάνωμα Δάφνης Δήμου Φιλιατών	Κακή	2.54
Φλαμπουράριο - Βοβούσα	Μέτρια	1.54
Ιερά Μονή Ροβέλιστας Δήμου Γεωργίου Καραϊσκάκη	Μέτρια (78.9) & Κακή (21.1)	1.90
Κλειδιού - Σκουληκκαριάς Γαβρόγου και Τσουμένου Δήμου Γεωργίου Καραϊσκάκη	Μέτρια	1.75
Πάπιγγο	Μέτρια	1.15

Ανεμοράχη - Διστράτου Δήμου Αθαμανίας	Κακή	2.38
Βάτατσα - Διβάρι - Όρμος Βάλτου - Δρέπανο Δήμου Ηγουμενίτσας	Κακή	3.38
Αμμουδιά - Βαλανιδοράχη - Λούτσα (πρώην Δήμου Φαναρίου)	Μέτρια (36.8) & Κακή (63.2)	2.05
Λεκατσά Δήμου Ζαλόγγου	Κακή	2.24
Αθαμάνιου – Θεοδώριανων	Μέτρια	1.78
Βάλτος Καλοδικίου	Κακή	2.46
Άγιος Αθανάσιος - Σιπίτουρα (Ασπραγγέλων - Ελάτης)	Κακή	2.73
Περιοχές Προστασίας της Φύσης		
Στενά και Εκβολές Αχέρωντα και Καλαμά και Έλους Καλοδικίου και Περιφερειακή Ζώνη	Μέτρια (3.8) & Κακή (96.2)	2.57

Πίνακας 4.2: Ποιότητα ουρανού για τις προστατευόμενες περιοχές της Περιφέρειας Ηπείρου κατά φθίνουσα έκταση. Στην περίπτωση που μία περιοχή δεν βρίσκεται ολοκληρωτικά σε μία κατηγορία, τα εκάστοτε ποσοστά των εκτάσεων κάθε κατηγορίας αναφέρονται μέσα σε παρένθεση. Για κάθε περιοχή ξεχωριστά αναφέρεται και ο μέσος όρος του δείκτη ALR.

Οι μεγαλύτεροι σε έκταση Τόποι Κοινοτικοί Σημασίας (SCI), ενώ εντοπίζονται μέσα στο εύρος της 2ης κατηγορίας, παρουσιάζουν τιμές κοντά στο άνω όριο. Σε καλύτερη κατάσταση εμφανίζονται οι Ζώνες Ειδικής Προστασίας (SPA), με τις περιοχές βέβαια 3ης και 4ης κατηγορίες να εμφανίζουν συγκριτικά υψηλότερες τιμές ALR. Ορισμένες άλλες περιπτώσεις επηρεάζονται ακόμη περισσότερο από την οικολογική φωτορύπανση έχοντας πολύ κακή ποιότητα ουρανού, όπως το «Όρος Μιτσικέλι» (SCI) η οποία φιλοξενεί και πολύτιμα είδη ορνιθοπανίδας, ταυτιζόμενη με το νότιο τμήμα της περιοχής «Κεντρικό Ζαγόρι και Ανατολικό Τμήμα Όρους Μιτσικέλι» (SPA). Οι γειτονικές σε αυτή περιοχή επηρεάζονται εξίσου σημαντικά από την πόλη των Ιωαννίνων, όπως η λίμνη Παμβώτιδα (SPASCI) και η «Ευρύτερη Περιοχή Πόλης Ιωαννίνων» (SPA). Μεγάλη ποσότητα φωτορύπανσης παρουσιάζει και η λίμνη Λιμνοπούλα με μέσο ALR 4.46, άμεσα επηρεαζόμενη από τον κοντινό οδοφωτισμό της Εγνατίας Οδού.

Τα τρία εθνικά πάρκα, οι μεγαλύτερες σε έκταση προστατευόμενες περιοχές της Περιφέρειας Ηπείρου, έχουν υποστεί μεγάλη μεταβολή των φυσικών επίπεδων φωτισμού. Το Εθνικό Πάρκο Υγρότοπων Αμβρακικού, όντας ανάμεσα στην Άρτα και την Πρέβεζα, με τη Ζώνη Περιβαλλοντικού Ελέγχου να εμπεριέχει μάλιστα την πόλη της Άρτας και μέρος της Ιονίας Οδού, βρίσκεται στη χειρότερη κατάσταση ανάμεσα στα τρία. Το Εθνικό

Πάρκο Τζουμέρκων - Περιστερίου και χαράδρας Αράχθου, αν και με χαμηλότερη τιμή στο μέσο ALR, βρίσκεται και αυτό στην πλειοψηφία του κάτω από κακή ποιότητα ουρανού. Αντίθετα, πιο σκοτεινό περιβάλλον έχει το Εθνικό Πάρκο Βόρειας Πίνδου στο μεγαλύτερο ποσοστό του, με εξαίρεση το νοτιότερο τμήμα που επηρεάζεται από την πόλη των Ιωαννίνων και την Εγνατία Οδό.

Όσον αφορά τα Καταφύγια Άγριας Ζωής, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί σε μερικά από αυτά που παρουσιάζουν υψηλές τιμές ALR και κακή ποιότητα ουρανού, όπως τα γειτονικά στην Ηγουμενίτσα «Βάτατσα - Διβάρι - Όρμος Βάλτου - Δρέπανο Δήμου Ηγουμενίτσας», η «Παραμυθιά - Πετούση - Αγία Κυριακή» και το «Βαράθι (Μαυρουδίου - Νέας Σελευκείας - Ηγουμενίτσας)». Νοτιανατολικά των Ιωαννίνων, έντονα φωτισμένο τοπίο παρουσιάζει η «Ευρύτερη Περιοχή Χαράδρας Ποταμού Αράχθου», όπως και ο «Ζυγός (Μακρυνιαδάς - Κάτω Καλεντίνης)» ανατολικά της Άρτας και της Ιονίας Οδού.

4.3 Σημαντικότερες Πηγές Φωτορύπανσης

Οι σημαντικότερες πηγές φωτορύπανσης όπως ήταν αναμενόμενο είναι οι τέσσερις μεγάλες πόλεις της περιφέρειας: Ιωάννινα, Άρτα, Ηγουμενίτσα και Πρέβεζα. Επιπλέον, ο Αυτοκινητόδρομος 2 (Α2), γνωστός και ως Εγνατία Οδός, συνεισφέρει σημαντικά στις εκπομπές φωτός, ιδιαίτερα με το ανατολικό του τμήμα (Πίνακας 4.3). Μία ακόμη σημαντική πηγή είναι ο Αυτοκινητόδρομος 5 (Α5), γνωστός και ως Ιόνια Οδός, και συγκεκριμένα το τμήμα που διασχίζει τους Δήμους Δωδώνης και Ζηρού, ανάμεσα στους Δήμους Ιωαννιτών και Άρτας. Μάλιστα, σε διάφορα τμήματά του δεν έχουν ακόμη τοποθετηθεί φωτιστικά σώματα, όπως φαίνεται και από τη δορυφορική εικόνα VIIRS-DNB στο Σχ. 4.6(α). Με την ολοκλήρωση της πλήρους φωταγώγησης της Ιονίας Οδού, αναμένεται σημαντική αύξηση της φωτορύπανσης στη γύρω περιοχή, επηρεάζοντας κυρίως το Εθνικό Πάρκο Τζουμέρκων στα ανατολικά. Τα γεωχωρικά δεδομένα για τα γεωγραφικά όρια των δήμων της Περιφέρειας Ηπείρου και τις συντεταγμένες των πόλεων λήφθηκαν από την ιστοσελίδα geodata.gov.gr. Η ψηφιοποίηση των δύο οδών έγινε σχηματίζοντας χειροκίνητα μια γραμμή με τη βοήθεια της υπηρεσίας χάρτη «Google Roads», και στη συνέχεια εκτελώντας το εργαλείο «Buffer» με ακτίνα 350m εκατέρωθεν της γραμμής. Η ακτίνα αυτή επιλέχθηκε ύστερα από τον έλεγχο της ανοδικής ακτινοβολίας των οδών στο raster VIIRS-DNB σε τοποθεσίες χωρίς οικισμούς, όπου παρατηρήθηκε ότι οι εκπομπές φωτός της οδού απεικονίζονται με περίπου δύο pixel, δηλαδή 700m.

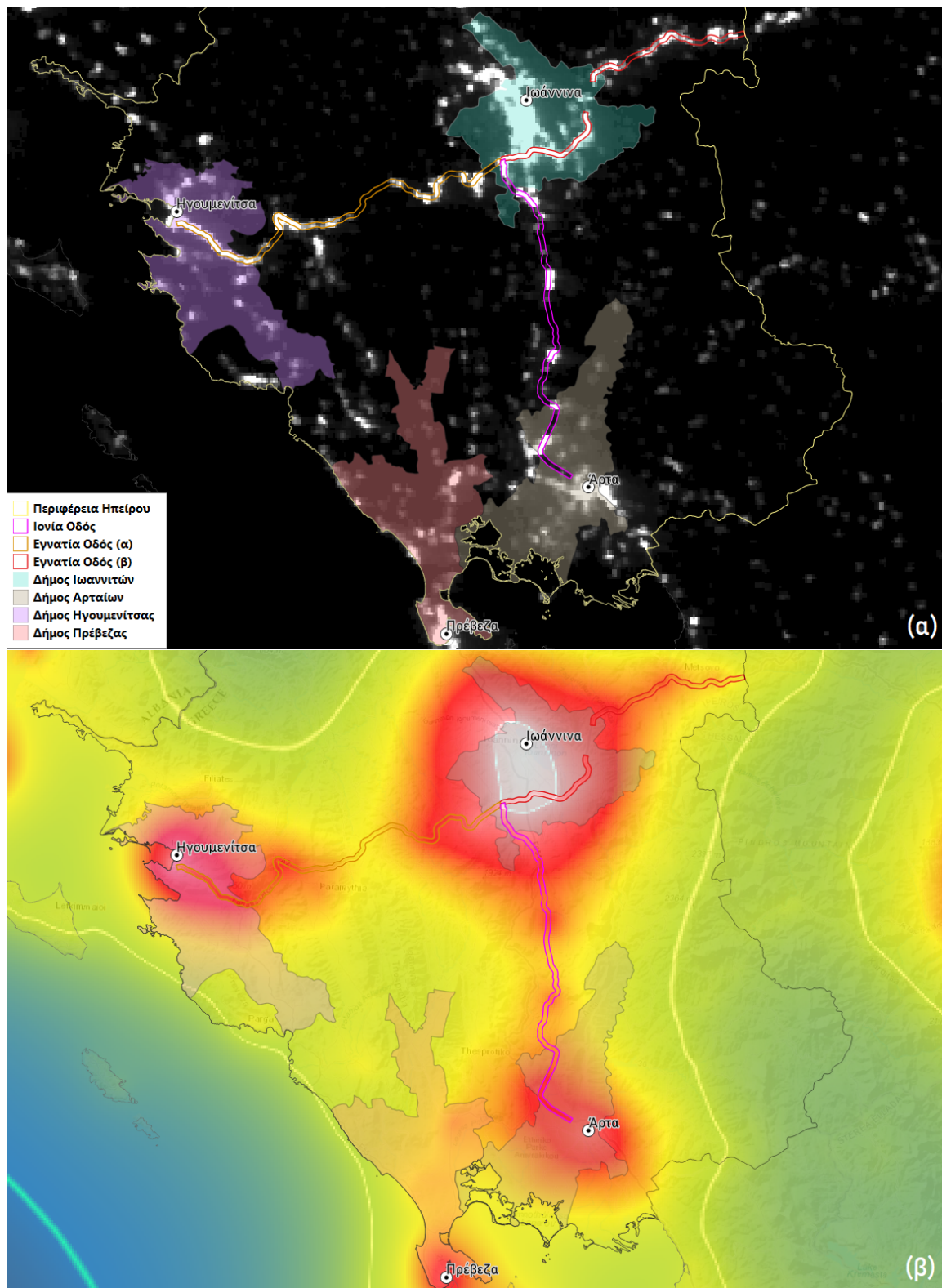
Είναι φανερό πως η πόλη και η ευρύτερη περιοχή των Ιωαννίνων αποτελούν τη μεγαλύτερη πηγή φωτορύπανσης στην Περιφέρεια Ηπείρου. Ταυτόχρονα, είναι η πόλη με τις περισσότερες συνοριακές προστατευόμενες περιοχές συμπεριλαμβανομένων των δύο βορειότερων εθνικών πάρκων της περιφέρειας. Η πόλη της Ηγουμενίτσας επηρεάζει κυρίως τις περιοχές «Εκβολές (Δέλτα) Καλαμά» (SCI) και «Στενά Παρακαλάμου» (SPA). Οι δύο νοτιότερες πόλεις της Περιφέρειας, η Άρτα και η Πρέβεζα, συνεισφέρουν συνδυαστικά

στην φωτορύπανση του Αμβρακικού κόλπου, με την Άρτα να έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά ιδιαίτερα όσον αφορά τη Ζώνη Περιβαλλοντικού Ελέγχου του αντίστοιχου Εθνικού Πάρκου.

Στο δυτικό τμήμα της Εγνατίας Οδού (τμήμα α), επηρεάζονται κυρίως η περιοχή «Λίμνη Λιμνοπούλα» (SCI) και ένα μικρό κομμάτι της περιοχής «Έλη Καλοδίκι, Μαργαρίτι, Καρτέρι και Λίμνη Προντάνη» (SPA). Προσοχή πρέπει να δοθεί στην περιοχή «Παραμυθιά - Πετούση - Αγία Κυριακή» (KAZ), με το σύνολό της να βρίσκεται κάτω από κακή ποιότητα ουρανού, επηρεαζόμενη άμεσα από το τμήμα της Εγνατίας Οδού ανατολικά της Παραμυθιάς. Το ανατολικό τμήμα της Εγνατίας Οδού (τμήμα β) επηρεάζει κυρίως το βορειοδυτικά τμήματα των περιοχών «Ευρύτερη περιοχή Αθαμανικών Όρεων» (SPA) και «Όρος Λάκμος (Περιστέρι)» (SPASCI) (που σχηματίζουν μεγάλο μέρος του Εθνικού Πάρκου Τζουμέρκων) αλλά και την «Περιοχή Μετσόβου (Ανήλιο - Κατάρρα)» (SCI).

Περιοχή	Ανοδική ακτινοβολία ($nW\ cm^{-2}\ sr^{-1}$)		
	Ως προς Δήμο Ιωανν.	Ανά km^2	Μέση
Δήμοι			
Δήμος Ιωαννιτών	1.00	34.20	4.19
Δήμος Αρταίων	0.37	12.08	1.48
Δήμος Ηγουμενίτσας	0.36	11.35	1.39
Δήμος Πρέβεζας	0.30	10.41	1.28
Οδοί			
Εγνατία Οδός (β)	0.28	101.84	12.19
Εγνατία Οδός (α)	0.24	81.60	10.00
Ιονία Οδός	0.18	61.52	7.57

Πίνακας 4.3: Μεγαλύτερες πηγές φωτορύπανσης στην Περιφέρεια Ηπείρου με βάση τα δεδομένα VIIRS-DNB (εξαιρώντας άλλους δήμους και τα μέρη των παραπάνω δήμων που περιλαμβάνουν μεγάλα τμήματα αυτοκινητόδρομων). Η πρώτη στήλη αφορά την ολική ακτινοβολία της περιοχής κανονικοποιημένη προς εκείνη του Δήμου Ιωαννιτών.



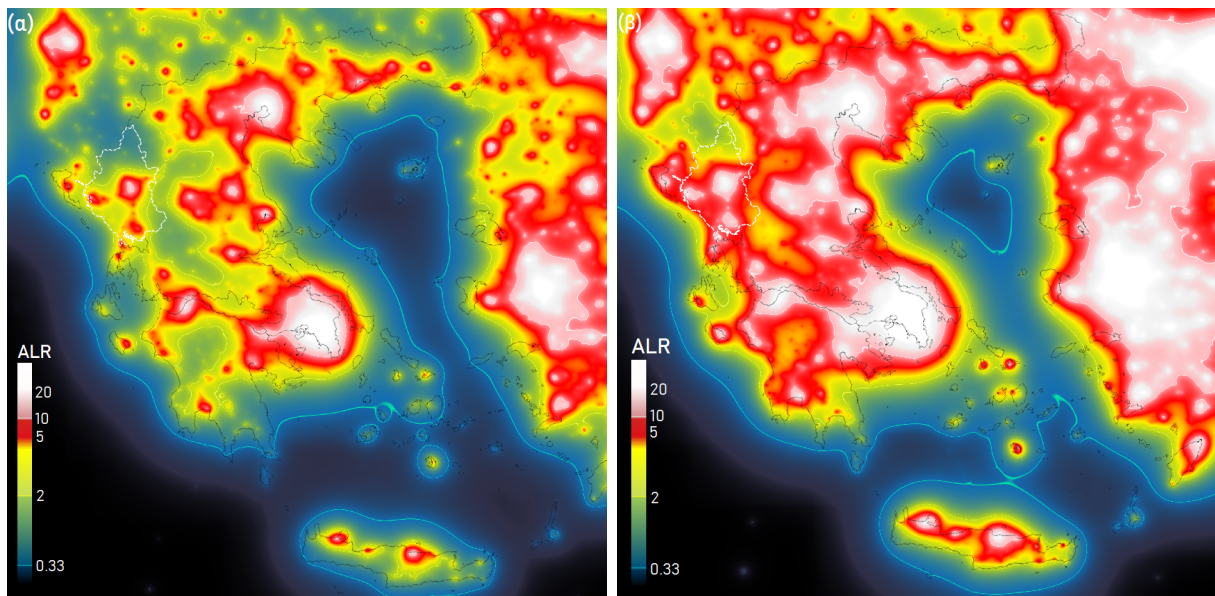
Σχήμα 4.6: (α) Τα επιλεγμένα πολύγωνα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή δεδομένων που αφορούν την Εγνατία και την Ιονία Οδό και τους τέσσερις μεγαλύτερους σε έκτομπές δήμους. Διακρίνονται τα φωτιζόμενα και σκοτεινά τμήματα κάθε οδού. (β) Τα αστικά κέντρα προκαλούν τη μεγαλύτερη φωτορύπανση, η οποία επεκτείνεται από τους δύο μεγάλους αυτοκινητόδρομους.

4.4 Πρόβλεψη Μετάβασης σε LED

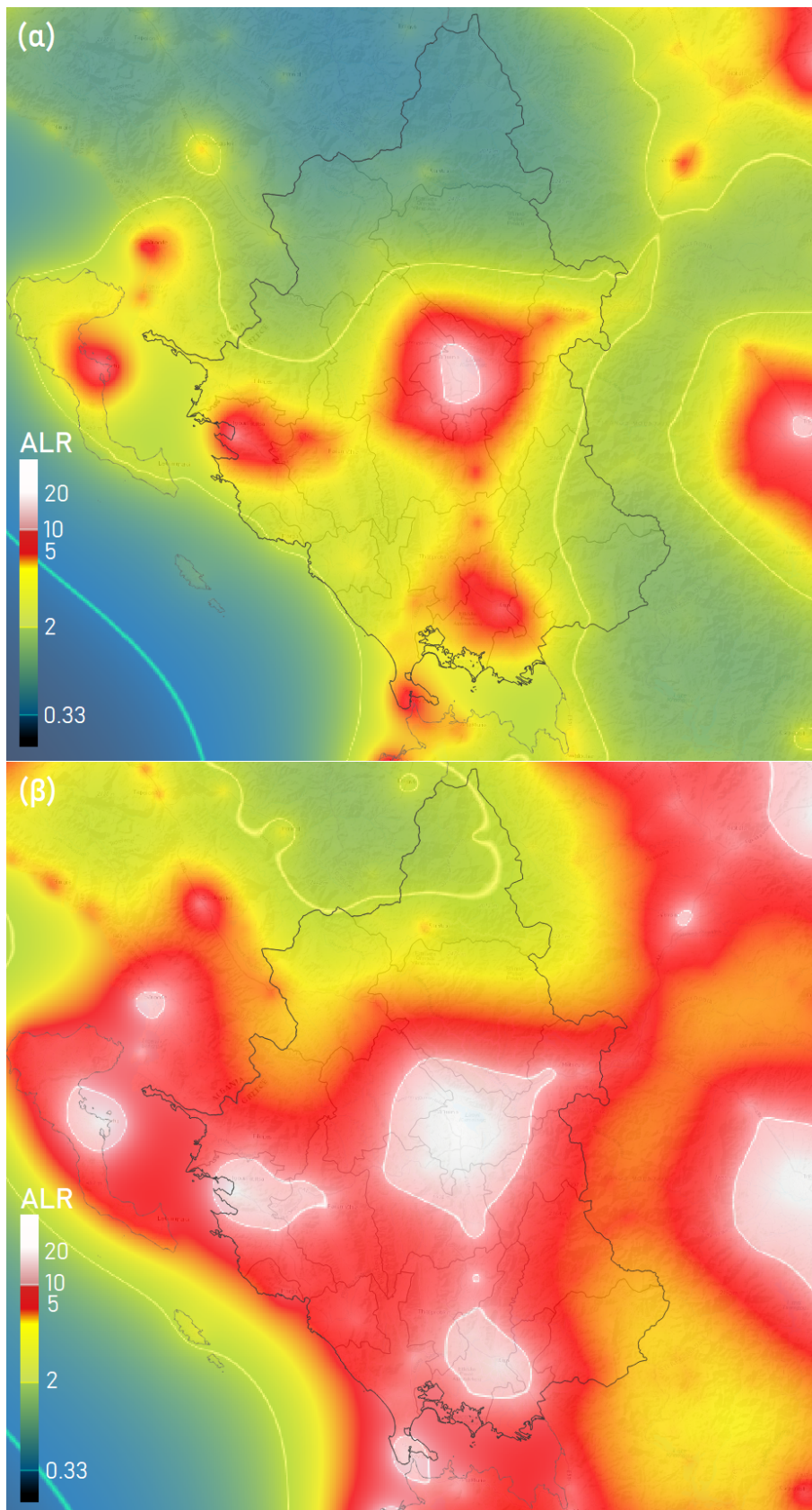
Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 1.5.3, μια λευκή λυχνία LED 4000K είναι περίπου 2.5 φορές πιο ρυπογόννη από μια λυχνία υψηλής πίεσης νατρίου (HPS), παράλληλα με εντονότερη διάδοση της ακτινοβολίας σε καθαρή ατμόσφαιρα όπως στην περίπτωση $K=0.35$ (έως και 3 φορές περισσότερη σε σχέση με την περίπτωση $K=1$) [17]. Αυτό συνεπάγεται ότι εάν δεν περιοριστεί η εκπομπή μπλε φωτός, μια μετάβαση προς αυτήν την τεχνολογία μπορεί να αναμένεται να υπερδιπλασιάσει τη φωτεινότητα του νυχτερινού ουρανού όπως γίνεται αντιληπτή από τα προσαρμοσμένα στο σκοτάδι μάτια μας. Για μια στοιχειώδη πρόβλεψη του χάρτη οικολογικής φωτορύπανσης σε μια ενδεχόμενη μετάβαση σε φωτισμό LED, κάναμε δύο παραδοχές:

1. Η Περιφέρεια Ηπείρου, όπως και όλος ο ελλαδικός χώρος, αποτελούνται καθολικά από λαμπτήρες HPS, υποεκτιμώντας ίσως το πραγματικό μέγεθος της αύξησης της φωτορύπανσης κατά τη μετάβαση σε λευκά LED.
2. Οι λαμπτήρες στο σύνολό τους αντικαθιστούνται με λευκά φωσφορούχα LED 4000K, διατηρώντας την ίδια φωτοπική ροή, υπερεκτιμώντας την πραγματική αύξηση της φωτορύπανσης από μια πιθανή μετάβαση σε λευκά LED χαμηλότερων θερμοκρασιών ή άλλου τύπου LED χωρίς μπλε εκπομπές.

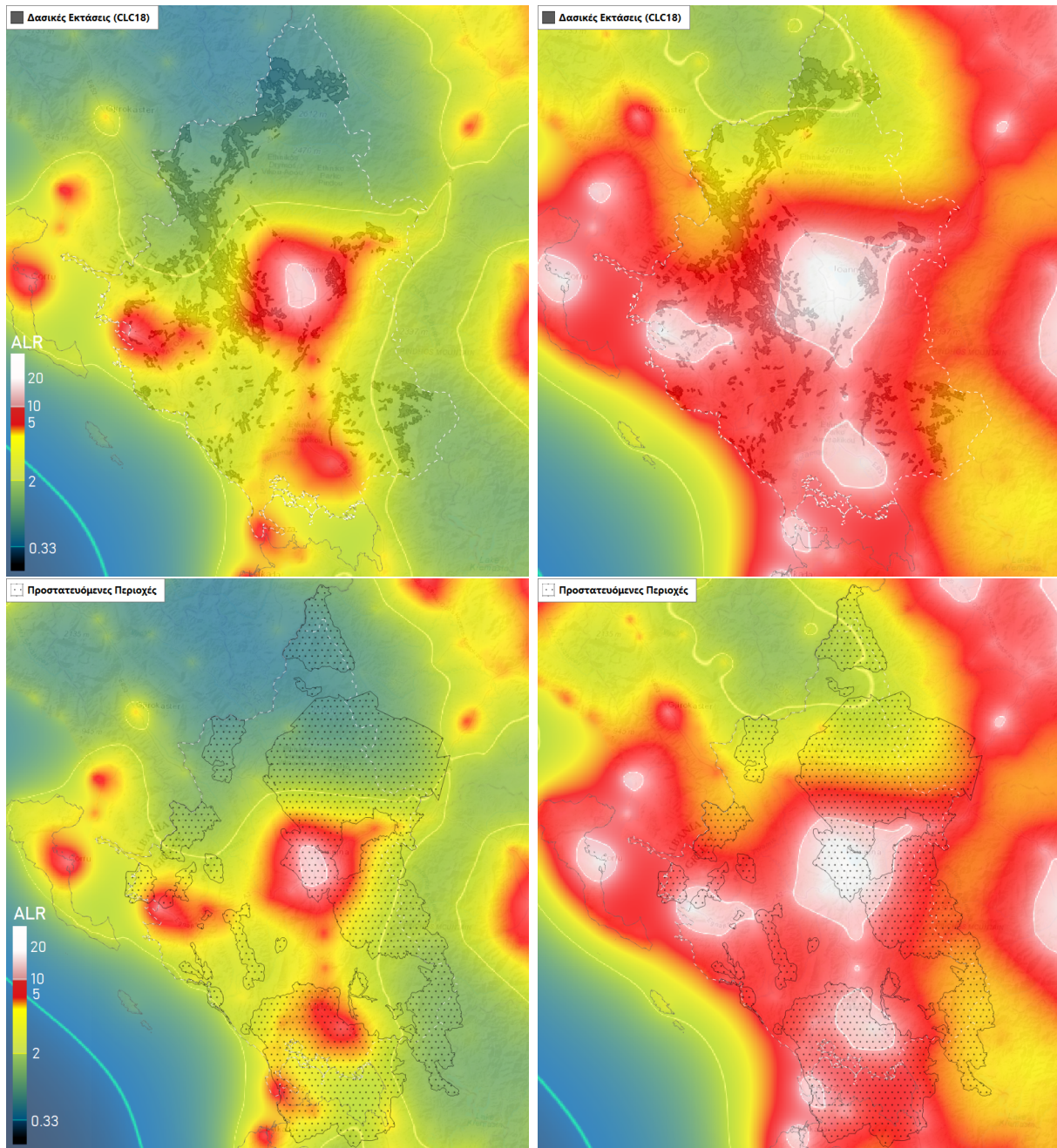
Οι χάρτες στα Σχ. 4.7 και Σχ. 4.8 απεικονίζουν αύξηση του δείκτη ALR κατά 2.5 φορές σε σχέση με τον χάρτη του Σχ. 4.2.



Σχήμα 4.7: (α) Χάρτης ALR για την Ελλάδα στο κανάλι V για τον Απρίλιο του 2020. (β) Πρόβλεψη του χάρτη ($\times 2.5$) ύστερα από τη μετάβαση σε λευκά φωσφορούχα LED με CCT 4000K, διατηρώντας σταθερή τη φωτοπική ροή των υπάρχοντων λαμπτήρων.

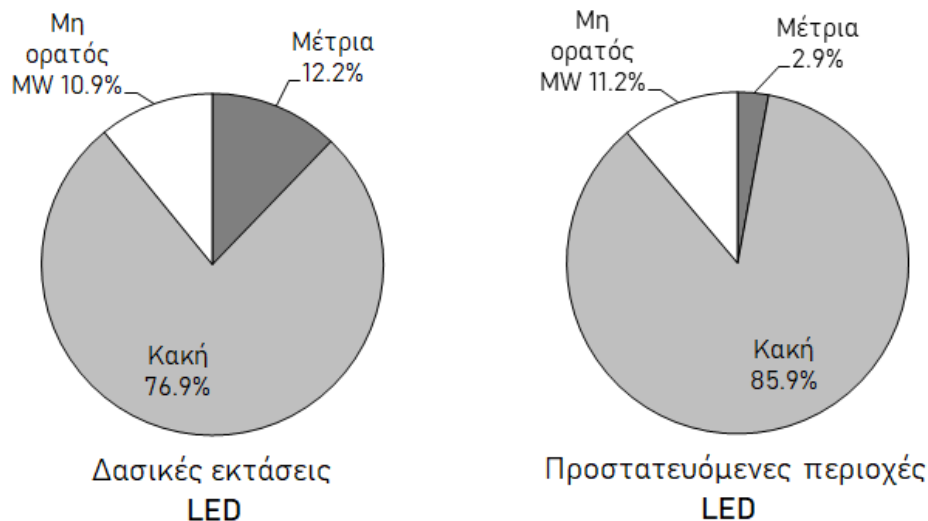


Σχήμα 4.8: (α) Χάρτης ALR για την Περιφέρεια Ηπείρου στο κανάλι V για τον Απρίλιο του 2020. (β) Πρόβλεψη του χάρτη ($\times 2.5$) ύστερα από τη μετάβαση σε λευκά φωσφορούχα LED με CCT 4000K, διατηρώντας σταθερή τη φωτοπική ροή των υπάρχοντων λαμπτήρων.



Σχήμα 4.9: Η επιρροή της μετάβασης σε λευκά LED 4000K στον δείκτη ALR για (α) τις μη ευαίσθητες δασικές εκτάσεις και (β) τις προστατευόμενες περιοχές.

Στην περίπτωση LED φωτισμού, παρατηρείται αύξηση των δασικών εκτάσεων με τουλάχιστον κακή ποιότητα ουρανού κατά 88.4%, ενώ για τις προστατευόμενες περιοχές κατά 81.8%, υπαγόμενες περίπου στο σύνολό τους στις δύο τελευταίες κατηγορίες (βλ. Σχ. 4.10).



Σχήμα 4.10: Ποσοστιαία (%) κατανομή της ποιότητας ουρανού κατά έκταση για το σύνολο των μη ευαίσθητων δασικών εκτάσεων και των προστατευόμενων περιοχών, σε περίπτωση ολικής μετάβασης σε λευκά LED 4000K.

4.4.1 Περιορισμοί Λόγω Φασματικής Απόκρισης Αισθητήρα

Ο αισθητήρας VIIRS-DNB, όπως αναφέραμε στην παράγραφο 3.2.2, τέθηκε σε λειτουργία την περίοδο που άρχισε να εντείνεται χρήση των LED για φωτισμό εξωτερικών χώρων [17]. Για το λόγο αυτό, δεν είναι ευαίσθητος στις φασματικές περιοχές που τα λευκά LED που εγκαθίστανται τώρα έχουν ισχυρές εκπομπές, δηλαδή στο μπλε εύρος του ορατού φάσματος κάτω από τα 500 nm, αλλά στο κοντινό υπέρυθρο (Σχ. 3.4). Αν και ένα όργανο με ευαισθησία παρόμοια με εκείνη του ανθρώπινου ματιού είναι προτιμότερο, όλα τα διαθέσιμα δεδομένα παγκόσμιας απεικόνισης χαμηλού φωτισμού (όπως και του DNB-OLS) πάσχουν από το ίδιο πρόβλημα. Αυτό αποτρέπει έναν καλό διαχρονικό έλεγχο της εξέλιξης της φωτορύπανσης σε αυτή τη σημαντική φασματική ζώνη, καθιστώντας τα παρόντα όργανα ανίκανα να λάβουν την πραγματική κατάσταση των επιπέδων φωτισμού ανά περιοχή. Με άλλα λόγια, σε μια πιθανή αντικατάσταση όλων των φωτιστικών σωμάτων της περιφέρειας με λευκά LED, τα δορυφορικά δεδομένα φωτεινής ακτινοβολίας δε θα αποτυπώνουν ορθά την αύξηση στην σκοτοπική ζώνη και το μπλε εύρος του φάσματος, υποδεικνύοντας ψευδώς μείωση της φωτορύπανσης, ενώ στην πραγματικότητα η παρατηρούμενη φωτεινότητα του ουράνιου θόλου θα έχει αυξηθεί. Συνεπώς, ένας νέος χάρτης φωτορύπανσης δε θα μοιάζει με τον απεικονιζόμενο στην παρούσα εργασία, αλλά πιθανώς θα παρουσιάζει μικρότερες τιμές ακόμη και από τον χάρτη του Σχ. 4.2.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και Προοπτικές

Παρόλο που η επίδραση της φωτορύπανσης στην αστρονομική παρατήρηση μελετάται εκτενώς, οι οικολογικές επιπτώσεις λαμβάνουν ελάχιστη προσοχή, ενώ πολλές φορές είναι έως και καθ' όλα άγνωστες. Αναγνωρίζοντας την επιρροή που μπορεί να έχει η φωτορύπανση στα οικοσυστήματα, είναι αναγκαία η χωρική και ποσοτική ανάλυσή της, ιδιαίτερα όσον αφορά ευαίσθητα φυσικά συστήματα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά η ποσοτικοποίηση και η απεικόνιση της χωρικής διακύμανσης της οικολογικής φωτορύπανσης για την Περιφέρεια Ηπείρου, δίνοντας μια καλύτερη εικόνα για την παρούσα κατάσταση στα επίπεδα φωτισμού των προστατευόμενων περιοχών και τις μεγαλύτερες πηγές φωτορύπανσης. Εκτιμώντας την παρούσα κατάσταση στην Περιφέρεια Ηπείρου, τα τέσσερα μεγάλα αστικά κέντρα σε συνδυασμό με τους δύο αυτοκινητόδρομους (Εγνατία και Ιονία Οδός) οδηγούν σε κακή ποιότητα ουρανού πάνω από τη μισή περιφέρεια, επηρεάζοντας σημαντικά και τις μη ευαίσθητες δασικές περιοχές και την βιοποικιλότητά τους. Όσον αφορά τις προστατευόμενες περιοχές, έχουν υποστεί κατά το ήμισυ μεγάλη μεταβολή των φυσικών τους επιπέδων φωτισμού. Ενώ οι βορειότερες βρίσκονται ακόμη σε σχετικά καλά κατάσταση, οι γειτονικές σε πόλεις ή οδούς περιοχές δέχονται σημαντικές ποσότητες φωτεινής ακτινοβολίας, καθιστώντας απειλούμενες τις ισορροπίες των οικοσυστημάτων του μεγαλύτερου μέρους των περιοχών Natura και των μισών Καταφυγίων Άγριας Ζωής.

Η συνεχής επέκταση των αστικών κέντρων και η ολοκλήρωση της φωταγώγησης των αυτοκινητόδρομων είναι δεδομένο πως θα οδηγήσει σε περαιτέρω εισχώρηση της φωτορύπανσης σε περιοχές που μέχρι σήμερα διατηρούσαν φυσικά επίπεδα φωτισμού. Πέραν όμως της αύξησης στην έκταση και την πυκνότητα του τεχνητού φωτισμού, οι μεταβολές στη φασματική σύνθεση του εκπνευόμενου φωτός και συγκεκριμένα οι περισσότερες εκπομπές στο μπλε εύρος του φάσματος, θα έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής φωτορύπανσης λόγω μεγαλύτερης διάχυσης του φωτός, έως και 2.5 φορές στην περίπτωση χρήσης λευκών φωσφορούχων LED. Επιπλέον, ενδέχεται να οδηγήσουν σε αλλαγή του είδους των επιρροών που θα βιώσουν τα διάφορα οικοσυστήματα, όπως για παράδειγμα στην αλληλεπίδραση μεταξύ ειδών. Ταυτόχρονα, θα είναι πολύ δυσκολότερη

η εκτίμηση των επιπέδων φωτισμού λόγω της σχεδόν μηδαμινής φασματικής απόκρισης των υπάρχοντων αισθητήρων σε αυτό το εύρος του φάσματος.

5.1 Βελτίωση της Μοντελοποίησης

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω, είναι αναγκαία η συνεχής διαχρονική εκτίμηση των μεταβολών στα φωτιστικά σώματα της Περιφέρειας και των επιμέρους δήμων. Για την καλύτερη εφαρμογή του μοντέλου SALR, σημαντικές βελτιώσεις μπορούν να επιτευχθούν κάνοντας χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους για την εισαγωγή φαινομένων σκίασης από μεγάλους ορεινούς όγκους. Επιπλέον, συνίσταται η λήψη επιτόπιων μετρήσεων για την καλύτερη εκτίμηση της συνάρτησης $\alpha(d)$ και την ακριβέστερη βαθμονόμηση των δεδομένων για την Περιφέρεια Ηπείρου αλλά και την εκάστοτε περιοχή για την οποία πιθανώς εφαρμοστεί το μοντέλο, κάτι που δεν ήταν δυνατό κατά τη γραφή της παρούσας εργασίας.

Εύλογη θα ήταν και η χρήση πιο σύνθετων μοντέλων διάδοσης και σκέδασης φωτός από τεχνητές πηγές, όπως το μοντέλο «ILLUMINA» [154–156], ένα λογισμικό ανοικτού κώδικα στο οποίο εισάγονται αναλυτικά όλα τα στοιχεία μιας περιοχής (που αντιπροσωπεύεται από κάθε pixel) που ενυπάρχουν στο μοντέλο του Garstang, και επιπλέον: χαρακτηριστικά (φασματικές εκπομπές, γωνιακή κατανομή, απόσταση από το έδαφος) όλων των φωτιστικών σωμάτων (βελτιώνοντας σημαντικά την ελλειπή φασματική απόκριση του αισθητήρα VIIRS-DNB), σκεδάσεις πρώτου και δευτέρου βαθμού ακόμη και μετά την ανάκλαση από το έδαφος, η τοπογραφία (υψόμετρο, ανακλαστικότητα εδάφους, ορεογραφία), χαρακτηριστικά των εμποδίων όπως βλάστηση και κτίρια (μέγεθος, πυκνότητα, μέση απόσταση από το έδαφος και από τις φωτεινές πηγές) και προφίλ νέφους (απόσταση από το έδαφος, ημισφαιρική ανακλαστικότητα), προσθήκη που συμπεριλαμβάνει τη σημαντική συνεισφορά των σύννεφων στη διάδοση του φωτός [157].

5.2 Προτάσεις για τον Εκσυγχρονισμό του Φωτισμού και την Ορθότερη Μετάβαση σε LED

Παρότι είναι εύλογο πως η λήψη αποφάσεων στο άμεσο μέλλον θα γίνεται με βασικό κριτήριο την εξοικονόμηση ενέργειας και επομένως την μείωση κόστους, είναι απαραίτητο να βασιστεί και σε επιπλέον κριτήρια. Πλέον είναι ξεκάθαρο πως κάθε απόφαση πρέπει να συνοδεύεται από μια πρόβλεψη για την πιθανή επιρροή στο φυσικό περιβάλλον και τις ισορροπίες που το διέπουν. Συνεπώς, είναι σκόπιμο να εξεταστούν οι πιθανές δράσεις για την πρόληψη ή τη μείωση των επιπτώσεων της οικολογικής φωτορύπανσης, μελετώντας την παρούσα γνώση για τα αποτελέσματά τους, αλλά και να προσδιοριστούν οι μελλοντικές έρευνες που θα οδηγήσουν στην καλύτερη διαχείριση του προβλήματος. Η πρότερη διεξαγωγή μιας αναλυτικής περιβαλλοντικής μελέτης, όπως στην περίπτωση

μιας μεταλλευτικής δραστηριότητας, είναι ζωτικής σημασίας για την ορθότερη μετάβαση σε φωτισμό LED και την ελαχιστοποίηση των οικολογικών επιπτώσεων. Το περιεχόμενο μιας τέτοιας μελέτης θα πρέπει να αναφέρεται όχι μόνο στην ενεργειακή απόδοση, αλλά και τη βελτίωση της χωρικής διάταξης και της λειτουργίας των μελλοντικών φωτιστικών σωμάτων στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής προστασίας. Δύο γενικοί κανόνες που μπορούν να ακολουθηθούν σε κάθε περίπτωση είναι οι εξής:

- Αποτροπή του φωτισμού περιοχών:

Πέρα από την ορθότερη τοποθέτηση και διαχείριση των φωτιστικών σωμάτων, η πρόληψη θα είναι πάντα το πιο αποτελεσματικό μέτρο από οικολογική άποψη, διατηρώντας και αυξάνοντας τις σκοτεινές περιοχές. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή συχνά έρχεται σε σύγκρουση με άλλους κοινωνικούς και οικονομικούς στόχους. Ορισμένες πιο μετριοπαθείς δράσεις μπορεί να αφορούν τη μείωση έντασης ή του πλήθους των φωτιστικών σωμάτων σε συγκεκριμένες τοποθεσίες που συνορεύουν με προστατευόμενες περιοχές και ταυτόχρονα έχουν μικρές ανάγκες και ζήτηση σε φωτισμό.

- Μείωση της φωτιστικής καταπάτησης:

Η ελαχιστοποίηση της φωτιστικής καταπάτησης σε περιοχές που δεν απαιτείται φωτισμός, πέραν του πολύτιμου οφέλους όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση, προσφέρει και βελτίωση της ετερογένειας του φωτισμού σε ήδη καλά φωτισμένες περιοχές, η οποία πιθανώς να παρέχει προς εκμετάλλευση σκοτεινά καταφύγια στους οργανισμούς που ζουν και δρουν σε αυτές. Η ετερογένεια αυτή μπορεί να επιτευχθεί με πιο αποτελεσματική χωρική διάταξη των φωτιστικών για την ελαχιστοποίηση του πλήθους τους και την εξάλειψη του πλεονάζοντος φωτισμού. Επιπλέον, μια ακόμη δράση αφορά την κατάλληλη θωράκιση των φωτιστικών σωμάτων για την ελαχιστοποίηση και ιδανικά την εξάλειψη των άμεσα ανοδικών εκπομπών. Μέσω της ευρείας χρήσης της θωράκισης, σε συνδυασμό με τη μείωση των συνολικών εκπομπών φωτός και τη χρήση κίτρινου ή πορτοκαλί χρώματος, είναι δυνατή η διατήρηση του φυσικού νυχτερινού χαρακτήρα των περιοχών κοντά σε πόλεις. Υπάρχουν ενδείξεις ότι η παραγόμενη φωτορύπανση μπορεί να μειωθεί ακόμη και σε ποσοστά 40% κατά τη μετάβαση από χρήση λαμπτήρων HPS/LPS σε λευκά LED χαμηλού CCT (3000K) με κατάλληλη θωράκιση των φωτιστικών σωμάτων [158].

Η μετάβαση από τις παλαιές τεχνολογίες φωτισμού σε ενεργειακά αποδοτικότερες λύσεις όπως τα λευκά LED φωσφόρου δύναται να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον, επεκτείνοντας το εύρος του φάσματος στο οποίο επιδρά η φωτορύπανση και αυξάνοντας τη φωτεινότητα του ουρανού κοντά στις αστικές περιοχές λόγω μεγαλύτερης σκέδασης Rayleigh των μικρών μηκών κύματος. Παρ' ότι όμως τα λευκά LED πιθανώς βλάψουν τα οικοσυστήματα εξαιτίας των εκπομπών στο μπλε, ταυτόχρονα έχουν το πλεονέκτημα της ευελιξίας. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον φωτισμό LED προσφέρουν εξαιρετικά μέσα για

καλύτερο έλεγχο του φωτεινού περιβάλλοντος όσον αφορά τα εκπεμπόμενα μήκη κύματος, καθώς και τη ρύθμιση της χρονικής τους λειτουργίας και της έντασής τους. Μέσω συνδυασμού των δυνατοτήτων αυτών και της καλύτερης κατανόησης των επιδράσεων της οικολογικής φωτορύπανσης, υπάρχει μια προοπτική αντιμετώπισης σημαντικού μέρους τους. Στην περίπτωση που η Περιφέρεια Ηπείρου ή/και ο κάθε επιμέρους δήμος προχωρήσει μελλοντικά στη μετάβαση αυτή, είναι απαραίτητη η συστηματοποίηση συγκεκριμένων ενεργειών που θα συνεισφέρουν στη συνολική μείωση της φωτορύπανσης:

- Αλλαγή του φάσματος εκπομπής:

Το ζήτημα της εκπομπής στο μπλε εύρος του φάσματος είναι δυνατόν να ξεπεραστεί ολοκληρωτικά κάνοντας χρήση μονοχρωματικών LED με πιο «στενά» φάσματα εκπομπής, όπως τα Amber LED ή PCA LED. Εναλλακτικά, μία λύση χαμηλότερου κόστους είναι η τοποθέτηση οπτικών φίλτρων αποκοπής μικρών μηκών κύματος (FLED). Στην περίπτωση επιλογής λευκών φωσφορούχων LED, συνιστώνται τα LED μικρότερων CCT, ιδιαίτερα των 3000K και κάτω. Ίσως η καλύτερη επιλογή που συνδυάζει χαμηλό κόστος, μικρή ενεργειακή κατανάλωση και την ελάχιστη επίδραση στα επίπεδα φωτισμού είναι ένας σύστημα λευκών PC LED τοποθετημένων μαζί με FLED, και τη μεταξύ τους εναλλαγή με την πάροδο της νύχτας.

- Ρύθμιση της διάρκειας φωτισμού:

Ο χρονικός περιορισμός της λειτουργίας των φωτιστικών σωμάτων κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι ένας τρόπος περιορισμού της φωτορύπανσης. Ωστόσο, μπορεί να έχει περιορισμένη επιρροή στις οικολογικές επιπτώσεις, καθώς οι ώρες αιχμής της ζήτησης συμπίπτουν με την κορύφωση των δραστηριοτήτων πολλών νυχτερινών ζώων, οπότε ακόμη και μικρές περίοδοι φωτός πιθανώς επαρκούν για να διαταράξουν τον φωτοπεριορισμό και τα κιρκάδια ρολόγια των οργανισμών. Παρ' όλα αυτά, τα ευέλικτα συστήματα ελέγχου, συμπεριλαμβανομένου ενός πλήρως ελεγχόμενου οδοφωτισμού, μπορεί να είναι χρήσιμα εργαλεία για τον μετριασμό των οικολογικών επιπτώσεων του τεχνητού νυχτερινού φωτισμού, παρέχοντας σκοτεινές περιόδους επαρκείς για την εύρυθμη λειτουργία των φυσικών διαδικασιών των οικοσυστημάτων.

- Ρύθμιση της έντασης φωτισμού:

Η μείωση της έντασης του φωτισμού, όπου είναι δυνατόν, θα ελαττώσει την κατανάλωση ενέργειας συμβάλλοντας παράλληλα στον περιορισμό της φωτορύπανσης σε τοπικό επίπεδο, μειώνοντας το skyglow και την καταπάτηση λόγω άμεσου και ανακλώμενου φωτός σε μη φωτιζόμενες περιοχές. Μπορεί επιπλέον να πραγματοποιηθεί συνδυασμός της ρύθμισης έντασης και της χρονικής λειτουργίας, με σταδιακή αυξομείωση της έντασης κατά την μετάβαση από μέρα σε νύχτα και αντιστρόφως.

Βιβλιογραφία

- [1] C. Dong, Y. Fu, G. Liu, and H. Liu, “Low light intensity effects on the growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity, yield and quality of wheat (*triticum aestivum* L.) at different growth stages in BLSS,” *Advances in Space Research*, vol. 53, no. 11, pp. 1557–1566, Jun. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.02.004>
- [2] K. M. Aleric and L. K. Kirkman, “Growth and photosynthetic responses of the federally endangered shrub, *lindera melissifolia* (lauraceae), to varied light environments,” *American Journal of Botany*, vol. 92, no. 4, pp. 682–689, Apr. 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3732/ajb.92.4.682>
- [3] P. Kumar, S. Rehman, H. Sajjad, B. R. Tripathy, M. Rani, and S. Singh, “Analyzing trend in artificial light pollution pattern in india using NTL sensor’s data,” *Urban Climate*, vol. 27, pp. 272–283, Mar. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.005>
- [4] P. Cinzano, F. Falchi, and C. D. Elvidge, “Naked-eye star visibility and limiting magnitude mapped from DMSP-OLS satellite data,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 323, no. 1, pp. 34–46, May 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04213.x>
- [5] T. W. Davies, J. Bennie, R. Inger, and K. J. Gaston, “Artificial light alters natural regimes of night-time sky brightness,” *Scientific Reports*, vol. 3, no. 1, Apr. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/srep01722>
- [6] J. Bennie, T. W. Davies, R. Inger, and K. J. Gaston, “Mapping artificial lightscapes for ecological studies,” *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 5, no. 6, pp. 534–540, Apr. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/2041-210x.12182>
- [7] J. Bennie, T. W. Davies, D. Cruse, R. Inger, and K. J. Gaston, “Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 370, no. 1667, p. 20140131, May 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0131>

- [8] K. J. Gaston, J. Bennie, T. W. Davies, and J. Hopkins, "The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal," *Biological Reviews*, vol. 88, no. 4, pp. 912–927, Apr. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/brv.12036>
- [9] F. Falchi, R. Furgoni, T. Gallaway, N. Rybnikova, B. Portnov, K. Baugh, P. Cinzano, and C. Elvidge, "Light pollution in USA and Europe: The good, the bad and the ugly," *Journal of Environmental Management*, vol. 248, p. 109227, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.128>
- [10] C. Aubrecht, C. Elvidge, D. Ziskin, T. Longcore, and C. Rich, "'when the lights stay on' - a novel approach to assessing human impact on the environment," *Earthzine*, vol. 1, 12 2008.
- [11] Secretariat of the Convention on Biological Diversity, *Sustaining life on Earth: how the Convention on Biological Diversity promotes nature and human well-being*, Montreal, Quebec Canada, 2000.
- [12] Z. Wang, C. Shaaf, A. Lattanzio, D. Carrer, I. Grant, M. Román, F. Camacho de Coca, Y. Yu, J. Sánchez-Zapero, and J. Nickeson, "Global surface albedo product validation best practices protocol," *Land Prod. Valid. Subgr. (WGCV/CEOS)*, Jan. 2019.
- [13] GCOS-92, "Implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC," 2004.
- [14] R. A. McClatchey, R. W. Fenn, J. E. A. Selby, F. E. Volz, and J. S. Garing, *Handbook of Optics*. W. G. Driscoll and W. Vaughan, 1978.
- [15] A. Ketvirtis, *Highway Lighting Engineering*. Foundation of Canada Engineering Corporation, 1967.
- [16] A. Stockman and L. T. Sharpe, "Into the twilight zone: the complexities of mesopic vision and luminous efficiency," *Ophthalmic and Physiological Optics*, vol. 26, no. 3, pp. 225–239, May 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2006.00325.x>
- [17] F. Falchi, P. Cinzano, C. D. Elvidge, D. M. Keith, and A. Haim, "Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility," *Journal of Environmental Management*, vol. 92, no. 10, pp. 2714–2722, Oct. 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.029>
- [18] P. Cinzano, F. Falchi, C. D. Elvidge, and K. E. Baugh, "The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite operational linescan system measurements," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 318, no. 3, pp. 641–657, Nov. 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03562.x>

- [19] J. Hollan, “What is light pollution, and how do we quantify it?” Darksky2008 conference paper, Vienna, Aug. 2008. [Online]. Available: http://amper.ped.muni.cz/light/lp_what_is.pdf
- [20] C. C. M. Kyba and F. Hölker, “Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes?” *Landscape Ecology*, vol. 28, no. 9, pp. 1637–1640, Sep. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9936-3>
- [21] IDA, LoNNe, “Artificial Light at Night (ALAN) Research Literature Database,” Jan. 2020. [Online]. Available: <http://alandb.darksky.org/index.php>
- [22] F. Falchi, P. Cinzano, D. Duriscoe, C. C. M. Kyba, C. D. Elvidge, K. Baugh, B. A. Portnov, N. A. Rybnikova, and R. Furgoni, “The new world atlas of artificial night sky brightness,” *Science Advances*, vol. 2, no. 6, p. e1600377, Jun. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>
- [23] R. H. Garstang, “Mount Wilson Observatory: The sad story of light pollution,” *The Observatory*, vol. 124, pp. 14–21, 01 2004.
- [24] F. Hölker, T. Moss, B. Griefahn, W. Kloas, C. C. Voigt, D. Henckel, A. Hänel, P. M. Kappeler, S. Völker, A. Schwope, S. Franke, D. Uhrlandt, J. Fischer, R. Klenke, C. Wolter, and K. Tockner, “The dark side of light: A transdisciplinary research agenda for light pollution policy,” *Ecology and Society*, vol. 15, no. 4, 2010. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/26268230>
- [25] C. C. M. Kyba, T. Kuester, A. S. de Miguel, K. Baugh, A. Jechow, F. Hölker, J. Bennie, C. D. Elvidge, K. J. Gaston, and L. Guanter, “Artificially lit surface of earth at night increasing in radiance and extent,” *Science Advances*, vol. 3, no. 11, p. e1701528, Nov. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701528>
- [26] T. Longcore and C. Rich, “Ecological light pollution,” *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 2, no. 4, pp. 191–198, May 2004. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:elp\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:elp]2.0.co;2)
- [27] J. E. Bortle, “Introducing the Bortle dark-sky scale,” *S&T*, pp. 126–129, Feb. 2001.
- [28] O. Dunnett, “Contested landscapes: The moral geographies of light pollution in Britain,” *Cultural Geographies*, vol. 22, no. 4, p. 619–636, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/1474474014542746>
- [29] F. Hölker, C. Wolter, E. K. Perkin, and K. Tockner, “Light pollution as a biodiversity threat,” *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 25, no. 12, pp. 681–682, Dec. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>

- [30] K. J. Gaston, T. W. Davies, J. Bennie, and J. Hopkins, "REVIEW: Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: options and developments," *Journal of Applied Ecology*, vol. 49, no. 6, pp. 1256–1266, Nov. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02212.x>
- [31] E. K. Perkin, F. Hölker, K. Tockner, and J. S. Richardson, "Artificial light as a disturbance to light-naïve streams," *Freshwater Biology*, vol. 59, no. 11, pp. 2235–2244, Aug. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/fwb.12426>
- [32] C. Rich and T. Longcore, *Ecological consequences of artificial night lighting*. Washington, D.C., DC: Island Press, 2005.
- [33] K. J. Gaston, J. P. Duffy, S. Gaston, J. Bennie, and T. W. Davies, "Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences," *Oecologia*, vol. 176, no. 4, pp. 917–931, Sep. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00442-014-3088-2>
- [34] K. J. Navara and R. J. Nelson, "The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences," *Journal of Pineal Research*, vol. 43, no. 3, pp. 215–224, Oct. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1600-079x.2007.00473.x>
- [35] M. S. C. Bruce-White, *A Review of the Impact of Artificial Light on Invertebrates*. Peterborough: Buglife, 2011.
- [36] K. J. Gaston, T. W. Davies, S. L. Nedelec, and L. A. Holt, "Impacts of artificial light at night on biological timings," *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 48, no. 1, pp. 49–68, Nov. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022745>
- [37] M. L. Corre, A. Ollivier, S. Ribes, and P. Jouventin, "Light-induced mortality of petrels: a 4-year study from réunion island (indian ocean)," *Biological Conservation*, vol. 105, no. 1, pp. 93–102, May 2002. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/s0006-3207\(01\)00207-5](https://doi.org/10.1016/s0006-3207(01)00207-5)
- [38] H. Poot, B. J. Ens, H. de Vries, M. A. H. Donners, M. R. Wernand, and J. M. Marquenie, "Green light for nocturnally migrating birds," *Ecology and Society*, vol. 13, no. 2, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5751/es-02720-130247>
- [39] B. Kempenaers, P. Borgström, P. Loës, E. Schlicht, and M. Valcu, "Artificial night lighting affects dawn song, extra-pair siring success, and lay date in songbirds," *Current Biology*, vol. 20, no. 19, pp. 1735–1739, Oct. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.08.028>

- [40] J. H. Wang, L. C. Boles, B. Higgins, and K. J. Lohmann, "Behavioral responses of sea turtles to lightsticks used in longline fisheries," *Animal Conservation*, vol. 10, no. 2, pp. 176–182, May 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2006.00085.x>
- [41] G. Perry, B. Buchanan, R. Fisher, M. Salmon, and S. Wise, "Effects of artificial night lighting on amphibians and reptiles in urban environments," 01 2008.
- [42] B. L. Bird, L. C. Branch, and D. L. Miller, "Effects of coastal lighting on foraging behavior of beach mice," *Conservation Biology*, vol. 18, no. 5, pp. 1435–1439, 2004. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/3589011>
- [43] A. Svensson and J. Rydell, "Mercury vapour lamps interfere with the bat defence of tympanate moths (operophteraspp.; geometridae)," *Animal Behaviour*, vol. 55, no. 1, pp. 223–226, Jan. 1998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1006/anbe.1997.0590>
- [44] G. Eisenbeis, *Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany*. Island Press, 2006, pp. 281–304.
- [45] J. Bennie, T. W. Davies, D. Cruse, and K. J. Gaston, "Ecological effects of artificial light at night on wild plants," *Journal of Ecology*, vol. 104, no. 3, pp. 611–620, Feb. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12551>
- [46] R. H. French Constant, R. Somers-Yeates, J. Bennie, T. Economou, D. Hodgson, A. Spalding, and P. K. McGregor, "Light pollution is associated with earlier tree budburst across the united kingdom," *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 283, no. 1833, p. 20160813, Jun. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0813>
- [47] M. Takagi and K. Gyokusen, "Light and atmospheric pollution affect photosynthesis of street trees in urban environments," *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 2, no. 3, pp. 167–171, Jan. 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1078/1618-8667-00033>
- [48] B. Zhang, H. Zhang, Q. Jing, and J. Wang, "Light pollution on the growth, physiology and chlorophyll fluorescence response of landscape plant perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.)," *Ecological Indicators*, vol. 115, p. 106448, Aug. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106448>
- [49] A. G. del Campo, J. F. Perez, P. Cañizares, M. A. Rodrigo, F. J. Fernandez, and J. Lobato, "Characterization of light/dark cycle and long-term performance test in a photosynthetic microbial fuel cell," *Fuel*, vol. 140, pp. 209–216, Jan. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.087>
- [50] S. P. Long, S. Humphries, and P. G. Falkowski, "Photoinhibition of photosynthesis in nature," *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, vol. 45,

- no. 1, pp. 633–662, Jun. 1994. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.45.060194.003221>
- [51] H. Smith, “Phytochromes and light signal perception by plants—an emerging synthesis,” *Nature*, vol. 407, no. 6804, pp. 585–591, Oct. 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/35036500>
- [52] S. Zhang, K. Ma, and L. Chen, “Response of photosynthetic plasticity of paeonia suffruticosa to changed light environments,” *Environmental and Experimental Botany*, vol. 49, no. 2, pp. 121–133, Apr. 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/s0098-8472\(02\)00063-1](https://doi.org/10.1016/s0098-8472(02)00063-1)
- [53] E. B. Matzke, “The effect of street lights in delaying leaf-fall in certain trees,” *Am J Bot.*, vol. 23, pp. 446–452, 1936.
- [54] Bong-Ho Han, Jong-Yup Kim, Jeong-In Kwak, Tae-Young Choi, “Correlation between the illuminance and the flowering and leaf growth of trees at night—in case of downtown from Jamsil Station to Olympic Park, Seoul,” *Korean Journal of Environment and Ecology*, vol. 29, p. 441–453, 2015.
- [55] N. Meravi and S. Prajapati, “Effect street light pollution on the photosynthetic efficiency of different plants,” *Biological Rhythm Research*, vol. 51, pp. 1–9, 09 2018.
- [56] E. Knop, L. Zoller, R. Ryser, C. Gerpe, M. Hörler, and C. Fontaine, “Artificial light at night as a new threat to pollination,” *Nature*, vol. 548, no. 7666, pp. 206–209, Aug. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/nature23288>
- [57] C. J. Macgregor, M. J. O. Pocock, R. Fox, and D. M. Evans, “Effects of street lighting technologies on the success and quality of pollination in a nocturnally pollinated plant,” *Ecosphere*, vol. 10, no. 1, Jan. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/ecs2.2550>
- [58] C. Minnaar, J. G. Boyles, I. A. Minnaar, C. L. Sole, and A. E. McKechnie, “Stacking the odds: light pollution may shift the balance in an ancient predator-prey arms race,” *Journal of Applied Ecology*, vol. 52, no. 2, pp. 522–531, Dec. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12381>
- [59] M. A. Ditmer, D. C. Stoner, C. D. Francis, J. R. Barber, J. D. Forester, D. M. Choate, K. E. Ironside, K. M. Longshore, K. R. Hersey, R. T. Larsen, B. R. McMillan, D. D. Olson, A. M. Andreasen, J. P. Beckmann, P. B. Holton, T. A. Messmer, and N. H. Carter, “Artificial nightlight alters the predator–prey dynamics of an apex carnivore,” *Ecography*, vol. 44, no. 2, pp. 149–161, Oct. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/ecog.05251>

- [60] A. Peters and K. J. F. Verhoeven, "Impact of artificial lighting on the seaward orientation of hatchling loggerhead turtles," *Journal of Herpetology*, vol. 28, no. 1, p. 112, Mar. 1994. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2307/1564691>
- [61] M. Moore, S. Pierce, H. Walsh, K. Kvalvik, and J. Lim, "Urban light pollution alters the diel vertical migration of *Daphnia*," vol. 27, 01 2001.
- [62] J. Lorne and M. Salmon, "Effects of exposure to artificial lighting on orientation of hatchling sea turtles on the beach and in the ocean," *Endangered Species Research*, vol. 3, pp. 23–30, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3354/esr003023>
- [63] E. L. Stone, G. Jones, and S. Harris, "Street lighting disturbs commuting bats," *Current Biology*, vol. 19, no. 13, pp. 1123–1127, Jul. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.05.058>
- [64] N. J. Willmott, J. Henneken, M. A. Elgar, and T. M. Jones, "Guiding lights: Foraging responses of juvenile nocturnal orb-web spiders to the presence of artificial light at night," *Ethology*, vol. 125, no. 5, pp. 289–297, Mar. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/eth.12852>
- [65] R. G. Dwyer, S. Bearhop, H. A. Campbell, and D. M. Bryant, "Shedding light on light: benefits of anthropogenic illumination to a nocturnally foraging shorebird," *Journal of Animal Ecology*, vol. 82, no. 2, pp. 478–485, Nov. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12012>
- [66] B. W. Buchanan, "Effects of enhanced lighting on the behaviour of nocturnal frogs," *Animal Behaviour*, vol. 45, no. 5, pp. 893–899, May 1993. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1006/anbe.1993.1109>
- [67] J. Rydell, "Seasonal use of illuminated areas by foraging northern bats *Myotis nilssonii*," *Ecography*, vol. 14, no. 3, pp. 203–207, Jul. 1991. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1991.tb00653.x>
- [68] J. Negro, J. Bustamante, C. Melguizo, J. Ruiz, and J. M. Grande, "Nocturnal activity of lesser kestrels under artificial lighting conditions in seville, spain," *Journal of Raptor Research*, vol. 34, pp. 327–329, 12 2000.
- [69] C. D. Santos, A. C. Miranda, J. P. Granadeiro, P. M. Lourenço, S. Saraiva, and J. M. Palmeirim, "Effects of artificial illumination on the nocturnal foraging of waders," *Acta Oecologica*, vol. 36, no. 2, pp. 166–172, Mar. 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2009.11.008>
- [70] L. Ashkenazi and A. Haim, "Light interference as a possible stressor altering HSP70 and its gene expression levels in brain and hepatic tissues of golden spiny mice,"

- Journal of Experimental Biology*, vol. 215, no. 22, pp. 4034–4040, Aug. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1242/jeb.073429>
- [71] A. Brüning, W. Kloas, T. Preuer, and F. Hölker, “Influence of artificially induced light pollution on the hormone system of two common fish species, perch and roach, in a rural habitat,” *Conservation Physiology*, vol. 6, no. 1, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/conphys/coy016>
- [72] B. Baker and J. Richardson, “The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, *rana clamitans melanota*,” *Canadian Journal of Zoology*, vol. 84, no. 10, pp. 1528–1532, Oct. 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1139/z06-142>
- [73] M. W. Miller, “Apparent effects of light pollution on singing behavior of american robins,” *The Condor*, vol. 108, no. 1, pp. 130–139, Feb. 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/condor/108.1.130>
- [74] J. Arendt, “Melatonin and the pineal gland: Influence on mammalian seasonal and circadian physiology,” *Reviews of reproduction*, vol. 3, pp. 13–22, 01 1998.
- [75] T. Le Tallec, M. Perret, and M. Théry, “Light pollution modifies the expression of daily rhythms and behavior patterns in a nocturnal primate,” *PloS one*, vol. 8, p. e79250, 11 2013.
- [76] J. Pulgar, D. Zeballos, J. Vargas, M. Aldana, P. H. Manriquez, K. Manriquez, P. A. Quijón, S. Widdicombe, C. Anguita, D. Quintanilla, and C. Duarte, “Endogenous cycles, activity patterns and energy expenditure of an intertidal fish is modified by artificial light pollution at night (ALAN),” *Environmental Pollution*, vol. 244, pp. 361–366, Jan. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.063>
- [77] C. Azam, I. L. Viol, Y. Bas, G. Zissis, A. Vernet, J.-F. Julien, and C. Kerbiriou, “Evidence for distance and illuminance thresholds in the effects of artificial lighting on bat activity,” *Landscape and Urban Planning*, vol. 175, pp. 123–135, Jul. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.02.011>
- [78] J. Q. Ouyang, M. de Jong, R. H. A. van Grunsven, K. D. Matson, M. F. Haussmann, P. Meerlo, M. E. Visser, and K. Spoelstra, “Restless roosts: Light pollution affects behavior, sleep, and physiology in a free-living songbird,” *Global Change Biology*, vol. 23, no. 11, pp. 4987–4994, Jun. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/gcb.13756>
- [79] K. Spoelstra, I. Verhagen, D. Meijer, and M. E. Visser, “Artificial light at night shifts daily activity patterns but not the internal clock in the great tit (*parus major*),”

Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, vol. 285, no. 1875, p. 20172751, Mar. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.2751>

- [80] J. Hoffmann, R. Palme, and J. A. Eccard, “Long-term dim light during nighttime changes activity patterns and space use in experimental small mammal populations,” *Environmental Pollution*, vol. 238, pp. 844–851, Jul. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.107>
- [81] K. L. Dananay and M. F. Benard, “Artificial light at night decreases metamorphic duration and juvenile growth in a widespread amphibian,” *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 285, no. 1882, p. 20180367, Jul. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.0367>
- [82] T. Luarte, C. Bonta, E. Silva-Rodriguez, P. Quijón, C. Miranda, A. Farias, and C. Duarte, “Light pollution reduces activity, food consumption and growth rates in a sandy beach invertebrate,” *Environmental Pollution*, vol. 218, pp. 1147–1153, Nov. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.068>
- [83] S. Boldogh, D. Dobrosi, and P. Samu, “The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences,” *Acta Chiropterologica*, vol. 9, no. 2, pp. 527–534, Dec. 2007. [Online]. Available: [https://doi.org/10.3161/1733-5329\(2007\)9\[527:teotio\]2.0.co;2](https://doi.org/10.3161/1733-5329(2007)9[527:teotio]2.0.co;2)
- [84] K. Geffen, R. van Grunsven, J. Ruijven, F. Berendse, and E. Veenendaal, “Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth,” *Ecology and Evolution*, vol. 4, 04 2014.
- [85] J. Bennie, T. W. Davies, D. Cruse, R. Inger, and K. J. Gaston, “Artificial light at night causes top-down and bottom-up trophic effects on invertebrate populations,” *Journal of Applied Ecology*, vol. 55, no. 6, pp. 2698–2706, Aug. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13240>
- [86] S. Mammola, M. Isaia, D. Demonte, P. Triolo, and M. Nervo, “Artificial lighting triggers the presence of urban spiders and their webs on historical buildings,” *Landscape and Urban Planning*, vol. 180, pp. 187–194, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.09.003>
- [87] W. D. Matthew H. Dick, “Fishing vessel endangered by crested auklet landings,” *Condor*, vol. 80, no. 2, pp. 235–236, 1978.
- [88] B. E. Witherington and K. A. Bjorndal, “Influences of artificial lighting on the seaward orientation of hatchling loggerhead turtles *Caretta caretta*,” *Biological Conservation*, vol. 55, no. 2, pp. 139–149, 1991. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(91\)90053-c](https://doi.org/10.1016/0006-3207(91)90053-c)

- [89] A. Black, "Light induced seabird mortality on vessels operating in the southern ocean: incidents and mitigation measures," *Antarctic Science*, vol. 17, no. 1, pp. 67–68, Feb. 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/s0954102005002439>
- [90] E. Silva, A. Marco, J. da Graça, H. Pérez, E. Abella, J. Patino-Martinez, S. Martins, and C. Almeida, "Light pollution affects nesting behavior of loggerhead turtles and predation risk of nests and hatchlings," *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 173, pp. 240–249, Aug. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.06.006>
- [91] A. Rodríguez, B. Rodríguez, P. Curbelo, A. Pérez, S. Marrero, and J. Negro, "Factors affecting mortality of shearwaters stranded by light pollution," *Animal Conservation*, vol. 15, pp. 519–526, 10 2012.
- [92] A. Rodríguez, N. D. Holmes, P. G. Ryan, K.-J. Wilson, L. Faulquier, Y. Murillo, A. F. Raine, J. F. Penniman, V. Neves, B. Rodríguez, J. J. Negro, A. Chiaradia, P. Dann, T. Anderson, B. Metzger, M. Shirai, L. Deppe, J. Wheeler, P. Hodum, C. Gouveia, V. Carmo, G. P. Carreira, L. Delgado-Alburqueque, C. Guerra-Correa, F.-X. Couzi, M. Travers, and M. L. Corre, "Seabird mortality induced by land-based artificial lights," *Conservation Biology*, vol. 31, no. 5, pp. 986–1001, May 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/cobi.12900>
- [93] E. Maggi and L. Benedetti-Cecchi, "Trophic compensation stabilizes marine primary producers exposed to artificial light at night," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 606, pp. 1–5, Nov. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3354/meps12769>
- [94] C. N. Underwood, T. W. Davies, and A. M. Queirós, "Artificial light at night alters trophic interactions of intertidal invertebrates," *Journal of Animal Ecology*, vol. 86, no. 4, pp. 781–789, Apr. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12670>
- [95] W. Montevecchi, *Influences of artificial light on marine birds*. Island Press, Washington, DC, 2006, pp. 94–113.
- [96] J. D. McLaren, J. J. Buler, T. Schreckengost, J. A. Smolinsky, M. Boone, E. E. van Loon, D. K. Dawson, and E. L. Walters, "Artificial light at night confounds broad-scale habitat use by migrating birds," *Ecology Letters*, vol. 21, no. 3, pp. 356–364, Jan. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/ele.12902>
- [97] F. A. L. Sorte, D. Fink, J. J. Buler, A. Farnsworth, and S. A. Cabrera-Cruz, "Seasonal associations with urban light pollution for nocturnally migrating bird populations," *Global Change Biology*, vol. 23, no. 11, pp. 4609–4619, Jul. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/gcb.13792>

- [98] B. M. V. Doren, K. G. Horton, A. M. Dokter, H. Klinck, S. B. Elbin, and A. Farnsworth, "High-intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, no. 42, pp. 11175–11180, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1073/pnas.1708574114>
- [99] T. W. Davies, J. Bennie, D. Cruse, D. Blumgart, R. Inger, and K. J. Gaston, "Multiple night-time light-emitting diode lighting strategies impact grassland invertebrate assemblages," *Global Change Biology*, vol. 23, no. 7, pp. 2641–2648, Jan. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/gcb.13615>
- [100] K. Spoelstra, R. H. A. van Grunsven, M. Donners, P. Gienapp, M. E. Huigens, R. Slaterus, F. Berendse, M. E. Visser, and E. Veenendaal, "Experimental illumination of natural habitat—an experimental set-up to assess the direct and indirect ecological consequences of artificial light of different spectral composition," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 370, no. 1667, p. 20140129, May 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0129>
- [101] S. Johnsen, "Crepuscular and nocturnal illumination and its effects on color perception by the nocturnal hawkmoth *deilephila elpenor*," *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, no. 5, pp. 789–800, Mar. 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1242/jeb.02053>
- [102] C. Aubrecht, M. Jaiteh, and A. de Sherbinin, "Global assessment of light pollution impact on protected areas," Center for International Earth Science Information Network, The Earth Institute at Columbia University & Austrian Institute of Technology, 01 2010.
- [103] J. R. de Freitas, J. Bennie, W. Mantovani, and K. J. Gaston, "Exposure of tropical ecosystems to artificial light at night: Brazil as a case study," *PLOS ONE*, vol. 12, no. 2, p. e0171655, Feb. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171655>
- [104] D. T. Cox, A. S. de Miguel, S. A. Dzurjak, J. Bennie, and K. J. Gaston, "National scale spatial variation in artificial light at night," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 10, p. 1591, May 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/rs12101591>
- [105] L. A. Meyer and S. M. P. Sullivan, "Bright lights, big city: influences of ecological light pollution on reciprocal stream–riparian invertebrate fluxes," *Ecological Applications*, vol. 23, no. 6, pp. 1322–1330, Sep. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1890/12-2007.1>
- [106] F. Hölker, C. Wurzbacher, C. Weißenborn, M. T. Monaghan, S. I. J. Holzhauser, and K. Premke, "Microbial diversity and community respiration in freshwater sediments influenced by artificial light at night," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 370, no. 1667, p. 20140130, May 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0130>

- [107] D. Lewanzik and C. C. Voigt, “Artificial light puts ecosystem services of frugivorous bats at risk,” *Journal of Applied Ecology*, vol. 51, no. 2, pp. 388–394, Mar. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12206>
- [108] M. G. E. Svensson, J. Rydell, and R. Brown, “Bat predation and flight timing of winter moths, epirrita and operophtera species (lepidoptera, geometridae),” *Oikos*, vol. 84, no. 2, p. 193, Feb. 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2307/3546713>
- [109] T. W. Davies, J. Bennie, and K. J. Gaston, “Street lighting changes the composition of invertebrate communities,” *Biology Letters*, vol. 8, no. 5, pp. 764–767, May 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rsbl.2012.0216>
- [110] T. W. Davies, J. Bennie, R. Inger, N. H. Ibarra, and K. J. Gaston, “Artificial light pollution: are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions?” *Global Change Biology*, vol. 19, no. 5, pp. 1417–1423, Mar. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/gcb.12166>
- [111] D. Sanders, R. Kehoe, K. Tiley, J. Bennie, D. Cruse, T. W. Davies, F. J. F. van Veen, and K. J. Gaston, “Artificial nighttime light changes aphid-parasitoid population dynamics,” *Scientific Reports*, vol. 5, no. 1, Oct. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/srep15232>
- [112] K. J. Gaston, M. E. Visser, and F. Hölker, “The biological impacts of artificial light at night: the research challenge,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 370, no. 1667, p. 20140133, May 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0133>
- [113] K. Spoelstra and M. E. Visser, *The impact of artificial light on avian ecology*. Oxford University Press, Nov. 2013, pp. 21–28. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199661572.003.0002>
- [114] C. B. Luginbuhl, P. A. Boley, and D. R. Davis, “The impact of light source spectral power distribution on sky glow,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 139, pp. 21–26, May 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.12.004>
- [115] C. C. M. Kyba, T. Ruhtz, J. Fischer, and F. Hölker, “Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems,” *PLoS ONE*, vol. 6, no. 3, p. e17307, Mar. 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017307>
- [116] D. M. Duriscoe, “Photometric indicators of visual night sky quality derived from all-sky brightness maps,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 181, pp. 33–45, Sep. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.02.022>

- [117] D. M. Duriscoe, S. J. Anderson, C. B. Luginbuhl, and K. E. Baugh, "A simplified model of all-sky artificial sky glow derived from VIIRS Day/Night band data," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 214, pp. 133–145, Jul. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.04.028>
- [118] K. D. Edwards, "Light emitting diodes," *University of California at Irvine*, p. 2, Accessed January 22, 2020. [Online]. Available: <https://cpb-us-e2.wpmucdn.com/faculty.sites.uci.edu/dist/a/326/files/2013/11/RDGLLED.pdf>
- [119] C. B. Luginbuhl, D. M. Duriscoe, C. W. Moore, A. Richman, G. W. Lockwood, and D. R. Davis, "From the ground up II: Sky glow and near-ground artificial light propagation in Flagstaff, Arizona," *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 121, no. 876, pp. 204–212, Feb. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1086/597626>
- [120] W. Zhong, J. Liu, D. Hua, S. Guo, K. Yan, and C. Zhang, "White LED light source radar system for multi-wavelength remote sensing measurement of atmospheric aerosols," *Applied Optics*, vol. 58, no. 31, p. 8542, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1364/ao.58.008542>
- [121] R. Mueller-Mach, G. O. Mueller, M. R. Krames, O. B. Shchekin, P. J. Schmidt, H. Bechtel, C.-H. Chen, and O. Steigelmann, "All-nitride monochromatic amber-emitting phosphor-converted light-emitting diodes," *physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters*, vol. 3, no. 7-8, pp. 215–217, Jul. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/pssr.200903188>
- [122] M. Aubé, J. Roby, and M. Kocifaj, "Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility," *PLoS ONE*, vol. 8, no. 7, p. e67798, Jul. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067798>
- [123] E. L. Stone, G. Jones, and S. Harris, "Conserving energy at a cost to biodiversity? impacts of LED lighting on bats," *Global Change Biology*, vol. 18, no. 8, pp. 2458–2465, Jul. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02705.x>
- [124] S. M. Pawson and M. K.-F. Bader, "LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature," *Ecological Applications*, vol. 24, no. 7, pp. 1561–1568, Oct. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1890/14-0468.1>
- [125] T. Longcore, A. Rodríguez, B. Witherington, J. F. Penniman, L. Herf, and M. Herf, "Rapid assessment of lamp spectrum to quantify ecological effects of light at night," *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, vol. 329, no. 8-9, pp. 511–521, Jun. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/jez.2184>

- [126] Περιφέρεια Ηπείρου, “Προκήρυξη Δημόσιου Διεθνούς Διαγωνισμού με τη διαδικασία του Ανταγωνιστικού Διαλόγου για το Έργο: «Αναβάθμιση του Οδοφωτισμού στο Εθνικό και Επαρχιακό Οδικό Δίκτυο της Περιφέρειας Ηπείρου» με ΣΔΙΤ,” α/α (ΕΣΗΔΗΣ): 84215, Αυγ 2019.
- [127] Γενική Διεύθυνση Αναπτυξιακού Προγραμματισμού & Περιβ/ντος Υποδομών Περιφέρειας Ηπείρου, “Παροχή υπηρεσιών αναβάθμισης της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος και των υποδομών του οδικού και αστικού φωτισμού του Δήμου Ιωαννινών,” α/α (ΕΣΗΔΗΣ): 104697, Περιφέρεια Ηπείρου, Δεκ 2020.
- [128] —, “Παροχή υπηρεσιών αναβάθμισης της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος και των υποδομών του οδικού και αστικού φωτισμού του Δήμου Πρέβεζας,” α/α (ΕΣΗΔΗΣ): 104648, Περιφέρεια Ηπείρου, Δεκ 2020.
- [129] Γ. Οικονόμου, Ε. Αραμπατζή, “Προμήθεια φωτιστικών σωμάτων τεχνολογίας LED,” Μελέτη, Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών, Δήμος Ιωαννίνων, Σεπ 2018.
- [130] Διεύθυνση Οικονομικών Υπηρεσιών Δήμου Αρταίων, “Διακήρυξη ανοικτού διεθνή διαγωνισμού για την «Προμήθεια φωτιστικών σωμάτων LED για εκσυγχρονισμό του δικτύου ηλεκτροφωτισμού του Δήμου», ΑΡ.ΠΡΩΤ. 1053 / 18-01-2021,” Δήμος Αρταίων, Ιαν 2021.
- [131] Α. Κώτσιος, “Προμήθεια φωτιστικών LED κεντρικού ηλεκτρονικού συστήματος τηλεδιαχείρισης δικτύων ηλεκτροφωτισμού,” Μελέτη, Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών & Δόμησης, Δήμος Ηγουμενίτσας, Φεβ 2020.
- [132] Οικονομική Επιτροπή Πρέβεζας, “Έγκριση μελέτης «Αναβάθμιση Οδοφωτισμού Ανοικτού Κέντρου Εμπορίου Πρέβεζας», Αριθ.Αποφ.341/2020,” Δήμος Πρέβεζας, Ιού 2020.
- [133] Κ. Λιαρίκος, Π. Μαραγκού & Θ. Παπαγιάννης, “Η Ελλάδα τότε και τώρα: Διαχρονική χαρτογράφηση των καλύψεων γης, 1987-2007,” WWF Ελλάς, 2012.
- [134] UNEP-WCMC and IUCN, “Protected planet: The world database on protected areas (WDPA),” Sep. 2020. [Online]. Available: www.protectedplanet.net
- [135] Ramsar Sites Information Service, “Amvrakikos gulf.” [Online]. Available: <https://rsis.ramar.org/ris/61>
- [136] Φορέας Διαχείρισης Υγροτόπων Αμβρακικού, “Οικότοποι - Χλωρίδα και Ορνιθοπανίδα Εθνικού Πάρκου Υγροτόπων Αμβρακικού,” Ιαν 2021. [Online]. Available: <https://amvrakikos.eu>
- [137] Φορέας Διαχείρισης Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου, “Χλωρίδα - Οικότοποι και Πανίδα Εθνικού Πάρκου Βόρειας Πίνδου,” Ιαν 2021. [Online]. Available: <https://www.pindosnationalpark.gr>

- [138] Φορέας Διαχείρισης Εθνικού Πάρκου Τζουμέρκων, Περιστερίου και Χαράδρας Αράχθου, “Χλωρίδα και Πανίδα Εθνικού Πάρκου Τζουμέρκων, Περιστερίου και Χαράδρας Αράχθου,” Ιαν 2021. [Online]. Available: <https://www.tzoumerka-park.gr>
- [139] European Environmental Agency, “NATURA 2000 - STANDARD DATA FORM,” Ιαν 2021. [Online]. Available: <https://natura2000.eea.europa.eu/Natura2000/SDF.aspx?site=GR2110001>
- [140] Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρεία, “Σημαντικές περιοχές για τα πουλιά της Ελλάδας,” Ιαν 2021. [Online]. Available: https://www.ornithologiki.gr/page_cn.php?tID=2339
- [141] P. J. Treanor, “A simple propagation law for artificial night-sky illumination,” *The Observatory*, vol. 93, pp. 117–120, Jun. 1973.
- [142] M. F. Walker, “The effects of urban lighting on the brightness of the night sky,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 89, p. 405, Jun. 1977. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1086/130142>
- [143] P. Cinzano and F. Falchi, “The propagation of light pollution in the atmosphere,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 427, no. 4, pp. 3337–3357, Dec. 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21884.x>
- [144] R. H. Garstang, “Night-sky brightness at observatories and sites,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 101, pp. 306–329, Mar. 1989. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1086/132436>
- [145] —, “Model for artificial night-sky illumination,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 98, p. 364, Mar. 1986. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1086/131768>
- [146] —, “Dust and light pollution,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 103, p. 1109, Oct. 1991. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1086/132933>
- [147] H. Netzel and P. Netzel, “High-resolution map of light pollution,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 221, pp. 300–308, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.05.038>
- [148] C. D. Elvidge, K. Baugh, M. Zhizhin, F. C. Hsu, and T. Ghosh, “VIIRS night-time lights,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 21, pp. 5860–5879, Jun. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1342050>
- [149] S. Müller, W. Straka, S. Mills, C. Elvidge, T. Lee, J. Solbrig, A. Walther, A. Heidinger, and S. Weiss, “Illuminating the capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night

- Band,” *Remote Sensing*, vol. 5, no. 12, pp. 6717–6766, Dec. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/rs5126717>
- [150] C. D. Elvidge, K. E. Baugh, M. Zhizhin, and F.-C. Hsu, “Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights,” *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, vol. 35, no. 0, p. 62, Jun. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7125/apan.35.7>
- [151] C. Kyba, S. Garz, H. Kuechly, A. de Miguel, J. Zamorano, J. Fischer, and F. Hölker, “High-resolution imagery of Earth at night: New sources, opportunities and challenges,” *Remote Sensing*, vol. 7, no. 1, pp. 1–23, Dec. 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/rs70100001>
- [152] D. M. Duriscoe, C. B. Luginbuhl, and C. D. Elvidge, “The relation of outdoor lighting characteristics to sky glow from distant cities,” *Lighting Research & Technology*, vol. 46, no. 1, pp. 35–49, Oct. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/1477153513506729>
- [153] C. Moore, F. Turina, and J. White, “Recommended indicators and thresholds of night sky quality for NPS state of the park reports,” WASO-Natural Resource Stewardship & Science, Natural Sounds Night Skies Division, May 2013. [Online]. Available: <https://irma.nps.gov/DataStore/DownloadFile/476525>
- [154] M. Aubé, L. Franchomme-Fosse, P. Robert-Staehler, and V. Houle, “Light pollution modelling and detection in a heterogeneous environment: toward a night-time aerosol optical depth retrieval method,” in *Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization: Numerical Atmospheric Prediction and Environmental Monitoring*, H.-L. A. Huang, H. J. Bloom, X. Xu, and G. J. Dittberner, Eds. SPIE, Aug. 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.615405>
- [155] M. Aubé, “Correction to ‘physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment’,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 370, no. 1669, p. 20150143, May 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0143>
- [156] M. Aubé and A. Simoneau, “New features to the night sky radiance model Illumina: Hyperspectral support, improved obstacles and cloud reflection,” *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 211, pp. 25–34, May 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.02.033>
- [157] S. J. Ribas, J. Torra, S. Paricio, and R. Canal-Domingo, “How clouds are amplifying (or not) the effects of ALAN,” *International Journal of Sustainable Lighting*, vol. 18, pp. 32–39, Dec. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.26607/ijsl.v18i0.19>

- [158] J. C. Barentine, C. E. Walker, M. Kocifaj, F. Kundracik, A. Juan, J. Kanemoto, and C. K. Monrad, "Skyglow changes over tucson, arizona, resulting from a municipal LED street lighting conversion," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 212, pp. 10–23, Jun. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.02.038>

Παράρτημα Α΄

Κώδικας Υπολογισμού ALR

```
import sys
import math
import numpy as np
from osgeo import gdal
from scipy import signal
gdal.AllRegister()

##### User defined parameters #####

maxDist=300000
maxFsize=2000 #user defined maximum filter size to avoid memory error
# (!) Because scipy.convolve2d will only accept a square filter the
↪ caclulations will
# be accurate only if image X pixel size equals image Y pixel size
inRaster='greece_viirs_042020_EGSA87_nn.tif'
outRaster='greece_viirs_042020_EGSA87_nn_scipy.tif'

##### Read the input Raster #####

inDS = gdal.Open(inRaster, gdal.GA_ReadOnly)
if inDS is None:
    print('Could not open input image '+inRaster)
    sys.exit(1)
geoTransform = inDS.GetGeoTransform()
# get the band
#inputBandNo = inDs.GetRasterBand(BandNo)
band = inDS.GetRasterBand(1)
```

```

datatype = band.DataType
proj = inDS.GetProjection()
rows = inDS.RasterYSize
cols = inDS.RasterXSize
pixelSizeX = geoTransform[1]
pixelSizeY = -geoTransform[5]
data = band.ReadAsArray(0,0,cols,rows) #read the data to be processed

##### Print input/output raster info and processing parameters
    ↪ #####

print('\nInput parameters\n-----')
print('Input image: ', inRaster, end='\n')
print('Output image: ', outRaster, end='\n')
#print('\n')
#print('Projection parameters: ', proj, end='\n')
#print('\n')
#print('GeoTransformation parameters: ', geoTransform, end='\n')
#print('\n')
print('Columns: ', cols, end='\n')
print('Rows: ', rows, end='\n')
print('Pixel X size: ', pixelSizeX, end='\n')
print('Pixel Y size: ', pixelSizeY, end='\n')
if pixelSizeX != pixelSizeY:
    print('---> image pixels not square, nevertheless processing will continue'
        ↪ )
if pixelSizeX > pixelSizeY:
    minPixelSize = pixelSizeY
else :
    minPixelSize = pixelSizeX

##### Calculate filter parameters and kernel #####

fsizeX=math.floor(maxDist/pixelSizeX)
if math.fmod(fsizeX,2)==0:
    fsizeX+=1
fsizeY=math.floor(maxDist/pixelSizeY)
if math.fmod(fsizeY,2)==0:
    fsizeY+=1

```

```

# if image pixels are not square make the filter square keeping the largest
  ↪ dimension
if fsizeX<fsizeY :
    fsizeX=fsizeY
else :
    fsizeY=fsizeX

print('Filter X size: ', fsizeX, end='\n')
print('Filter Y size: ', fsizeY, end='\n')
if (fsizeX<3 or fsizeY<3) :
    sys.exit('Filter window size cannot be less than 3x3\n')
if (fsizeX>maxFsize or fsizeY>maxFsize) :
    sys.exit('Filter window size exceeds max limit\n')
hfX=math.floor(fsizeX/2)
hfY=math.floor(fsizeY/2)

#fkern = [[0 for x in range(fsizeX)] for y in range(fsizeY)]
fkern = np.zeros((fsizeY, fsizeX))

c = 562.72
for i in range(0,fsizeY): #calculate pixel distance weights within the filter
  ↪ kernel
    for j in range(0,fsizeX):
        if (i==hfY and j==hfX):
            #the central pixel has dist=0 and therefore the function is not
              ↪ applicable
            #the distance to the central pixel is considered to be equal to the
              ↪ pixel size
            dist = 1.*minPixelSize/1000.
            fkern[i][j] = math.pow(dist, -2.3*math.pow(1.*dist/350., 0.28))/c
        else:
            dist = (math.sqrt(1. * (hfY-i)**2 * pixelSizeY**2 + 1. * (hfX-j)**2
              ↪ * pixelSizeX**2)/1000.)
            if dist>300 : #the function is not applicable if dist>300km
                fkern[i][j]=0
            else:
                fkern[i][j] = math.pow(dist, -2.3*math.pow(1.*dist/350., 0.28))/c

```

```

##### Processing #####

print('\nSetting nodata=0 ')
np.clip(data, 0, np.nan, out=data) #change original image nodata=-3.40282e+38
    ↪ to nodata=0
dataOut = np.zeros((rows,cols)) #create an output image identical to the input
    ↪ image
print('\nProcessing...')
#apply the filter with scipy.convolve2d
dataOut = signal.convolve2d(data, fkern, mode='same', boundary='fill',
    ↪ fillvalue=0)

##### Write the output raster #####

driver=inDS.GetDriver()
outDS = driver.Create(outRaster, cols,rows, 1, datatype)
if outDS is None:
    print('Could not create output image file '+ outRaster)
    sys.exit(1)
geoTransform = inDS.GetGeoTransform()
outDS.SetGeoTransform(geoTransform)
proj = inDS.GetProjection()
outDS.SetProjection(proj)
outBand = outDS.GetRasterBand(1)
outBand.WriteArray(dataOut, 0, 0) #dataOut is the output array to be written to
    ↪ the tiff file
outBand.FlushCache() #flush the cache

print('\nFinished!')

# close files
inDs = None
outDs = None

```