

Χαρτογράφηση του Τεχνητού Νυχτερινού Φωτισμού στον Ελληνικό Χώρο. Διαχρονική μελέτη με την αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων DMSP-OLS

Χρίστος Χαλκιάς¹, Δημήτρης Κλάδης²

1 Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, xalkias@hua.gr

2 Γεωγράφος, Μεταπτυχιακός φοιτητής Γεωπληροφορικής, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο
dmkladis@gmail.com, xalkias@hua.gr

Περίληψη: Η φωτορύπανση (night light pollution) αποτελεί μια μορφή περιβαλλοντικής ρύπανσης η οποία οφείλεται στην υπέρμετρη χρήση των ανθρωπογενών τεχνητών πηγών φωτισμού, μεταβάλλοντας τα φυσιολογικά επίπεδα φωτεινότητας του νυχτερινού περιβάλλοντος. Λαμβάνει προβληματικές και ανησυχητικές διαστάσεις κυρίως σε περιοχές έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας, όπως είναι μεγάλα αστικά κέντρα και βιομηχανικές περιοχές. Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η διαχρονική παρακολούθηση και ανάλυση των μεταβολών του νυχτερινού τεχνητού φωτισμού στο σύνολο του Ελλαδικού χώρου την περίοδο 1992–2013. Για τις ανάγκες της εργασίας αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών στο οποίο εισήχθησαν δορυφορικά δεδομένα νυχτερινού φωτισμού που συλλέγονται από τους δορυφόρους DMSP-OLS. Από την κατασκευή και ανάλυση των χαρτών των διαχρονικών μεταβολών του τεχνητού νυχτερινού φωτισμού διαπιστώθηκε η ραγδαίως αυξανόμενη μεγέθυνση των τεχνητών πηγών φωτισμού κυρίως περιμετρικά του συνόλου των οικισμών της χώρας γεγονός που συνδέθηκε με την αστική διάχυση. Ταυτόχρονα, ο μειωμένος νυχτερινός φωτισμός εντός των μεγάλων αστικών κέντρων, ενδεχομένως σχετίζεται αφενός με την μείωση της κατανάλωσης των τελευταίων ετών και αφετέρου με την εφαρμογή δράσεων σε τοπικό επίπεδο, για αποδοτικότερη διαχείριση της ενέργειας. Τέλος, από τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων σε συνδυασμό με κοινωνικοοικονομικές μεταβλητές φαίνεται ότι οι πληθυσμιακές μεταβολές πληθυσμιακή και οι μεταβολές στην οικονομική δραστηριότητα σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με τις παρατηρούμενες μεταβολές του τεχνητού φωτισμού.

1. Εισαγωγή

Η εφεύρεση του ηλεκτροφωτισμού από τον Thomas Edison (1879), και η ραγδαία εισαγωγή και εξάπλωση του σε παγκόσμιο επίπεδο έτη σήμανε την απαρχή για μια νέα ιστορική περίοδο που θα διένυε η ανθρωπότητα. Η προοδευτική τεχνολογική εξέλιξη που σημειώθηκε τον 20^ο αιώνα στους ηλεκτρικούς λαμπτήρες συνδέθηκε με παράλληλη εντατική χρήση του τεχνητού φωτισμού, φαινόμενο που σταδιακά

λάμβανε ολοένα και μεγαλύτερες διαστάσεις. Τις τελευταίες δεκαετίες, η υπέρμετρη αυτή εισαγωγή τεχνητού φωτισμού που προέρχεται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, έχει μεταβάλλει σημαντικά τις ισορροπίες της φωτεινότητας του νυχτερινού περιβάλλοντος, γεγονός που έχει οδηγήσει σε μια δραματική αύξηση των επιπέδων της τεχνητής φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού στο σύνολο σχεδόν των χωρών του πλανήτη.

Οι αστρονόμοι περί τα μέσα της δεκαετίας του 1970, ήταν οι πρώτοι που σταδιακά άρχισαν να αντιμετωπίζουν τις επιπτώσεις από την ραγδαία εισαγωγή του τεχνητού φωτισμού γεγονός που οδήγησε στην δημιουργία ενός νέου όρου που να περιγράφει το φαινόμενο αυτό, της φωτορύπανσης. Η φωτορύπανση αποτελεί έναν ευρύ όρο ο οποίος αναφέρεται στην μεταβολή των φυσικών επιπέδων φωτεινότητας του νυχτερινού περιβάλλοντος εξαιτίας της υπέρμετρης και ακατάλληλης χρήσης των τεχνητών πηγών φωτισμού (Cinzano et al., 2000). Πρόκειται για οχληρό, παρασιτικό τεχνητό φως το οποίο λόγω της ποσότητας, της κατεύθυνσης και του φασματικού περιεχομένου σε ένα δεδομένο περιβάλλον, γίνεται αιτία για πρόκληση ενόχλησης ή μείωσης της ικανότητας διάκρισης βασικών λεπτομερειών του νυχτερινού περιβάλλοντος. Το οχληρό αυτό φως επιδρά στο φυσικό περιβάλλον με πέντε διαφορετικούς τρόπους οι οποίοι αφορούν i) τη φωτιστική καταπάτηση, ii) τον υπερφωτισμό, iii) τη συσσωμάτωση τεχνητών πηγών φωτισμού, iv) τη θάμβωση και v) τον τεχνητό φωτεινό ουράνιο θόλο (Artificial Sky Glow) και λαμβάνει προβληματικές και ανησυχητικές διαστάσεις κυρίως σε περιοχές έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας όπως είναι τα μεγάλα αστικά και βιομηχανικά κέντρα. Πρόσφατα, η φωτορύπανση έχει χαρακτηριστεί ως ένας σύγχρονος, ταχεία αυξανόμενος παράγοντας αλλοίωσης του φυσικού περιβάλλοντος, που δεν απειλεί μόνο τις αστρονομικές παρατηρήσεις και την ίδια την αντίληψη του ανθρώπου για το σύμπαν (Cinzano et al, 2001), αλλά επιφέρει σημαντικές άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις όχι μόνο στον τοπικό αστικό-περιαστικό χώρο στον οποίο εκδηλώνεται, αλλά και σε ολόκληρο το σύμπλεγμα ανθρωπογενούς – φυσικού περιβάλλοντος (Navara και Nelson, 2007). Στις αρχές της νέας χιλιετίας περίπου τα δύο τρίτα του παγκόσμιου πληθυσμού (99% του πληθυσμού των ΗΠΑ και της Ευρωπαϊκής ένωσης) κατοικούν σε περιοχές στις οποίες τα επίπεδα του τεχνητού φωτισμού υπερβαίνουν σε σημαντικό βαθμό την φυσική φωτεινότητα του νυχτερινού περιβάλλοντος (Cinzano et al, 2001). Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει την ταξινόμηση των επιπτώσεων της φωτορύπανσης σε τέσσερις κύριες κατηγορίες (Σχήμα 1.)

Οι πρώτες μεμονωμένες προσπάθειες για την μελέτη και την κατανόηση του φαινομένου της φωτορύπανσης, χρονολογούνται περί τα μέσα της δεκαετίας του 1970, με σημείο αναφοράς την εμπειρική έρευνα του αστρονόμου Walker (1973). Ο Walker (1973) πραγματοποίησε μια σειρά μετρήσεων του τεχνητού νυχτερινού φωτισμού με χρήση απλοϊκού ηλεκτροφωτόμετρου, σε διάφορες πόλεις στις πολιτείες της Καλιφόρνιας και της Αριζόνας των ΗΠΑ, με πρωταρχικό σκοπό τη χωροθέτηση μελλοντικών αστρονομικών παρατηρητηρίων. Από την ανάλυση των μετρήσεων προτάθηκε μια εμπειρική εξίσωση συσχέτισης μεταξύ των νυχτερινών

Νυχτερινές δραστηριότητες	Ανθρώπινη υγεία & βιοτικό επίπεδο	Οικονομία & κοινωνία	Φυσικό περιβάλλον
Αστροπαρατήρηση	Διατάραξη Κιρκαδιανού συστήματος	Οικονομικές απώλειες	Διαταραχή βιολογικών ρυθμών
Θέαση νυχτερινού ουρανού	Καταστολή πολύτιμων ορμονών	Ενεργειακές απώλειες	Αποπροσανατολισμός & σύγχυση
Στρατιωτικές επιχειρήσεις	Υπονόμευση βιοτικού επιπέδου	Συμβολή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου	Διατάραξη της “φυσικής ηρεμίας”
Ατυχήματα			

Σχήμα 1. Κύριες επιπτώσεις του φαινομένου της φωτορύπανσης

εκπομπών τεχνητού φωτισμού με τον πληθυσμό μιας πόλης και την απόσταση από αυτήν. Η σχέση αυτή, γνωστή και ως *Νόμος του Walker* αποτέλεσε το πρώτο απλοϊκό μοντέλο για την ποσοτικοποίηση του φαινομένου της φωτορύπανσης. Ένα πολυπλοκότερο και περισσότερο εξελιγμένο μοντέλο αναπτύχθηκε έπειτα από τον Garstang (1984) λαμβάνοντας υπόψιν καθοριστικές ατμοσφαιρικές παράμετρους που επιδρούν στην διάδοση ακτινοβολίας του φωτός.

Η ελεύθερη διάθεση δορυφορικών δεδομένων του Αμυντικού Μετεωρολογικού Δορυφορικού Προγράμματος (DMSP) το 1992 από την NGDC (National Geophysical Data Center) της NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) συνέβαλε στην εμφάνιση νέων μεθοδολογιών για την χαρτογράφηση και μελέτη του φαινομένου της φωτορύπανσης σε παγκόσμιο επίπεδο. Η ικανότητα των δορυφόρων DMSP μέσω του αισθητήρα OLS (Operational Linescan System) να καταγράφουν στο ορατό φάσμα επίγειες τεχνητές πηγές φωτισμού, αποτελώντας έτσι έναν δυνητικό δείκτη της ανθρώπινης παρουσίας και δραστηριότητας στη γη (Elvidge et al., 1997), προσέδρασε το έντονο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και οδήγησε στην ανάπτυξη πληθώρας εφαρμογών όπως η χωρική μοντελοποίηση του πληθυσμού και της πληθυσμιακής κατανομής (Amaral et al., 2006; Zeng et al., 2011), της οικονομικής δραστηριότητας (Gallaway et al., 2010; Mellander et al., 2013), και η χαρτογράφηση του αστικού περιβάλλοντος (Liu et al., 2012). Σήμερα, η διαθεσιμότητα μιας συνεχούς χρονοσειράς δορυφορικών δεδομένων DMSP OLS δίνει την δυνατότητα για διαχρονική παρακολούθηση και ανάλυση των χωροχρονικών προτύπων του τεχνητού φωτισμού σε διάφορες χωρικές κλίμακες, τόσο σε τοπικό αστικό όσο και σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο (Bennie et al., 2014; Han et al., 2014). Αντίστοιχες μελέτες για τον Ελληνικό χώρο είναι

σχετικά περιορισμένες (Χαλκιάς κ.α. (2002), Chalkias et al., (2006), γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη ενίσχυσης της έρευνας για τη μελέτη του φαινομένου της φωτορύπανσης.

Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η διαχρονική χαρτογράφηση του τεχνητού νυχτερινού φωτισμού στον Ελληνικό χώρο, αξιοποιώντας δορυφορικά δεδομένα DMSP OLS για την χρονική περίοδο 1992 – 2013. Βασικό στόχο αποτελεί αφενός η ανάλυση και ποσοτικοποίηση των μεταβολών που παρατηρούνται στον τεχνητό νυχτερινό φωτισμό, και αφετέρου η αρχική διερεύνηση της σχέσης των εκπομπών νυχτερινού φωτισμού με κοινωνικοοικονομικές μεταβλητές. Για την επίτευξη των παραπάνω αναπτύχθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία μέσα σε ένα ολοκληρωμένο ΣΓΠ αξιοποιώντας συνδυαστικά εργαλεία και τεχνικές που προσφέρουν οι τεχνολογίες των ΣΓΠ και της τηλεπισκόπησης.

2. Δεδομένα

Για τις ανάγκες της εργασίας, σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε γεωγραφική βάση δεδομένων σε περιβάλλον GIS για την αποδοτικότερη οργάνωση και διαχείριση των εισαχθέντων δεδομένων. Τα δεδομένα ανάλογα με τη φύση και τη προέλευσή τους μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: τα δορυφορικά δεδομένα και τα δεδομένα υποβάθρου.

2.1 Δορυφορικά δεδομένα

Το κυριότερο σύνολο χωρικών δεδομένων, το οποίο αποτελεί και τον πυρήνα της βάσης δεδομένων, αποτελούν οι δορυφορικές εικόνες DMSP της 4^{ης} κατά σειρά έκδοσης που διατίθενται από την NGDC. Συνολικά αντλήθηκαν 35 δορυφορικές εικόνες που αφορούν τις νυχτερινές εκπομπές σταθερού φωτισμού (Stable Lights) οι οποίες ελήφθησαν μέσω του αισθητήρα OLS από έξι διαφορετικούς δορυφόρους (F10, F12, F14, F15, F16, F18) και καλύπτουν χρονική περίοδο είκοσι ενός ετών, 1992 – 2013. Οι δορυφορικές εικόνες Stable lights ουσιαστικά αποτελούν σύνθετες παράγωγες εικόνες οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις μέσες ετήσιες ψηφιακές τιμές φωτεινότητας επίγειων σταθερών πηγών φωτισμού (δομημένο αστικό και βιομηχανικό περιβάλλον) των βέλτιστων εικόνων (απουσία νεφοκάλυψης, μικρές παραμορφώσεις κ.α.) που συλλέγονται σε ετήσια βάση από τους δορυφόρους DMSP OLS (Elvidge et al., 2001). Παρέχουν σχεδόν παγκόσμια κάλυψη (πλήρες γεωγραφικό μήκος -180° έως 180°, και γεωγραφικό πλάτος -65° έως 75°), ενώ διαθέτουν χωρική ανάλυση 30 arc seconds (~1x1 km στον ισημερινό) και σύστημα κβαντισμού κωδικοποίησης των τιμών φωτεινότητας 6bit, αποδίδοντας τιμές εύρους 0 – 63 (Baugh et al., 2010). Οι δορυφορικές εικόνες εισήχθησαν στη γεωβάση, αποκόπηκαν στα γεωγραφικά όρια του Ελληνικού χώρου και στη συνέχεια εφαρμόστηκαν κατάλληλα μετασχηματισμοί για τη μετατροπή του συστήματος συντεταγμένων στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87).

Ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην αξιοποίηση των δορυφορικών δεδομένων νυχτερινού φωτισμού, ιδίως σε εφαρμογές διαχρονικής ανίχνευσης μεταβολών, είναι η έλλειψη συστηματικής επί του σκάφους (on board) ραδιομετρικής διόρθωσης με αποτέλεσμα να παρατηρούνται σημαντικές ασυμβατότητες και διακυμάνσεις στις ψηφιακές τιμές φωτεινότητας μεταξύ των δορυφόρων DMSP στο σύνολο της χρονοσειράς δεδομένων. Επιπλέον, το περιορισμένο δυναμικό εύρος (6bit) του οργάνου καταγραφής OLS συμβάλλει στον κορεσμό (saturation) των εικονοστοιχείων στους πυρήνες των αστικών και βιομηχανικών κέντρων, και στην υπερεκτίμηση της χωρικής διάστασης (Overglow) των επίγειων τεχνητών πηγών φωτισμού (Small et al., 2005). Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε μια ραδιομετρικά διορθωμένη δορυφορική εικόνα DMSP OLS, βάσει της οποίας επετεύχθη η σχετική βαθμονόμηση της χρονοσειράς των δορυφορικών δεδομένων.

2.2 Δεδομένα υποβάθρου

Οι κοινωνικο-οικονομικές μεταβλητές οι οποίες σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με τις νυχτερινές εκπομπές τεχνητού φωτισμού αφορούν τον μόνιμο πληθυσμό, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ). Ως μεταβλητή ανάλυσης του πληθυσμού επιλέχθηκε ο μόνιμος πληθυσμός καθώς σε αντίθεση με τον πραγματικό, αντανακλά τη πραγματική χωρική διάσταση της πληθυσμιακής συγκέντρωσης. Τα πληθυσμιακά δεδομένα αφορούν τρεις χρονικές περιόδους που αντιστοιχούν στις απογραφές πληθυσμού της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛ.ΣΤΑΤ) των ετών 1991, 2001 και 2011. Οικονομικά στοιχεία σχετικά με το ΑΕΠ, σε εκατομμύρια ευρώ, για τα έτη 1995 – 2011 καθώς και τα δεδομένα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε χιλιάδες ΩΧΒ (thousands kWh), για τη χρονική περίοδο 1993 – 2012, λήφθηκαν επίσης από την ΕΛ.ΣΤΑΤ. Ως χωρικό επίπεδο αναφοράς επιλέχθηκε η τρέχουσα διοικητική διαίρεση σε επίπεδο νομών όπως διαμορφώθηκε από το πρόγραμμα *Καλλικράτης*, με συνολικό αριθμό 51 νομοί εξαιρουμένου του αυτοδιοίκητου τμήματος του Αγίου Όρους το οποίο αποκλείστηκε από την ανάλυση.

3. Μεθοδολογία

Παρά την προεπεξεργασία που έχουν υποστεί οι πρωτογενείς δορυφορικές εικόνες που διατίθενται από την NGDC, όπως αναφέρθηκε παραπάνω η χρήση των δορυφορικών δεδομένων DMSP νυχτερινού φωτισμού υπόκειται σε μια σειρά περιοριστικών παραγόντων που οφείλονται κυρίως στα χαρακτηριστικά της χωρικής και ραδιομετρικής διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα OLS. Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών αναπτύχθηκε πρόσθετη μεθοδολογία προεπεξεργασίας αξιοποιώντας κατάλληλες τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνων.

3.1 Σχετική ραδιομετρική διόρθωση των δορυφορικών εικόνων

Για την επιτυχή αξιοποίηση και ανάλυση των δεδομένων καθώς και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων απαιτείται η ύπαρξη κοινής ραδιομετρικής απόκρισης των ψηφιακών τιμών για κάθε ζεύγος εικόνων, έτσι ώστε οι ασυμβατότητες μεταξύ των ανιχνευτών να απαλείφονται ή να περιορίζονται. Καθώς η απόλυτη ραδιομετρική βαθμονόμηση δεν είναι απαραίτητη για μια πληθώρα εφαρμογών στην διαχρονική ανάλυση και ανίχνευση μεταβολών, η σχετική βαθμονόμηση των τιμών φωτεινότητας των ψηφιδών των εικόνων αποτελεί μια ιδανική εναλλακτική μέθοδο (Coppin et al., 2004).

Για τη σχετική ραδιομετρική βαθμονόμηση της χρονοσειράς των δορυφορικών εικόνων πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ των ψηφιακών τιμών φωτεινότητας μιας επιλεγμένης εικόνας αναφοράς και των τιμών των υπόλοιπων εικόνων. Ως εικόνα αναφοράς επιλέχθηκε η ραδιομετρικά διορθωμένη εικόνα της περιόδου 2002 – 2003 η οποία διατίθεται από την NGDC, με βάση την οποία οι ψηφιακές τιμές φωτεινότητας των δορυφορικών δεδομένων Stable Lights προσαρμόστηκαν στο εύρος τιμών της διορθωμένης εικόνας. Το μαθηματικό μοντέλο για τη σχετική (δια)βαθμονόμηση των δορυφορικών εικόνων είναι το παρακάτω:

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

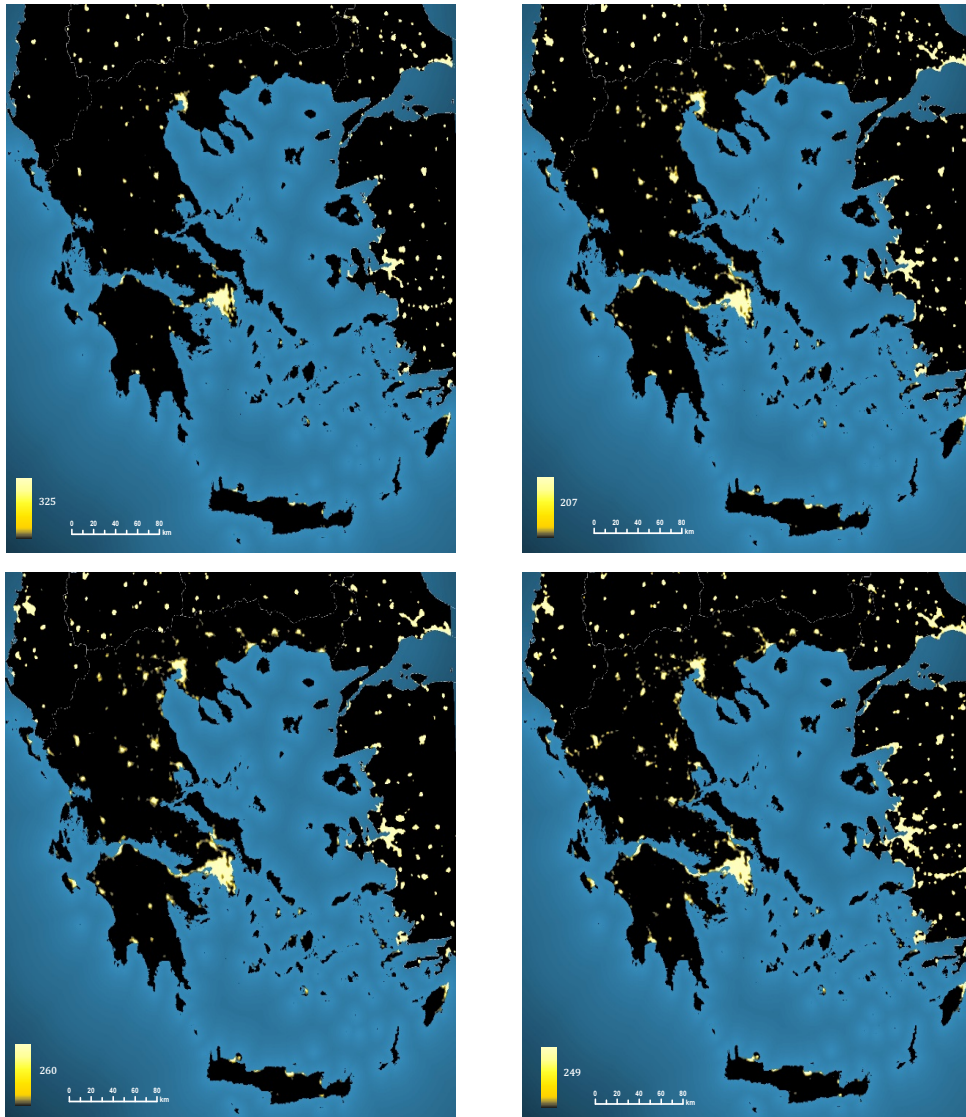
όπου DN_{cb} είναι οι νέες ψηφιακές τιμές των εικονοστοιχείων των εικόνων, DN είναι οι αρχικές ψηφιακές τιμές και β η παράμετρος του μοντέλου η οποία εκτιμήθηκε με τη Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων (MET).

3.2 Τμηματοποίηση δορυφορικών εικόνων

Επόμενη στάδιο ψηφιακής επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων αποτέλεσε η εφαρμογή τεχνικών τμηματοποίησης για το διαχωρισμό της εικόνας σε επιθυμητές και μη περιοχές (περιοχές νυχτερινού φωτισμού και «αδιατάρακτες» περιοχές). Ορισμένες από τις αποτελεσματικότερες μεθόδους τμηματοποίησης εικόνων αποτελούν οι τεχνικές κατωφλίωσης (thresholding) και πολυκατωφλίωσης (multilevel thresholding). Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκαν τεχνικές της πρώτης κατηγορίας, και συγκεκριμένα η τεχνική του *καθολικού κατωφλίου* (global thresholding). Για την κατωφλίωση των δορυφορικών εικόνων επιλέχθηκε η μέθοδος του Otsu (Otsu, 1979) η οποία αποτελεί μια από τις βέλτιστες τεχνικές εύρεσης κατωφλίου. Στην μέθοδο αυτή το κριτήριο για την επιλογή του βέλτιστου κατωφλίου είναι η ελαχιστοποίηση της ενδο-ομαδικής και η μεγιστοποίηση της δια-ομαδικής διακύμανσης των κλάσεων. Η εφαρμογή της μεθόδου του Otsu πραγματοποιήθηκε στο διαδραστικό περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού Matlab R2014a στο οποίο έγινε η συγγραφή του αλγόριθμου για την υλοποίηση της μεθόδου (Παπαμάρκος, 2010). Η εκτέλεση του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε διαδοχικά για το σύνολο των 34 βαθμονομημένων δορυφορικών εικόνων και το αποτέλεσμα είναι νέες δυαδικές εικόνες στις οποίες εικονοστοιχεία με τιμή φωτεινότητας ίση ή μικρότερη

του κατωφλίου λαμβάνουν την τιμή 0, ενώ όλα τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία επιλέχθηκε να διατηρούν τις τιμές τους. Δηλαδή, αν $g(x,y)$ είναι η νέα δυαδική εικόνα ύστερα από την εφαρμογή του κατωφλίου, $f(x,y)$ η αρχική εικόνα και T η τιμή κατωφλίου όπως προέκυψε με την εφαρμογή της μεθόδου του Otsu, τότε:

$$g(x,y) = \begin{cases} f(x,y) & , f(x,y) > T \\ 0 & , f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (2)$$



Σχήμα 4. Νυχτερινές εκπομπές φωτισμού στην ευρύτερη περιοχή μελέτης όπως αποτυπώνονται στις τελικές τμηματοποιημένες δορυφορικές εικόνες DMSP OLS.

3.3 Ανίχνευση μεταβολών

Ως μέθοδος ανάλυσης των διαχρονικών μεταβολών (change detection) επιλέχθηκε η μέθοδος της αφαίρεσης των εικόνων, βάσει της οποίας οι ψηφιακές τιμές κάθε εικονοστοιχείου μια εικόνας αφαιρούνται από αυτές μιας άλλης. Αυτή η μέθοδος ανίχνευσης μεταβολών χαρακτηρίζεται από την απλότητά της, όντας ταυτόχρονα μια από τις πλέον διαδεδομένες τεχνικές ανίχνευσης μεταβολών (Hayes & Sauder, 2001). Μαθηματικά, μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω σχέση:

$$D_{x_{ij}}^k = x_{ij}^k(t_2) - x_{ij}^k(t_1) + C \quad (3)$$

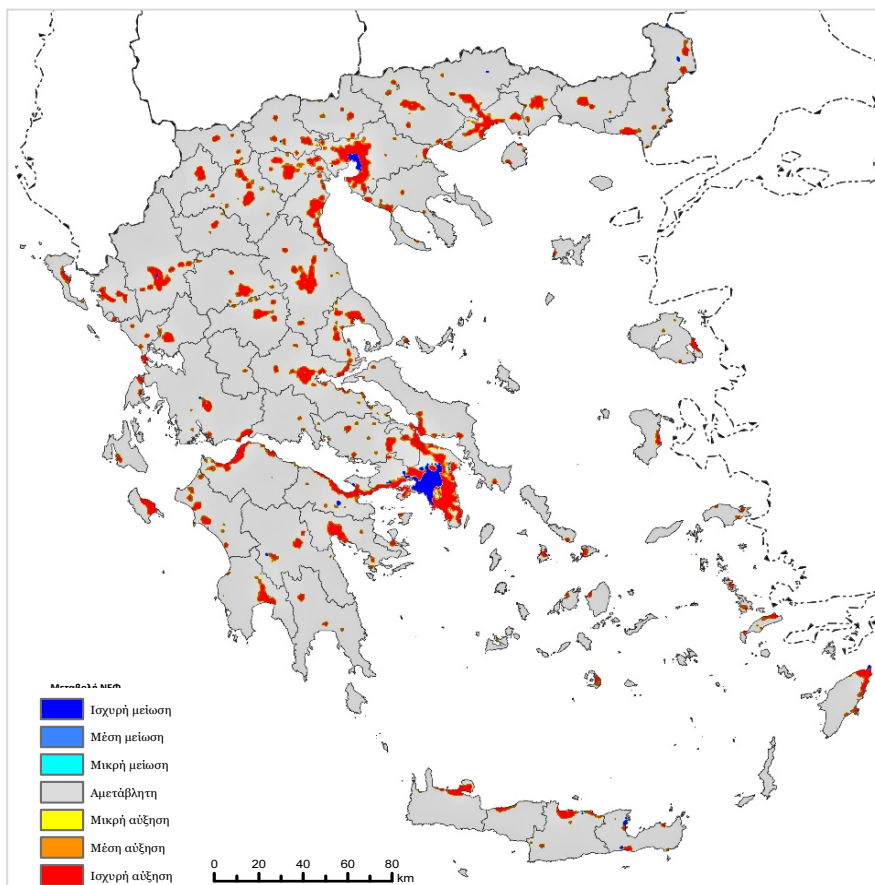
όπου i, j οι εικονοσυντεταγμένες, k το φασματικό κανάλι, x_{ij}^k η ψηφιακή τιμή του i, j για το φασματικό κανάλι k , t_1, t_2 οι χρονικές περίοδοι λήψης των δύο εικόνων, και c η σταθερά. Η μέθοδος της αφαίρεσης των εικόνων εφαρμόστηκε στις τελικές τμηματοποιημένες εικόνες DMSP OLS Stable lights του συνόλου της χρονοσειράς. Στο σχήμα 4 παρουσιάζονται ορισμένες χαρακτηριστικές τελικές εικόνες.

4. Αποτελέσματα

4.1 Διαχρονική εξέλιξη του τεχνητού νυχτερινού φωτισμού

Το κύριο χαρτογραφικό παράγωγο της παρούσας εργασίας είναι ο χάρτης μεταβολών του τεχνητού φωτισμού για την περίοδο 1992 – 2013 (Σχήμα 5). Είναι εμφανής η αλματώδης αύξηση των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού (ΝΕΦ) κυρίως περιμετρικά των οικισμών στο σύνολο του Ελληνικού χώρου. Η χωρική αυτή εξέλιξη του τεχνητού φωτισμού έχει ως αποτέλεσμα τον σταδιακά αυξανόμενο κατακερματισμό του φυσικού χώρου με ολοένα και περισσότερες περιοχές να επηρεάζονται από υψηλά επίπεδα οχληρού φωτός δεχόμενες τις πιέσεις που ασκεί η φωτορύπανση στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Οι περιφερειακές ενότητες (νομοί) που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη αυξητική τάση στην χωρική έκταση των πηγών νυχτερινού τεχνητού φωτισμού αποτελούν μεταξύ άλλων η Αττική (35.2%), η Ζάκυνθος (28.29%), η Θεσσαλονίκη (21.4%), η Πιερία (21.04%) και η Καβάλα (19.69%) (Σχήμα 6).

Αναφορικά με τους Νομούς Αττικής και Θεσσαλονίκης, οι παρατηρούμενες αλλαγές συνίστανται κυρίως στην πληθυσμιακή αύξηση που σημειώθηκε κατά το χρονικό διάστημα αναφοράς και ιδιαίτερα στην αστική διάχυση στο δίκτυο οικισμών της εξωαστικής ενδοχώρας των πολεοδομικών συγκροτημάτων. Αντίθετα, για τους νομούς Πιερίας, Καβάλας και Ημαθίας οι μεταβολές οφείλονται ενδεχομένως στην ανάπτυξη της εμπορικής δραστηριότητας, εκφραζόμενη μέσω της αγροτικής παραγωγής και του εμπορίου, ενώ για τους νησιωτικούς νομούς όπως η Ζάκυνθος και τα Δωδεκάνησα, η ανάπτυξη της τουριστικής δραστηριότητας και των τουριστικών



Σχήμα 5. Μεταβολές στα χωρικά πρότυπα του τεχνητού νυκτερινού φωτισμού στον Ελλαδικό χώρο την περίοδο 1992 – 2013

έργων υποδομής πιθανότατα συνέβαλε καθοριστικά στην αυξητική τάση που παρουσιάζει η χωρική κατανομή των νυκτερινών εκπομπών φωτισμού.

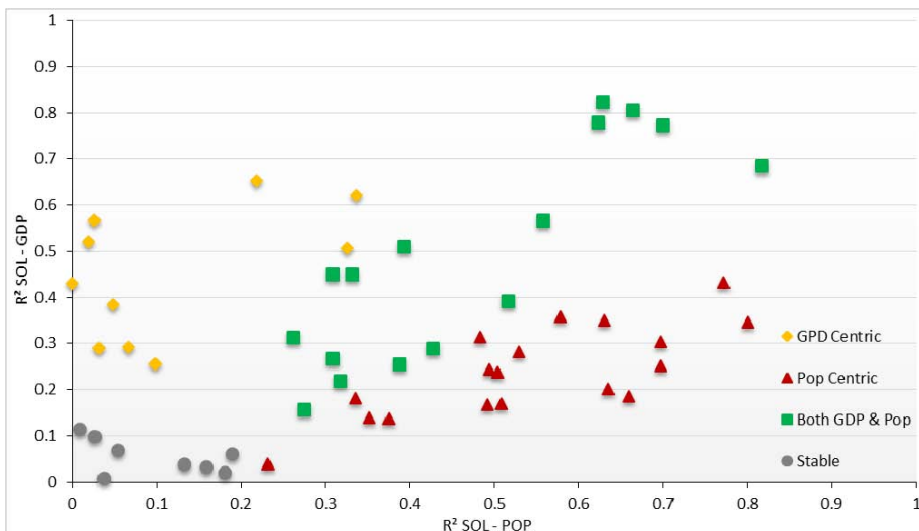
Ωστόσο, παρά την ισχυρή εξάπλωση του τεχνητού νυκτερινού φωτισμού στον περιφερειακό και περιφερειακό χώρο, εντός των πολεοδομικών συγκροτημάτων των κύριων αστικών κέντρων της χώρας, όπως στο Λεκανοπέδιο Αττικής και στη πόλη της Θεσσαλονίκης, καταγράφηκε μια πτωτική τάση στη χρήση του ηλεκτροφωτισμού με ποσοστό 15.7% και 2.7% αντίστοιχα. Η βαρύνουσα οικονομική κατάσταση και η οικονομική δυσπραγία στην οποία έχει περιέλθει η χώρα τα τελευταία πέντε χρόνια με τις ιδιαίτερα μειωμένες κρατικές χρηματοδοτήσεις επί των δήμων, καθώς και η σταδιακή εισαγωγή και θέσπιση περιβαλλοντικών νομοθεσιών τόσο σε Ευρωπαϊκό επίπεδο (οδηγία EuP – 2005/32/EC, EPBD – 2002/91/EC) όσο και σε τοπικό επίπεδο για αποδοτικότερη διαχείριση της ενέργειας, παρέχουν ισχυρά κίνητρα για τον περιορισμό του τεχνητού φωτισμού. Για παράδειγμα, στο δήμο

κίνησαν σταδιακά το 2011. Επίσης, το φαινόμενο της ανάστροφης αστικοποίησης (counter urbanization) ενδέχεται να συμβάλει και αυτό στην παρατηρούμενη μείωση.

Αντίθετα, τάσεις στασιμότητας ή μικρών αυξομειώσεων στη χωρική κατανομή του τεχνητού νυχτερινού φωτισμού παρουσιάζουν οι νομοί Λακωνίας, Σάμου, Φωκίδας και Αρκαδίας. Είναι αξιοσημείωτο ότι το προφίλ των νομών αυτών χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα δημογραφικής γήρανσης (Κανάρογλου κ.α., 2000) και ισχνής οικονομικής μεγέθυνσης, και αποτελούν τους λιγότερο ανεπτυγμένους νομούς της χώρας.

4.2 Διερεύνηση της συσχέτισης του τεχνητού νυχτερινού φωτισμού με κοινωνικο-οικονομικές μεταβλητές

Στην προσπάθεια για την περαιτέρω ανάλυση της σχέσης νυχτερινού φωτισμού και κοινωνικές και οικονομικές μεταβλητές στον Ελληνικό χώρο κατά το χρονικό διάστημα μελέτης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ των αθροιστικών τιμών φωτεινότητας (Sum of Lights, SOL) των δορυφορικών δεδομένων DMSP OLS και των επιλεγμένων μεταβλητών (μόνιμος πληθυσμός, ΑΕΠ και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας). Από τη ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ των ΝΕΦ και των τριών στατιστικών μεταβλητών, βρέθηκε ότι οι μεταβλητές συνδέονται ικανοποιητικά με γραμμικό τρόπο αποδίδοντας ικανοποιητικές τιμές του συντελεστή προσδιορισμού. Εν συνεχεία, με βάση τις παρατηρούμενες τιμές οι νομοί ταξινομήθηκαν σε τέσσερις κύριες ομάδες: Οικονομικά κεντρικοί (GDP Centric), Πληθυσμιακά κεντρικοί (Population Centric), Αμφίρροποι Οικονομικά & Πληθυσμιακά (GDP & Pop Centric) και Στάσιμοι (Stable) (Σχήμα 8).



Σχήμα 8. Διάγραμμα σκεδασμού των τιμών του R^2 μεταξύ των αθροιστικών τιμών SOL – GDP και SOL – POP.

Σύμφωνα με το σχήμα 8, παρατηρείται ότι στην πλειονότητα των νομών κύριοι παράγοντες στη διαμόρφωση της διαχρονική τάσης του τεχνητού νυχτερινού φωτισμού αποτέλεσε η αύξηση του μόνιμου πληθυσμού (Pop centric). Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων οι νομοί Λάρισας, Αχαΐας, Ηρακλείου και Ιωαννίνων οι οποίοι κατά την χρονική περίοδο 1992 – 2011 σημείωσαν σημαντική θετική μεταβολή στο μόνιμο πληθυσμό τους (Σχήμα 9). Επιπρόσθετα, σε έναν μεγάλο αριθμό νομών η αύξηση του νυχτερινού φωτισμού φαίνεται να σχετίζεται τόσο με την ανάπτυξη της οικονομικής δραστηριότητας όπως αυτή καταγράφεται στον δείκτη του ΑΕΠ, όσο και με την πληθυσμιακή μεγέθυνση.

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

Σχήμα 9. Διάγραμμα σκεδασμού των τιμών του R^2 μεταξύ των αθροιστικών τιμών SOL – GDP και SOL - Pop.

Ως *Στάσιμοι* χαρακτηρίζονται οι νομοί οι οποίοι κατά την ανάλυση παλινδρόμησης, βρέθηκε ότι εμφανίζουν πολύ χαμηλή συσχέτιση ($0 \leq R^2 \leq 0.2$) τόσο με τη μεταβλητή του ΑΕΠ όσο και με τον μόνιμο πληθυσμό. Οι νομοί αυτοί χαρακτηρίζονται από μικρές τάσεις αυξομειώσεως στο σύνολο των επιλεγόμενων μεταβλητών. Στην κατηγορία αυτή παρατηρείται ότι εντάσσονται νομοί οι οποίοι όπως βρέθηκε από την ποσοτική ανάλυση των μεταβολών, σημείωσαν μικρές χωροχρονικές διακυμάνσεις στα πρότυπα του τεχνητού νυχτερινού φωτισμού.

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μεθοδολογία για την διαχρονική χαρτογράφηση του τεχνητού νυχτερινού φωτισμού στον Ελληνικό χώρο την περίοδο 1992 – 2013. Η προτεινόμενη μεθοδολογία για την ψηφιακή επεξεργασία και ανάλυση των δορυφορικών εικόνων των δορυφόρων DMSP – OLS επιτρέπει την επιτυχή διαχρονική ανίχνευση των μεταβολών στα χωρικά πρότυπα των νυχτερινών εκπομπών φωτισμού, την ποσοτικοποίηση αυτών καθώς και την ερμηνεία της τάσης μέσω άμεσα σχετιζόμενων κοινωνικο-οικονομικών παραμέτρων όπως ο πληθυσμός, το ΑΕΠ και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ιδιαίτερα τοπογραφικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζει ο Ελληνικός σε σύγκριση με αυτά άλλων Ευρωπαϊκών χωρών, προσδίδουν ένα ιδιαίτερα ανομοιογενές προφίλ στην χωρική κατανομή και διασπορά των αστικών περιοχών, οι οποίες αποτελούν τις σημαντικότερες ανθρωπογενείς τεχνητές πηγές φωτισμού.

Η χαρτογράφηση των χωροχρονικών αλλαγών του τεχνητού φωτισμού ανέδειξε τις σημαντικές διαστάσεις που λαμβάνει το φαινόμενο της φωτορύπανσης στην πλειονότητα των σύγχρονων οικιστικών κέντρων της χώρας. Ιδιαίτερα για τα δύο ισχυρά μητροπολιτικά κέντρα της χώρας, η συνεχής αστική διάχυση, η κατασκευή υποστηρικτικών έργων υποδομής καθώς και η αυθαίρετη δόμηση, έχουν οδηγήσει στην σημαντική αύξηση του άμεσου και διάχυτου νυχτερινού φωτισμού. Επιπλέον η ανάπτυξη του τουρισμού και των συνοδών έργων υποδομής έχει συμβάλει στην εξάπλωση του νυχτερινού φωτισμού σε παράκτιες και νησιωτικές περιοχές. Χαρακτηριστικά, στο νομό Αττικής η χωρική έκταση των πηγών νυχτερινού φωτισμού επί της συνολικής έκτασης, αυξήθηκε κατά 35.2%, στο νομό Ζακύνθου κατά 28.29% και κατά 21.4% στο νομό Θεσσαλονίκης.

Ωστόσο, η οικονομική κρίση και η μείωση της κατανάλωσης των τελευταίων ετών συνέβαλε μεταξύ άλλων και στον περιορισμό του νυχτερινού φωτισμού ιδίως στα πολυπληθή αστικά κέντρα. Επιπλέον, η ανάληψη προγραμμάτων για αποδοτικότερη διαχείριση της ενέργειας μέσω της αντικατάστασης λαμπτήρων παλαιάς τεχνολογίας με νεότερους στα πλαίσια συμμόρφωσης με περιβαλλοντικές νομοθεσίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης παρέχουν ισχυρά κίνητρα στις δημοτικές αρχές για μείωση του κόστους μέσω λιγότερης σπατάλης του τεχνητού φωτισμού. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα έκδηλο στο πολεοδομικό συγκρότημα του Λεκανοπεδίου Αττικής στο οποίο κατά το χρονικό διάστημα αναφοράς σημείωσε μια πτωτική τάση 15% στη χρήση του τεχνητού φωτισμού, καθώς και σε μικρότερο βαθμό στην πόλη της Θεσσαλονίκης, Ιωαννίνων και Πάτρας. Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύονται και συνηγορούν με παρόμοια ευρήματα αντίστοιχων μελετών στις οποίες η διαχρονική ανίχνευση μεταβολών ανέδειξε την ταυτόχρονη συνύπαρξη αυξητικής και πτωτικής τάσης στα χωρικά πρότυπα του τεχνητού φωτισμού (Bennie et al., 2014, Han et al., 2014). Τέλος, Από την ανάλυση παλινδρόμησης, βρέθηκε ότι η αύξηση του νυχτερινού φωτισμού στην πλειονότητα των νομών συνδέθηκε με παράλληλη αύξηση του μόνιμου πληθυσμού και του ΑΕΠ γεγονός που εκφράζει την ισχυρή

συσχέτιση με αυτές τις μεταβλητές.

Η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να συνεισφέρει στη μελέτη και κατανόηση των διαστάσεων που λαμβάνει το φαινόμενο της φωτορύπανσης στον Ελλαδικό. Σύγχρονα δορυφορικά δεδομένα όπως τα DMSP – OLS αλλά και άλλα νεότερα, προσφέρουν μια μοναδική δυνατότητα παρακολούθησης του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος. Το έντονο διεπιστημονικό ενδιαφέρον που έχει προσελκύσει αναμένεται να βελτιώσει περαιτέρω τις υφιστάμενες μεθοδολογίες και πρακτικές για αποτελεσματικότερη ανάλυση και χρήση των δεδομένων αυτών σε μια πληθώρα εφαρμογών. Παράλληλα, η αλματώδης ανάπτυξη της δορυφορικής τεχνολογίας προσφέρει την κατασκευή δορυφορικών συστημάτων για την καταγραφή και συλλογή δεδομένων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εκτόξευση και η επιχειρησιακή λειτουργία του δορυφόρου Suomi NPP ο οποίος τα επόμενα έτη αναμένεται να βελτιώσει και να αναβαθμίσει τα υπάρχοντα διαθέσιμα δεδομένα νυχτερινού φωτισμού, προσφέροντας έτσι λεπτομερέστερη και ακριβέστερη ποσοτική ανάλυση του φαινομένου της φωτορύπανσης.

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

Βιβλιογραφία

- Amaral, S., Monteneiro A.M.V., Camara G. and Quintanilha, J.A., 2006. *DMSP OLS night-time light imagery for urban population estimates in the Brazilian Amazon*. International Journal of Remote Sensing, 27: 179–195.
- Bennie, J., Davies, T.W., Duffy, J.P., Inger, R. and Gaston, K.J., 2014. *Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed night time lights*. Scientific Reports, 4: 3789.
- Baugh, K.E, Elvidge, C.D., Ghosh, T. and Ziskin, D., 2010. *Development of a 2009 Stable Lights Product using DMSPOLS data*. Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network, Hanoi, Vietnam, 30, pp. 114-130.
- Chalkias, C., Petrakis, M., Psiloglou, B., Lianou, M., 2006. *Modelling of light pollution in suburban areas using remotely sensed imagery and GIS*. Journal of Environmental Management, 79: 57–63.
- Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C.D. and Baugh, K.E, 2000. *The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements*. Mon. Not. R. Astron. Soc., 318: 641-657.
- Cinzano, P., Falchi, F. and Elvidge, C.D, 2001. *The first World Atlas of the artificial night sky brightness*. Mon. Not. R. Astron. Soc. 328: 689–707.

- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B. and Lambin, E., 2004. *Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review*. International Journal of Remote Sensing, 25: 1565 – 1596.
- Elvidge, C.D., Baugh, K.E., Kihn, A.E., Kroehl, H.W. and Davis, E.R., 1997. *Mapping City Lights with Nighttime Data from the DMSP Operational Linescan System*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 63: 727-734
- Elvidge, C.D., Imhoff, M.L., Baugh, K.E., Hobson, V.R., Nelson, I., Safran, J., Dietz, J.B. and Tuttle, B.T. 2001. *Night-time lights of the world: 1994–1995*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 56: 81– 99.
- Gallaway, T., Olsen, R. D. and Mitchell, D. M., 2010. *The economics of global light pollution*. Ecological Economics. 69: 658–665.
- Garstang, R. H., 1984. *Improved Scattering Formula for Calculations of Artificial Night-Sky Illumination*. The Observatory, 104: 196–197.
- Han, P., Huang, J., Li, R., Wuang, L., Hu, Y., Wang, J. and Huang, W., 2014. *Monitoring Trends in Light Pollution in China Based on Nighttime Satellite Imagery*, Remote Sensing, 6: 5541-5558.
- Liu, Z., He, C., Zhang, Q., Huang, Q. and Yang, Y., 2012. *Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008*. Landscape and Urban Planning 106: 62– 72.
- Mellander, C., Stolarick, K., Matheson, Z. and Lobo, J., 2013. *Night-Time Light Data: A Good Proxy Measure for Economic Activity*. Centre of Excellence for Science and Innovation Studies, 315.
- Navara, K.J. and Nelson, R.J., 2007. *The dark side of light at night: physiological, epidemiological and ecological consequences*. Journal of Pineal Research, 43: 215-224.
- Otsu, N., 1979. *A Threshold Selection Method for Gray – Level Histograms*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 9: 62 – 66.
- Παπαμάρκος, Ν., 2010. *Ψηφιακή Επεξεργασία & Ανάλυση Εικόνας*. Νικόλαος Παπαμάρκος, Ξάνθη, 580 σσ.
- Small, C., Francesca, P. and Elvidge, C.D., *Spatial analysis of global urban extent from DMSP – OLS night lights*. Remote Sensing of Environment, 96: 277–291.
- Walker, M. F., 1973. *Light pollution in California and Arizona*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 85: 508 – 519.
- Wu, J., He, S., Peng, J., Li, W. and Zhong, X., 2013. *Intercalibration of DMSP-OLS nighttime light data by the invariant region method*. International Journal of Remote Sensing, 34: 7356-7368
- Χαλκιάς, Χ., Πετράκης, Μ., Λιανού, Μ., Ψυλόγλου, Β. και Καρτάλης, Κ., 2002. *Αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων DMSP με τη χρήση Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών για τον πολιτικό σχεδιασμό*. Πρακτικά 6^{ου} Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη
- Zeng, C., Zhou, Y., Wang, S., Yan, F. and Zhao, Q., 2011. *Population spatialization in China based on night-time imagery and land use data*. International Journal of Remote Sensing, 32: 9599–9620.